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

УДК 539.1, 539.12, 621.384.6, 61

Рег. № AAAA-A16-116022510108-7

Per. №



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

AAAA-A16-116022510108-7

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

(промежуточный за 2018 год)

Руководитель НИР, Академик РАН,, д.ф-м.н

И.И. Ткачев «31» января 2019 г.

Москва 2019 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, Зав. отделом, академик РАН,	H			
д.ф-м.н.	31.01.2019	И.И. Ткачев		
	подпись, дата	(введение, заключение)		
Исполнители:	of them?			
в. н.с., д.фм.н.	31.01.2019	_ В.С. Пантуев		
	подпись, дата	(раздел 1)		
Зав. лаб., к.фм.н.	31.01.2019	Е.С. Конобеевский		
	подпись, дата	(раздел 2, 3, 4, 5)		
Зав. лаб., д.фм.н.	31.01.2019	В.Г. Недорезов		
	подпись, дата	(раздел б)		
И.о. Зав. лаб., к.фм.н.	Tikopolos 31.01.2019	Т.Л. Каравичева		
	подпись, дата	(раздел 7)		
в. н.с., к.фм.н.	31.01.2019	Ф.Ф. Губер		
	подпись, дата	(раздел 8, 9, 10)		

2. РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 144 с., 73 рис., 7 табл.

Ключевые слова:

ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, NN И PP КОРРЕЛЯЦИИ, ДЛИНА РАССЕЯНИЯ, ВИРТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ, ДЛИНА РАССЕЯНИЯ, ЛЕГКИЕ ГАЛО ЯДРА, КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА, ДИНЕЙТРОН, КОР, РЕАКЦИЯ ПОДХВАТА, РЕАКЦИЯ СРЫВА, НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ГАММА-СПЕКТРОМЕТР, НИЗКОФОНОВАЯ KAMEPA, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ. АКТИВАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛИ И ОСАДКИ, ФОТОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ, НЕЙТРОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, БЫСТРЫЕ И МЕДЛЕННЫЕ НЕЙТРОНЫ, ОБОБЩЕННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СО СВЯЗЬЮ КАНАЛОВ, ЕДИНОЕ ОПИСАНИЕ, МАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА, ПОЛУМАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА, СПЕКТРЫ ΓAMMAизлучения, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР (БАК), ЦЕРН, СУПЕРДЕТЕКТОР ALICE, ДЕТЕКТОРЫ ТО, ФИТ, ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА, УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ СТОЛКНОВЕНИЯ. УМНОЖИТЕЛЬ, ЧЕРЕНКОВСКИЙ СЧЕТЧИК, АМПЛИТУДНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, ЦЕРН, СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ФРОНТАЛЬНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР, МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ЧАСТИЦ, ЗАРЯЖЕННЫХ ПЛОСКОСТЬ РЕАКЦИИ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТИМОСТИ, ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ, МИКРОКАНАЛЬНЫЕ ФЭУ, РОЖДЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ, УСТАНОВКА HADES, КОЛЛАЙДЕР NICA, ЭКСПЕРИМЕНТ СВМ, ПЕРЕДНИЙ КАЛОРИМЕТР, ЭКСПЕРИМЕНТ MPD/NICA

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2018 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

1 Задача «Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX».

Изучаются условия образования и свойства плотной и горячей ядерной материи, возникающей в релятивистских ядро-ядерных столкновениях. Задача исследования ядерной материи в условиях экстремальной температуры и плотности тесно связана с важнейшими фундаментальными проблемами физики: природой конфайнмента и восстановления киральной симметрии, космологией ранней вселенной, астрофизикой компактных объектов. Работа выполняется в рамках соглашения о сотрудничестве ИЯИ РАН с Брукхэвенской национальной лабораторией, США. Эксперимент РНЕNIX продолжается уже 18 лет. В 2018 году был продолжен анализ накопленных экспериментальных данных. Основной задачей группы из ИЯИ РАН являлось участие в подготовке публикаций.

2 Задача «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики. Получение данных о энергиях виртуального рр и пр синглетного состояния на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ».

В 2018 г. заново проанализированы все данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученные с 1999 г. в реакциях nd и dd-развала (в том числе и данные полученные ранее в Лаборатории атомного ядра ИЯИ). Серьезные расхождения между экспериментальными данными, полученными в различных работах, можно объяснить влиянием 3N-сил зависящих от скорости разлета nn-пары и заряженного фрагмента. Показано, что анализируемые данные можно аппроксимировать плавной кривой зависимости длины рассеяния от параметра R, определяющего расстояние разлета фрагментов за фиксированное время. Ясно, что чем больше значение параметра R, тем больше скорость разлета фрагментов, тем быстрее фрагменты покидают область действия 3N-сил, и тем меньше должно быть их влияние на параметры *пп*-взаимодействия, извлекаемые из эксперимента. Наибольшее значение параметра R было в нашем эксперименте *nd* --> *pnn* при энергии нейтронов 40 МэВ. В 2018 г. проведена подготовка и проведен эксперимент на нейтронном канале РАДЭКС при энергии нейтронов до 200 МэВ. Предварительный анализ полученных данных показал, что достаточное большое количество данных получено при энергии первичных нейтронов 40-80 МэВ. Продолжается обработка этих данных. Исследование и сравнение пл и рр взаимодействий являются важными в связи с проверкой гипотезы о зарядовой симметрии ядерных сил. Нарушение зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил, т.е. различие ядерных пп- и ррвзаимодействий, проявляется, В частности, различии низкоэнергетических В

характеристик пп и рр-взаимодействия – синглетных длин рассеяния и энергий виртуального ${}^{1}S_{0}$ уровня. Было высказано предположение, что разброс значений a_{nn} (от – 16 до -22 Фм), полученный в реакциях с тремя частицами в конечном состоянии, может быть связан с большим влиянием 3*N*-сил. Можно предположить, что и значения протонпротонной длины рассеяния a_{pp} и энергии виртуального ${}^{1}S_{0}$ уровня E_{pp} , извлеченные из экспериментов с тремя или четырьмя частицами в конечном состоянии, будут отличаться от значений, полученных в свободном рр-рассеянии. Для проверки этого предположения в ИЯИ РАН начато исследование реакции $d + {}^{1}H \rightarrow p + p + n$. Проведено кинематическое моделирование данной реакции, подобраны параметры экспериментальной установки, проведено моделирование прохождения протонов через систему ΔE - и E-детекторов. В результате моделирования были получены спектры и ΔE -E-диаграммы детектируемых протонов для последующего сравнения с экспериментальными данными. Проведены тестовые измерения системы сбора и обработки информации, получены с амплитудные и временные спектры с детекторов. В декабре 2018 г. получены предварительные экспериментальные данные для реакции $dp \to ppn$ при энергии первичных дейтронов 15 МэВ на циклотроне У-120 НИИЯФ МГУ. В настоящее время ведется обработка полученных данных.

3 Задача «Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях»

Решается фундаментальная проблема ядерной физики – исследуется кластерная структура ядер, в частности, поиск в ядрах *NN*-кластеров. Строгая корреляция между нуклонами приводит к явлению кластеризации. Энергии квазисвязанных синглетных состояний двухнуклонной системы составляют порядка 0.1–0.2 МэВ, над порогом развала. Однако в ядре синглетная пара может быть более связана, образуя кластер. Наиболее характерный пример ⁶He, в котором существует динейтронная компонента. Для ядра ⁶Li, также обсуждается структура этого ядра 4 He + (np). В ходе выполнения задачи предложено исследование реакции подхвата кора из двухнейтронных гало-ядер 6 He и 11 Li. В эксперименте NN-корреляции в гало-ядре будут оценены по энергии квазисвязанного *NN*-пары. В результате кинематического моделирования 6 He+ 2 H \rightarrow 6 Li+(nn) \rightarrow 6 Li+n+n показано, что энергия nn-квазисвязанного состояния может быть определена по форме энергетического спектра нейтронов, вылетающих при развале этого состояния, определены параметры планируемого эксперимента. В эксперименте будет использован пучок 6 He (6 Li) с энергией ~ 5 -10 МэВ/нуклон и тонкая мишень из дейтерированного полиэтилена. В эксклюзивном эксперименте будут регистрироваться как заряженная частица (⁶Li), так и один или два нейтрона. Методика детектирования нейтронов в эксперименте на пучке радиоактивных ядер 6 He и 8 He опробована в сеансе на циклотроне У-400 в ЛФЯР ОИЯИ. Показана возможность выделения нейтроных событий от событий регистрации заряженных частиц и гамма-квантов. Большой интерес представляют также, так называемые Бороминовские (Borromean) ядра, состоящие из трех кластеров, при этом удаление любого из кластеров приводит к неустойчевой (распадающейся) структуре. Характерными бороминовским ядром является ядро ⁹Be,

развал которого может происходить на кластеры $\alpha + \alpha + n$ или через нестабильные промежуточные ядра: ⁸Ве или ⁵Не. Для определения вклада кластерных конфигураций $(^{8}\text{Be} + n, \alpha + \alpha + n, ^{5}\text{He} + \alpha)$ в структуру ^{9}Be начато исследование неупругого рассеяния дейтронов и альфа-частиц на кластерах ядра ⁹Ве. Результаты проведенного кинематического моделирования реакций ${}^{9}\text{Be}(\alpha,\alpha'n)X$, ${}^{9}\text{Be}(\alpha,\alpha'\alpha)X$, 9 Be(d,d'n)X и 9 Ве(d,d'a)X показывают, что регистрация рассеянной альфа-частицы (дейтрона) в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния ⁹Ве позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний. Экспериментальное исследование проводится при энергии налетающих дейтронов 15 МэВ в НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцина. Получены предварительные результаты исследования угловой зависимости реакций 9 Be $(d,d\Box){}^{9}$ Be, 9 Be $(d,t){}^{8}$ Be, 9 Be $(d,p){}^{10}$ Be и 9 Be $(d,m){}^{10}$ Be $(d,m){}^$ α)⁷Li с возбуждением основных и низколежащих возбужденных уровней ядер ⁸⁻¹⁰Be и ⁷Li.

4 Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гаммаизлучений с использованием германиевых гамма-спектрометров».

Цель работы – разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров. В процессе исследований проводились работы по разработке новых методик гамма- и нейтронноактивационного анализа (НАА) с улучшенными метрологическими характеристиками с использованием новых ядерно-физических установок. В результате исследований впервые создана новая ядерно-физическая установка – активационно-измерительный комплекс на базе W-Be фотонейтронного источника ИЯИ РАН на серийном промышленном электронном ускорителе ЛУЭ-8-5 и низкофонового гамма-спектрометра. С помощью комплекса проведены измерения и отработана методика изучения фотоядерных реакций. Представлены новые экспериментальные результаты по фотовозбуждению спиновых изомеров Cd и In реальными и виртуальными фотонами (электронами) в области пороговой энергии. Результаты сопоставлены с теоретическими расчетами в рамках феноменологических моделей. Наблюдается несоответствие между экспериментальными данными и теоретическими расчетами. Также проводилась отработка методики измерения содержаний в атмосферных аэрозолях и осадках нерадиоактивных элементов. Для выбора аналитических фильтрующих материалов пробоотбора атмосферных аэрозолей и осадков, пригодных для нейтронно-активационного анализа, рассматривались образцы различных волокнистых фильтрующих материалов: фильтры из кварцевого волокна, марля отбеленная, аналитический фильтрующий материал ЛФС-2, фильтры Петрянова двух видов и промышленный фильтр из холстопрошивного полотна. Образцы фильтров облучались нейтронами фотонейтронного источника. Измерения у-активности образцов проводились использованием низкофонового гамма-спектрометра. активационных гамма-спектров, соответствующих образцам различных фильтрующих материалов, указывает на систематическое наличие в них в качестве основных примесей Mn, Na и Cl (в различных комбинациях). Наиболее пригодным материалом для нейтронно-активационного анализа является фильтр из кварцевого волокна, а также фильтры из марли и ЛФС-2. Сделаны оценки содержания микропримесей в исследуемых

5 Задача « Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы».

Цель работы — Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Продолжены работы по анализу имеющихся экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию для четночетных изотопов области массовых чисел $56 \le A \le 246$ в рамках оптической модели со связью каналов с целью получения единого оптимального описания нейтронных данных. Проведена модернизация программного обеспечения таких расчетов. Добавлены модули поиска локальных и глобальных минимумов \square^2 . Проведено моделирование эксперимента с целью оценки возможности работы на «квазимоноэнергетическом» пучке нейтронов. Проведены измерения спектров быстрых нейтронов, производимых в Ве мишени фотонейтронного источника ускорителя ЛУЭ-8. Проведены измерения геометрии пучка медленных и тепловых нейтронов для различных коллиматоров.

6 Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер, 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 электронов, реальных и виртуальных фотонов».

Приведены новые результаты, полученные в 2018 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особое внимание уделено изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Проводилось изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов от фемтосекудных тераваттных лазеров. Получены новые данные о свойствах гигантских резонансов в ядрах. Отработаны методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.

7 Задача «Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN»

Проведена работа по ремонту, замене узлов и блоков, выполнена наладка детектора ТО, обеспечено экспертное сопровождение детектора ТО во время проведений сеансов измерений в эксперименте ALICE в 2018 году. Выполнена первичная обработка экспериментальных данных, полученных в сеансах физических измерений на пучках Большого адронного коллайдера. Проведен анализ данных для вычисления триггерных (видимых) сечений при помощи метода Ван дер Меера для р-р столкновений с энергиями

 $\sqrt{s} = 5$ ТэВ. Получены сечения каналов вылета определенного количества нейтронов и протонов вперёд в результате электромагнитной диссоциации (ЭМД) ²⁰⁸Pb. Получены экспериментальные данные по выходу вторичных ядер от ЭМД ядер ²⁰⁸Pb, которые имеют близкие ним отношения заряда к массе, в частности, ядра ^{205,206,207}Pb, ^{204,205,206,207}Tl Проведены расчеты сечений адронного взаимодействия ядер, электромагнитной диссоциации, рождения электрон-позитронных полного пар И сечения ДЛЯ взаимодействий различных ядер на БАК. Получены данные по результатам исследования старения ФЭУ детектора AD. Российские учёные приняли участие в рабочих совещаниях ALICE (ALICE weeks, ALICE PWG meetings, ALICE Off-line meetings, ALICE Physics Forum, Heavy Ion Forum CERN, ФИТ meeting, ФИТ design review meetings). полученным результатам были сделаны доклады и проводились их обсуждения для координации проводимых работ.

8 Задача «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)»

Физическая программа работ на действующем широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС (HADES – High Acceptance DiElectron Spectrometer) и на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи, которая образуется в ядро-ядерных столкновениях при значениях барионной плотности в 2-3 раза превышающую плотность ядер в обычном состоянии и умеренных температура. Такие значения барионной плотности достигаются в ядро-ядерных столкновениях при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе (энергии действующего ускорителя SIS18 в GSI). Уже при этих энергиях ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Данный эффект 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 на действующем ускорителе SIS18.

Другим важным направлением исследований при энергиях пучка тяжелых ионов порядка 1-2 ГэВ на нуклон на установке ХАДЕС является изучение анизотропии потоков заряженных частиц — одной из важных наблюдаемых величин, чувствительных к транспортным свойствам, в частности к уравнению состояния ядерной материи. Это позволяет на макроскопическом уровне поставить предел по массам нейтронных звезд,

что важно для понимания эволюции звезд и астрофизики в целом.

В 2017 г. в ГСИ была утверждена программа дальнейших экспериментов на ХАДЕС на ускорителе SIS18 и было выделено пучковое время (88 смен) на 2018г. для проведения эксперимента Ад+Ад при энергии налетающих ядер серебра 1,65 А ГэВ и для проведения экспериментов на пучке пионов в 2019г. (87 смен). Однако, из-за пожара на ускорителе начало выполнения этой программы сместилось на 2019г. В 2018 г. была проведена модификации переднего FW-годоскопа с целью проверки ячеек и замены ФЭУ в ячейках с повышенным шумом. Проверка ячеек годоскопа была выполнена посредством регистрации энерговыделений от космических мюонов и на тестовом пучке ионов серебра в середине декабря 2018г. FW-годоскоп полностью подготовлен к эксперименту Ад+Ад при энергии налетающих ядер серебра 1,65 АГэВ на ускорителе SIS18, который планируется провести в марте 2019 г. В этом эксперименте он будет использоваться для определения центральности и угла плоскости реакции.

В 2018 г. продолжались начатые ранее работы по стендовым испытаниям детекторных ЕСАL-модулей на космическом излучении, монтажу испытанных модулей в секторах основной конструкции ЕСАL, испытанию систем входной электроники, системы накопления и считывания экспериментальных данных. С помощью ЕСАL предполагается выполнить прецизионные измерения сечений рождения π^0 and η -мезонов и существенно повысить эффективность разделения пионов и электронов при значениях импульса частиц p > 400 МэВ/c. В отчетный период собраны и проведены стендовые испытания 374 ЕСАL-модулей, проведён монтаж ЕСАL-модулей в четырех секторах основной конструкции ЕСА. Проведены испытания мультиканальной карты PaDiWa в системах входной электроники и считывания данных. Калориметр полностью подготовлен к проведению физических измерений в эксперименте Ag + Ag на действующем ускорителе SIS18 в GSI в 2019 г.

9 Задача « Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI»

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Baryonic Matter) на ускорительном комплексе ФАИР направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи в сверхплотном состоянии, которая образуется в ядро-ядерных столкновениях при энергиях ядер до 11

АГэВ. ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации СВМ за разработку, изготовление и подготовку переднего адронного калориметра (PSD - Projectle Spectator Detector). Этот калориметр предназначен для определения таких глобальных характеристик как центральность и угол плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях с энергиями пучка 2-11 ГэВ/нуклон в экспериментах на установке СВМ на сильноточном ускорителе SIS100 комплекса ФАИР.

В 2018 г. ИЯИ РАН продолжал работу по подготовке переднего адронного калориметра к экспериментам на установке СВМ.

Получены следующие результаты:

- Разработана методика калибровки продольных секций модулей калориметра на космических мюонах. Проведена калибровка и определены световыходы всех 450 секций для 45 изготовленных в ИЯИ модулей. Полученные данные подготовлены для размещения в базе данных СВМ.
- Проведены измерения отклика супермодуля адронного калориметра СВМ на канале вторичных пучков протонов и пионов Т10 в ЦЕРНе в диапазоне энергий адронов 1.2 9 ГэВ. Для считывания сигналов с фотодиодов использовалась электроника с прямым методом считывания формы импульса, разработанная в ОИЯИ.
- Проведены измерения отклика одного из модулей с фотодиодами, предварительно облученными нейтронами с потоками $2x10^{11}$ нейтронов/см², который ожидается в экспериментах CBM, в том же диапазоне энергий адронов.
- Проведены измерения отклика одного из модулей калориметра с различными прототипами аналоговой и считывающей электроники: с прямым считыванием сигнала на основе АЦП ADC64s2, разработанной в ОИЯИ, Дубна), и электроники, разработанной в ИЯИ РАН со считыванием предварительно обработанного сигнала на основе ТоТ метода.
- Начаты работы по адаптации модуля электроники, разработанного для считывания сигналов с электромагнитного калориметра установки ПАНДА, для считывания сигналов с переднего адронного калориметра установки СВМ и ее интеграция в систему сбора и передачи данных СВМ.
- Разработана рабочая документация на изготовление механической системы для установки одного из модулей переднего адронного калориметра СВМ, собранного в ИЯИ

10 Задача Эксперимент MPD/NICA».

Физическая программа мегапроекта НИКА (Дубна, Россия) направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи с большой плотностью, в частности фазовой диаграммы ядерной материи и возможных фазовых переходов. С этой целью создается комплекс сверхпроводящих ускорительных колец, на котором будут производиться столкновения тяжелых ионов при энергиях $\sqrt{s} = 4 - 1$ 11ГэВИзучения этих столкновений будет проводиться Многоцелевым Детектором (MPD), разработанный для поиска возможных фазовых переходов, смешанной фазы и критической точки. На ускорительном комплексе NICA планируется изучать промежуточные области фазовой диаграммы сильно взаимодействующей КХД материи при умеренных температурах и максимальной барионной плотности. Одим из важнейших является передний детекторов установки МРО адронный калориметр FHCal, предназначенный для измерения геометрии столкновения тяжелых ионов, а именно, центральности и ориентации плоскости реакции. ИЯИ РАН отвечает за создание переднего адронного калориметра FHCal в сотрудничестве с Лабораторией физики высоких энергий, ЛФВЭ ОИЯИ. В 2018 г. ИЯИ РАН продолжал работу по созданию переднего адронного калориметра и подготовке к будущим экспериментам на установке МРД. В 2018 году собрана и протестирована основная часть модулей адронного калориметра; разработаны методы энергетической калибровки секций модулей калориметра космическими мюонами; разработана методика измерения световыходов продольных секций модулей калориметра; проведено Монте Карло моделирование различных вариантов измерения центральности ядро-ядерных взаимодействий в реалистичной модели экспериментальной установки MPD.

3. СОДЕРЖАНИЕ

1.СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
2.РЕФЕРАТ	3
3.СОДЕРЖАНИЕ	12
4.ВВЕДЕНИЕ	13
5.Задача «Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на устан PHENIX»	
6.Задача «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными систем лёгкими ядрами. Получение данных о энергиях виртуального рр и пр синглет состояния на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ»	ного
7.Задача «Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязаля при средних энергиях»	-
8.Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма- использованием германиевых гамма-спектрометров».	-
9.Задача «Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами о возбуждением коллективных степеней свободы »	
10. Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий в ядер, свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (ме дельта-ядра, гиперядра). Изучение нелинейных эффектов квантовой электрод взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучк релятивистских электронов, реальных и виртуальных фотонов»	зонные ядра, инамики во
релятивистских электронов, реальных и виртуальных фотонов» 11. Задача «Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE н пучках ускорителя LHC CERN»	а встречных
12. Задача «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и яд взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)»	
13. Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке С	BM в GSI»101
14. Задача «Эксперимент MPD/NICA»	110
15. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
16. ПУБЛИКАНИИ	125

4. ВВЕДЕНИЕ

1 Задача «Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX».

Построение фундаментальной теории сильного взаимодействия - квантовой хромодинамики (КХД) - стало поворотным пунктом в понимании природы сильного взаимодействия между элементарными частицами. На стыке нескольких областей физики ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой хромодинамики и астрофизики - стало развиваться новое направление: исследование вещества при экстремальной температуре плотности, которое привлекает И внимание экспериментаторов и теоретиков последние 30 лет. Важным этапом был запуск в 2000 году ускорителя на встречных пучках, Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC), в Брукхевенской Национальной Лаборатории в США. RHIC был разработан и построен преимущественно для изучения столкновений ядер с массами от дейтрона до золота и энергией до 200 ГэВ на нуклон-нуклонную пару в системе центра масс. В течение 18-ти лет на ускорительном комплексе проводились измерения на установке PHENIX. 2016 год явился завершающим для набора статистики, а в 2017 и 2018 годах осуществлялся анализ накопленных данных. В.С. Пантуев в 2018 г. участвовал в подготовке статей по результатам измерений на установке PHENIX.

2 Задача «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами. Получение данных о энергиях виртуального рр и пр синглетного состояния на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ».

В 2018 г. заново проанализированы [1] все данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученные с 1999 г. в реакциях nd и dd-развала (в том числе и данные полученные ранее в Лаборатории атомного ядра ИЯИ [2,3]). Нуклон-нуклонное взаимодействие изучается почти столетие, и за этот период накоплено огромное количество данных о протон-протонном (pp) и нейтронно-протонном (np) взаимодействиях. Тщательный анализ этих данных привел к построению различных реалистических моделей ядерных сил, описывающих подавляющее большинство экспериментальных данных с хорошей точностью ($\Box^2/N \sim 1$) [4–5].

Ситуация вокруг нейтронно-нейтронного (nn) взаимодействия более неоднозначна. Из-за отсутствия нейтронной мишени данные об этом взаимодействии получены в основном из реакций с участием двух нейтронов в конечном состоянии. Однако во многих случаях имеются серьезные расхождения между экспериментальными данными и результатами точных расчетов на основе уравнений Фаддеева. В частности, серьезные расхождения между теорией и экспериментальными данными обнаружены в реакции

трехчастичного развала $n+d \square n+n+p$ в кинематике нейтрон-нейтронного квазисвободного рассеяния (КСР). Оказалось, что экспериментальные сечения этой реакции [6, 7] превышают теоретические оценки на ~18%. При этом теория хорошо описывает сечения np-рассеяния, измеренные в той же реакции и в той же кинематике КСР [7]. Данную кризисную ситуацию можно также проиллюстрировать сравнением экспериментальных и теоретических данных для трехнуклонного развала в системах $n+d \square n+n+p$ и $p+d \square p+p+n$ в так называемой «Space Star» кинематике [8]. В реакции развала три вылетающих нуклона имеют импульсы одинаковой амплитуды, которые в системе ц. м. трех нуклонов формируют плоскость, перпендикулярную импульсу первичного нуклона с углом 120° между любыми парами вторичных нуклонов. Тем не менее, экспериментальные данные для pd и nd развала сильно отличаются друг от друга, тогда как теоретические сечения развала оказываются практически одинаковыми и не совпадают с экспериментальными.

Исследование и сравнение всех типов взаимодействия являются важными и в связи с проверкой гипотезы о зарядовой симметрии ядерных сил, предложенной в 1932 г. Гейзенбергом. Нарушение зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил, т.е. различие ядерных nn- и pp-взаимодействий, согласно современным представлениям связано с различием масс u- и d-кварков, их зарядов и магнитных моментов [9]. Примерами нарушения зарядовой симметрии являются различие масс нейтрона и протона; различие энергий связи (E_B) зеркальных ядер (например, $E_B(^3\text{He}) - E_B(^3\text{H})$); различие анализирующих способностей $A_n(Q_n) \neq A_p(Q_p)$ в реакции $np \otimes np$; различие синглетных 1S_0 nn- и pp-длин рассеяния.

Особую роль в определении меры нарушения зарядовой симметрии играет исследование низкоэнергетических характеристик NN-взаимодействия в синглетном спиновом состоянии — длин рассеяния и энергий виртуального 1S_0 уровня. Благодаря существованию виртуального уровня с энергией (E_{NN}) близкой к нулю соответствующие длины рассеяния a_{nn} и a_{pp} велики по абсолютной величине и весьма чувствительны к небольшим различиям nn- и pp-потенциалов (изменение потенциала на несколько процентов может приводить к 20—30% изменениям в величине длины рассеяния). Авторы [10] назвали нуклон-нуклонную длину рассеяния «мощным увеличительным стеклом для изучения NN взаимодействия».

Протон-протонная длина рассеяния находится из экспериментов по свободному pp-рассеянию ($a_{pp} = -17.3 \pm 0.4 \, \Phi$ м); ее погрешность связана главным образом с модельно-зависимой процедурой исключения электромагнитной компоненты pp-взаимодействия. Нейтрон-нейтронная длина рассеяния определяется в основном в реакциях $n+d \, \mathbb{R} \, p+n+n$ и $p^r+d \, \mathbb{R} \, g+n+n$ при исследовании взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) двух нейтронов, имеющих очень малую относительную энергию [11–14]. Реакция захвата пиона большей частью специалистов считается не подверженной влиянию 3N-сил, в то время как в реакции nd-развала такое влияние нельзя исключить, и оно, возможно, приводит к расхождению в извлекаемых величинах.

Анализ данных о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, извлеченной в реакциях

nd- и dd-развала показал, что разброс значений a_{nn} (от -16 до -22 Фм) значительно превосходит приведенные авторами значения ошибок. Заметим, что данные об a_{nn} были получены в широкой области энергии налетающих частиц (от 13 до 40 МэВ). Можно предположить, что большие значения a_{nn} (по абсолютной величине) могут быть связаны с большим влиянием 3N-сил. Так, дибарионная модель ядерных сил [15] предсказывает достаточно сильное 3N-взаимодействие между дибарионом (в нашем случае динейтронным синглетом) и нуклоном, обусловленное обменом скалярным мезоном. При этом влияние этого взаимодействия на параметры nn-взаимодействия (длину рассеяния и энергию виртуального состояния) будет зависеть от скорости разлета фрагментов.

Таким образом, необходимы как дополнительные данные о низкоэнергетических параметрах NN-взаимодействия при различных энергиях, так и анализ всей совокупности данных для оценки влияния трехчастичных сил.

3 Задача «Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях»

Известно, что в свободном состоянии не существует связанного динейтрона, дипротона и даже синглетного дейтрона, имеются только виртуальные синглетные состояния с энергий порядка 0.1–0.2 МэВ над порогом развала. Однако в ядре синглетная nn-пара может быть более связана, образуя кластер. Наиболее характерный пример ⁶He, динейтронная компонента в котором исследовалась, как теоретически, например, в [1–4], так и экспериментально в упругом рассеянии различных радиоактивных легких ядер [5–7]. Двухнейтронное гало в ¹¹Li было впервые обнаружено в [6], однако детали ядерной структуры и взаимодействия кор–гало до сих пор полностью не выяснены. Кроме упомянутых ⁶He и ¹¹Li интерес может представлять и исследование других гало-ядер, например, ⁸He, в котором система кор–гало может существовать как ⁶He +2n, ⁴He+2n+2n или даже ⁴He+4n.

В ядрах с двухнейтронным гало может существовать дополнительное взаимодействие между кором и динейтроном, приводящее к дополнительному связыванию двух нейтронов. Основная идея предлагаемых нами экспериментов состоит в том, что если из ⁶Не или ¹¹Li быстро удалить кор, то наблюдаемый характер импульсного распределения «оставшейся» *пп*-пары не должен измениться, т.к. эта пара является в таком эксперименте «спектатором», который в адиабртическом приближении вылетает из зоны реакции без существенных искажений того состояния, который имел первоначально. Можно ожидать, что измеренные *пп*-корреляции, в частности энергии *пп*-квазисвязанного состояния, окажутся совсем не те, которые присущи свободной *пп*-системе.

Предложено исследование nn-корреляций в реакциях подхвата кора из ядер 6 Не или 11 Li:

$${}^{6}\text{He} + {}^{2}\text{H} \rightarrow {}^{6}\text{Li} + (nn) \tag{1}$$

$$^{11}\text{Li} + ^{2}\text{H} \rightarrow ^{11}\text{Be} + (nn)$$
 (2)

с регистрацией как заряженной частицы 6 Li (11 Be), так и нейтрона (или двух нейтронов) от распада синглетного nn-состояния.

В рамках темы будет исследована также кластерная структура легких ядер (^{6,7}Li, ⁹Be, ^{10,11}B и др.). Актуальность исследования определяется потребностью в понимании кластерной структуры легких ядер и сравнительного вклада различных кластерных конфигураций. Будут исследованы различные реакции на кластерах, образующих эти ядра. Научная новизна исследования — использование нескольких различных реакций (квазисвободного рассеяния (КСР), квазисвободной передачи (КСП), неупругого рассеяния с развалом возбужденного состояния на несколько кластеров) и различных ядер-снарядов (дейтронов, альфа-частиц). Такое многоплановое исследование позволит обеспечить высокую точность измерений и однозначность определения кластерной структуры ядер.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. V. T. Voronchev, V. M. Krasnopol'sky and V. I. Kukulin, J. Phys. G 8, 649 (1982).
- 2. M. V. Zhukov et al., Phys. Rep. 231, 151 (1993).
- 3. Л. И. Галанина, Н. С. Зеленская, ЯФ **70**, 308 (2007) [Phys. Atom. Nucl. **70**, 283 (2007)].
- 4. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C 60, 044605 (1999).
- 5. Г. Е. Беловицкий *и др.*, ЯФ **72**, 1772 (2009) [Phys. Atom. Nucl. **72**, 1714 (2009)].
- 6. R. Raabe, A. A. Andreyev,...L.I. Galanina, N.S. Zelenskaya, Phys. Rev. C **67**, 4446021 (2003).
- 7. I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, et al., Phys. Rev. Lett. 55, 2676 (1985).

4 Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гаммаизлучений с использованием германиевых гамма-спектрометров».

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

5 Задача «Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы».

Интерес к получению нейтронных данных остается значительным, связанным в основном с потребностью данных при разработке ядерных реакторов нового поколения. Поэтому и получение нейтронных данных, их анализ и систематизация остаются актуальными. Были проведены расчеты и измерения с целью определения оптимальных условий для получения необходимых нейтронных данных для быстрых нейтронов на фотонейтронном источнике ускорителя ЛУЭ-8. Для решения задач по получению нейтронных данных при облучении объектов больших размеров медленными и тепловыми нейтронами проведены измерения потоков и геометрии выведенного пучка для разных коллиматоров. Были продолжены работы по описанию в едином подходе существующих нейтронных данных и поиску проявления магических и околомагических чисел в нейтронных сечениях.

6 Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер, 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 электронов, реальных и виртуальных фотонов»

За последние годы изучение электромагнитных взаимодействий ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии, России и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Это включало в себя прецизионное измерение сечений 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.

7 Задача «Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN»

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований протонпротонных и ядро-ядерных столкновений на пучках БАК, эксперименте ALICE при непосредственном активном участии российских институтов. Также представлены выполненные российскими институтами в 2018 г. работы по детекторным системам ТО, ФИТ, AD, которые относятся к зоне ответственности российских институтов: ИЯИ, МИФИ, КИ. Выполнение этих работ является необходимым условием полноправного участия российских учёных в физической программе эксперимента ALICE и возможности участвовать в модернизации детекторных систем супердетектора ALICE для проведения будущих экспериментов.

В комплексе детекторов установки ALICE важную роль играет стартовый времяпролетный и триггерный детектор Т0. Детектор размещён вблизи номинальной точки столкновения протонов или ионов и обеспечивает проведение измерений множественности рожденных частиц, мониторинг и определение светимости, определение момента столкновений пучков для вычисления времени пролета рожденных заряженных частиц, позволяет проводить диагностику пучков БАК и формирует триггерные сигналы LM уровня (нулевого уровня минус 1).

Получение экспериментальных данных по эмиссии заданного количества нейтронов и протонов позволяют оценить выходы вторичных ядер от ЭМД ядер ²⁰⁸Pb , которые имеют близкие ним отношения заряда к массе. К ним относятся ядра ^{205,206,207}Pb, ^{204,205,206,207}Tl, которые образуются в результате эмиссии нейтронов без эмиссии протонов и в результате эмиссии одного протона вместе с нейтронами. Некоторые из таких ядер, имея сечения образования в несколько раз превышающие сечения адронных взаимодействий ²⁰⁸Pb создают нежелательную локальную тепловую нагрузку на компоненты БАК, поэтому необходимы точные измерения их выходов. Такие измерения необходимы для подготовки работы БАК с увеличенной светимостью и проектирования будущего адронного коллайдера FCC-hh.

8 Задача «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)»

Физическая программа работ на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии — фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. Спонтанное нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. Уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 — 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе эффект частичного восстановления киральной симметрии может 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.

Исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер, также является одним из важных направлений на установке

ХАДЕС. 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 по 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 ХАДЕС является единственным спектрометром в мире, на котором исследуется 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.

ХАДЕС является единственным экспериментом в ГСИ, который будет получать экспериментальные данные на модернизированном ускорителе SIS18 в рамках объявленной программы ФАИР-фаза-0. В 2017 г. в ГСИ была утверждена программа дальнейших экспериментов на ХАДЕС на ускорителе SIS18 и было выделено пучковое время (88 смен) для проведения эксперимента Ag+Ag при энергии налетающих ядер серебра 1,65 А ГэВ (март 2019 г.) и для проведения экспериментов на пучке пионов (87 смен) в 2020г.

После запуска ускорителя SIS100 комплекса ФАИР установка ХАДЕС будет перемещена на этот комплекс и будет первой установкой для проведения ядро-ядерных экспериментов на этом ускорителе при энергиях до 11 А ГэВ. При столкновении тяжелых ядер в этой области энергий достигается максимальная плотность ядерной материи (порядка $7\rho_0$) и возможно наблюдение эффектов, связанных с фазовым переходом первого рода между адронной и партонной или кварковой материей. Экспериментальное открытие этих явлений было бы важным прорывом в изучении свойств ядерной материи в экстремальном сверхплотном состоянии.

9 Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI»

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке СВМ

(Compressed Baryonic Matter) на ускорительном комплексе ФАИР направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи в сверхплотном состоянии, которая образуется в ядро-ядерных столкновениях при энергиях ядер до 11 АГэВ. В отличие от экспериментов на коллайдерах RHIC и LHC, где фазовая диаграмма КХД изучается при очень высоких температурах и очень низкой барионной плотности, программа экспериментов на установке СВМ будет направлена исследования экстремальных состояний ядерной материи и фазового перехода к кварк- глюонной плазме при высокой барионной плотности в ядро-ядерных столкновениях. Важнейшими направлениями будет поиск границы между фазами барионной и кварк-глюонной материей, поиск критической точки, поиск признаков начала восстановления киральной симметрии и многое другое.

Практически весь набор наблюдаемых величин, включая множественности заряженных частиц, распределения частиц по поперечным импульсам, пособытийные флуктуации и др., изучается в ядро-ядерных реакциях в зависимости от центральности столкновений, которая характеризует плотность энергии, достигаемой в этих реакциях. Для определения коллективных потоков идентифицированных адронов, которые несут информацию о состоянии ядерной материи в процессе столкновения, необходимо также пособытийное определение плоскости реакции. Для определения центральности и угла плоскости реакции в эксперименте СВМ будет использоваться передней адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectle Spectator Detector.

ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации CBM за разработку, изготовление, тестирование и подготовку переднего адронного калориметра (PSD - Projectle Spectator Detector) к экспериментам на установке CBM.

10 Задача «Эксперимент MPD/NICA»

Физическая программа мегапроекта НИКА (Дубна, Россия) направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи с большой плотностью, в частности фазовой диаграммы ядерной материи и возможных фазовых переходов. С этой целью создается комплекс сверхпроводящих ускорительных колец, на котором будут производиться столкновения тяжелых ионов при энергиях $\sqrt{s} = 4 - 11$ ГэВИзучения этих столкновений будет проводиться Многоцелевым Детектором (MPD). Главной целью MPD является изучение свойств плотной горячей ядерной материи, например, исследование фазовых переходов, смешанной фазы, выявление уравнения

состояния ядерной материи. Эксперимент MPD обладает близким к 4 π аксептансом. Детектор разработан для детектирования заряженных адронов, электронов, фотонов, получаемых при столкновениях тяжёлых ионов в области энергий и при высокой светимости коллайдера NICA. Одним из важнейших детекторов установки MPD является передний адронный калориметр FHCal, предназначенный для измерения геометрии столкновения тяжелых ионов, а именно, центральности и ориентации плоскости реакции. ИЯИ РАН отвечает за создание переднего адронного калориметра FHCal в сотрудничестве с Лабораторией физики высоких энергий, ЛФВЭ ОИЯИ. В 2018 г. ИЯИ РАН продолжал работу по созданию переднего адронного калориметра и подготовке к будущим экспериментам на установке MPD.

5. Задача «Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX»

Руководитель и исполнитель темы, д.ф.-м.н. в.н.с. ОЭФ, Пантуев В.С

Вся работа была связана с анализом накопленных данных и написанием научных статей. В частности, асимметричные ядерные столкновения p + Al, p + Au, d + Au и 3He + Au при энергии 200 ГэВ, явились отличной лабораторией для понимания процессов рождения частиц и их взаимодействий в конечном состоянии. Получены распределения заряженных адронов в широком интервале по псевдо-быстроте как функции центральности столкновений. Простая модель провзаимодействовавших кварков удивительно успешно описала весь набор данных. Были также получены значения эллиптического потока. Эти измерения устанавливают существенные ограничения на модели эмиссии частиц.

Проведен анализ данных по рождению пи- и эта-мезонов в столкновениях Cu+Au. Обнаружено существенное подавление нейтральных мезонов относительно результатов в p+p взаимодействиях, нормированное на число нуклон-нуклонных столкновений. В центральных столкновениях подавление аналогично Au+Au с близким ядерным перекрытием. Отношение эта/пи - мезонов, измеренное как функция поперечного импульса, является постоянным при параметризации по m_T до $p_T=2$ $\Gamma \ni B/c$. Асимптотическое значение является постоянным и согласуется с Au+Au и p+p и не показывает какой-либо значительной зависимости от типа столкновения. Аналогичные результаты были получены в адрон-адрон, адрон-ядро и ядро-ядро столкновениях.

Были измерены прямые фотоны для p_T <5 ГэВ/с с центральностью 0% - 40% в центральной области быстрот для столкновений Cu + Cu при энергии 200 ГэВ. Вклад e + e – был оценен из квазиреальных прямых виртуальных фотонов был определен как избыток по сравнению с известным адронными вкладами. Явное усиление фотонов относительно p + p столкновений наблюдается для p_T <4 ГэВ/с. Спектры по p_T аналогичны соответствующим данным p_T в p_T Аи столкновениях при том же числе нуклонов участников. Наклоны экспонент после вычитания базовой линии из p_T p_T столкновений составляют p_T (syst) p_T p_T

Были измерены поперечные односпиновые асимметрии J/ψ мезонов, рожденные в pp столкновениях в прямом и обратном интервале по быстроте в зависимости от поперечного импульса (p_T) и переменной Фейнмана (x_F). Данные были получены в 2015 году для столкновений p + p, p + Al и p + Au с поперечно поляризованными протонными пучками при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. При этой энергии столкновений односпиновые асимметрии для тяжелых частиц в p + p-столкновениях обеспечивают доступ к спин-

зависимому распределению глюонов и корреляции внутри нуклона, такие как корреляционные функции глюона Цю-Стермана и триглюона. Столкновения протон + ядро предоставляют отличную возможность изучить ядерные эффекты. Данные указывают на положительную асимметрию на уровне двух стандартных отклонений в р + р

столкновениях в интервале 2 ГэВ / с <p_T <10 ГэВ / с в обратной области быстрот и отрицательных асимметрий уровне при двух стандартных отклонений в р + Au для р_T <2 ГэВ/с, в то время как в столкновениях р + Al асимметрии согласуются с нулем в измеряемом диапазоне.

6. Задача «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами. Получение данных о энергиях виртуального рр и пр синглетного состояния на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ».

Руководитель: Евгений Сергеевич Конобеевский, зав.лаб., кфмн

Основные исполнители:

Мордовской М.В, внс, кфмн,

Зуев С.В., снс, кфмн

Исполнители

Поташев С.И., снс, кфмн,

Бурмистров Ю.М., мнс,

Каспаров А.А., мнс,

Мицук В.В., стажер-исслед,

Афонин А.А., стажер-исслед.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В 2018 г. заново проанализированы [1] все данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученные с 1999 г. в реакциях nd и dd-развала (в том числе и данные полученные ранее в Лаборатории атомного ядра ИЯИ [2,3]). Серьезные расхождения между экспериментальными данными, полученными в различных работах, можно объяснить влиянием 3N-сил зависящих от скорости разлета nn-пары и заряженного фрагмента. Показано, что анализируемые данные можно аппроксимировать плавной кривой зависимости длины рассеяния от параметра R, определяющего расстояние разлета фрагментов за фиксированное время. Для различных экспериментов параметр R может значительно отличаться. Ясно, что чем больше значение параметра R, тем больше скорость разлета фрагментов, тем быстрее фрагменты покидают область действия 3N-сил, и тем меньше должно быть их влияние на параметры nn-взаимодействия, извлекаемые из эксперимента. Наибольшее значение параметра R было в нашем эксперименте nd-pnn при энергии нейтронов 40 МэВ. Имеет смысл проведение этого эксперимента при большей энергии, например 60 МэВ.

1. Определение низкоэнергетических параметров пп-взаимодействия в реакции

$nd \square pnn$

В 2018 г. проведена подготовка и проведен эксперимент на нейтронном канале РАДЭКС при энергии нейтронов до 200 МэВ. В эксперименте была использована активная дейтериевая мишень (с регистрацией протона в реакции nd-pnn) и два детектора вторичных нейтронов. Проведенное предварительное моделирование, рис. 1, позволило определить оптимальные параметры установки (диапазоны энергии и углы регистрации) для получения данных о длине рассеяния при энергиях первичных нейтронов 40-80 МэВ. Моделирование реакции показало, что в определенных кинематических условиях при регистрации pp-пары и нейтрона под углами вылета NN-пар в квазибинарной реакции $d + {}^2H \rightarrow (nn)^S + (pp)^S$, форма энергетического (временного) спектра нейтрона зависит от энергии виртуального синглетного состояния nn-пары [14], а, следовательно, согласно

$$\frac{1}{a_{\rm nn}} = -\left(\frac{m_n E_{\rm nn}}{\hbar^2}\right)^{1/2} - \frac{1}{2} r_{\rm nn} \frac{m_n E_{\rm nn}}{\hbar^2} + \dots$$

от значения пп-длины рассеяния.

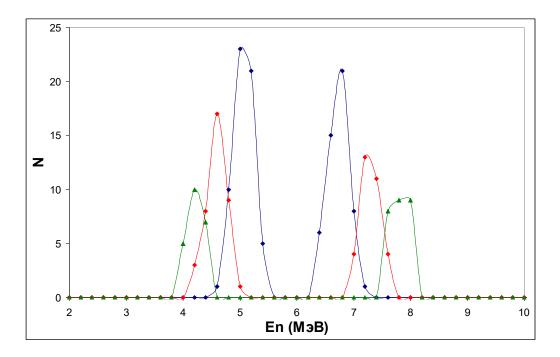


Рисунок 1 - Моделированный спектр вторичных нейтронов при следующих условиях эксперимента: E_0 =60 MэB, \Box_{n1} =58°, \Box_{n2} =62°. Кривые соответствуют различным значениям энергии синглетного уровня: синяя – E_{nn} =0.07±0.01, красная – E_{nn} =0.15±0.01, зеленая – E_{nn} =0.25±0.01.

Разработанная в рамках проекта программа позволяет по энергиям, импульсам и углам вылета двух вторичных нейтронов восстанавливать энергию первичного нейтрона, вызывающего реакцию развала дейтрона. На рис. 2. показан спектр первичных нейтронов,

полученный для части данных в эксперименте 13-18 ноября 2018 г. Видно, что достаточное большое количество данных получено при энергии первичных нейтронов 40-80 МэВ.

В настоящее времени проводится обработка полученных данных: отбор данных отвечающих нейтронным событиям в детекторах (на основе $n\gamma$ -разделения), получения данных о времени пролета нейтронов, и получение на основе этих данных энергетических спектров нейтронов в области ВКС. Как было показано ранее [16] при определенных кинематических условиях (учтенных в эксперименте) значение длины рассеяния и энергии виртуального nn-состояния могут быть получены из формы энергетического спектра вторичных нейтронов. Полученные данные при энергии нейтронов 60-80 МэВ будут сравнены с данными, полученными при меньших энергиях, и позволят проверить гипотезу о влиянии 3N-сил на параметры nn-взаимодействия, извлекаемые из эксперимента.

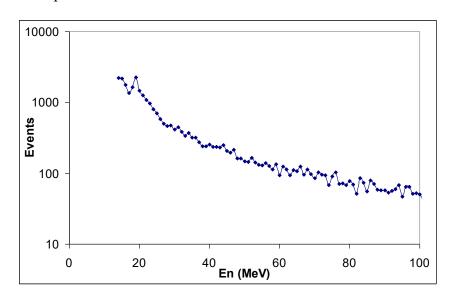


Рисунок 2 - Восстановленный спектр первичных нейтронов, вызвавших реакцию $nd\Box pnn$

2. Определение энергии рр- синглетного виртуального уровня

Исследование и сравнение nn и pp взаимодействий являются важными и в связи с проверкой гипотезы о зарядовой симметрии ядерных сил. Нарушение зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил, т.е. различие ядерных nn- и pp-взаимодействий, проявляется, в частности, в различии низкоэнергетических характеристик nn и pp-взаимодействия — синглетных длин рассеяния и энергий виртуального 1S_0 уровня. Протонпротонная длина рассеяния находится из экспериментов по свободному pp-рассеянию (a_{pp} = -17.3 ± 0.4 Фм); ее погрешность связана главным образом с модельно-зависимой процедурой исключения электромагнитной компоненты pp-взаимодействия. Можно предположить, что, как отмечено выше, значения протон-протонной длины рассеяния a_{pp} и энергии виртуального 1S_0 уровня E_{pp} , извлеченные из экспериментов с тремя или четырьмя частицами в конечном состоянии будут отличаться от значений, полученных в

свободном рр-рассеянии.

Для проверки этого предположения в ИЯИ РАН совместно с НИИЯФ МГУ ведутся работы по исследованию реакций $d + {}^{1}\text{H} \rightarrow p + p + n, d + {}^{2}\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ и $p + {}^{2}\text{H} \rightarrow p + p + n$. Во всех этих реакциях в промежуточном состоянии возможно взаимодействие pp-пары с нейтроном (или nn-парой), что может отразиться на величинах извлекаемых низкоэнергетических параметров (a_{pp} и E_{pp}).

В 2018 г. проведено кинематическое моделирование реакции $d+^1\mathrm{H} \to p+p+n$ с использованием комплекса программ, разработанного в ИЯИ РАН [16, 17]. В ходе моделирования реакции были подобраны параметры экспериментальной установки (углы установки детекторов нейтронов и протонов, а также их расстояния от мишени, находящейся в вакуумной камере). Проведено моделирование прохождения протонов через систему ΔE - и E-детекторов. В результате моделирования получены спектры и ΔE -E-диаграммы детектируемых протонов для последующего сравнения с экспериментальными данными.

Выполнена подготовительная работа для проведения эксперимента, в том числе, отобраны и прокалиброваны кремниевые детекторы для регистрации протонов с соответствующей условиям моделирования толщиной и детектор для регистрации нейтронов на основе жидкого сцинтиллятора. Установка для регистрации в совпадении протона и нейтрона показана на рис. 3.

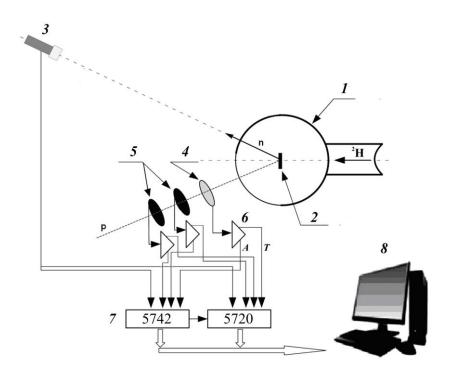


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки для регистрации в совпадении протона и нейтрона: I – камера рассеяния, 2 – мишень, 3 – нейтронный детектор, 4 – кремниевый $\Box E$ -детектор, 5 – кремниевые E-детекторы, 6 – предусилители кремниевых детекторов с амплитудными (A) и временными (T) выходами, 7 – цифровые сигнальные процессоры

Проведены тестовые измерения системы сбора и обработки информации на основе цифровых сигнальных процессоров DPP 5720 и DPP 5742, получены с амплитудные и временные спектры с детекторов. В декабре 2018 г. получены предварительные экспериментальные данные для реакции dp □ ppn при энергии первичных дейтронов 15 МэВ на циклотроне У-120 НИИЯФ МГУ. В настоящее время ведется обработка полученных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. И. Кукулин, В. М. Лебедев, М. В. Мордовской, В. Н. Померанцев, А. В. Спасский, ЯФ, 2018, Т. 81, № 5, с. 555–563.

Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, М. В. Мордовской, И.М. Шарапов, ЯФ, 2013, Т. 76, № 11, с. 1479-1483.

E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky, Few-Body Systems, 58 (2017) 017-1272-8.

R. Machleidt, F. Sammarruca and Y. Song, Phys. Rev. C 53, R1483 (1996).

V. G. J. Stoks et al., Phys. Rev. C 49, 2950 (1994).

Siepe et al., Phys. Rev. C 65, 034010 (2002).

X. C. Ruan et al., Phys. Rev. C 75, 057001 (2007).

Deltuva et al., Phys. Rev. C 72, 054004 (2005).

G. A. Miller, B. M. K. Nefkens and I. Slaus, Phys. Rep. 194, 1 (1990).

Dumbrajs, R. Kohn, H. Pilkuhn et al., Nucl. Phys. B 216, 277 (1983).

D. E. Gonzales Trotter, F. Salinas, Q. Chen et al., Phys. Rev. Lett. 83, 3798 (1999).

R. Machleidt, Adv. Nucl. Phys. 19, 189 (1989).

D. E. Gonzales Trotter, F. Salinas, W. Tornow et al., Phys. Rev. C73, 034001 (2006).

V. Huhn, L. Watzold, Ch. Weber et al., Phys. Rev. C63, 014003 (2000).

Faessler, V. I. Kukulin, I. T. Obukhovsky, V. N. Pomerantsev, J. Phys. G 27, 1851 (2001).

С. В. Зуев, А. А. Каспаров, Е. С. Конобеевский, Изв. РАН. Сер. физ. Т. 81, 753 (2017).

Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. С. 527.

7. Задача «Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях»

Руководитель: Евгений Сергеевич Конобеевский, зав. лаб., кфмн

Основные исполнители

Заварзина В.П., снс, кфмн

Зуев С.В., снс, кфмн

Мордовской М.В., внс

Каспаров А.А., мнс.

Исполнители

Бурмистров Ю.М., мнс

Курлович А.С., стажер-исследователь

Мицук В.В., стажер-исслед.

Афонин А.А. стажер-исслед.

Проверка экспериментальной методики исследования реакции

$$^{6}\text{He} + {^{2}\text{H}} \rightarrow {^{6}\text{Li}} + n + n$$

Для определения энергии nn квазисвязанных состояний в гало-ядрах запланировано исследование реакции передачи кора на пучках радиоактивных нейтроноизбыточных ядер. При исследовании реакций будет использован пучок 6 He (11 Li) с энергией ~ 5 –10 МэВ/нуклон и тонкая мишень из дейтерированного полиэтилена. В эксклюзивном эксперименте будут регистрироваться как заряженная частица (6 Li, 11 Be), так и один или два нейтрона. Углы регистрации должны соответствовать кинематике двухчастичной реакции с вылетом динейтрона и заряженной частицы. Заряженные частицы (6 Li, 11 Be) будут регистрироваться телескопом кремниевых детекторов с возможностью разделению событий по типу частицы, используя $\Delta E - E$ диаграммы ионизационных потерь. Энергия заряженных частиц будет найдена по суммарной потере энергии в телескопе. Нейтроны будут детектироваться жидкими сцинтилляторами, с возможностью n- γ разделения по форме сигнала, а их энергия будет определяться по времени пролета на базе 1-2 м. относительно стартового сигнала с кремниевого детектора.

В эксперименте будут получены времяпролетные спектры нейтронов, регистрируемых в совпадении с заряженными частицами. Из анализа формы временных спектров нейтронов будут определены энергии *пп*-квазисвязанных состояний. На основе определения этих энергий (и в случае их отличия от значений для свободных *пп*-пар) будут проведены оценки эффективного притяжения, возникающего между вмртуальными нуклонами в поле третьей частицы (кора).

В ноябре 2018 года проверена возможность регистрации и идентификации нейтронов, вылетающих в результате взаимодействия нейтроноизбыточных ядер с мишенями на пучке радиоактивных ядер ACCULINA ускорителя U-400М ФЛЯР ОИЯИ. В качестве детектора нейтронов использовался сцинтиллятор стильбен с размерами 50*50 мм (диаметр, высота), просматриваемый ФЭУ Хамаматсу.

Детектор устанавливался либо на оси пучка (рис. 4б) после выходного фланца - расстояние от выходного окна (Fe) до нейтронного детектора 0.04 м, либо в стороне от оси пучка (см. рис. 4а). Сигналы с нейтронного детектора являлись стробовыми для цифрового сигнального процессора DPP DT5742, на который также подавались сигналы с детекторов пучка D1, D2,D3.

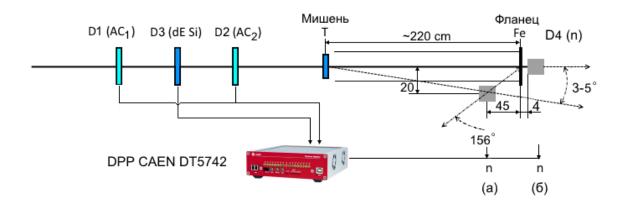


Рисунок 4 - Схема расположения детекторов в эксперименте

Осциллограммы всех сигналов записывались и затем обрабатывались в режиме "off line". Доступный диапазон записи по времени ~200 нс (1024 канала с шагом×0.2 нс). Оцифрованные сигналы записывались в буферную память, а по ее заполнению передавались в основной компьютер. Запуск регистрации осциллограмм поданных сигналов происходил от срабатывания внутреннего дискриминатора TR0 по сигналу нейтронного детектора D4. В данном эксперименте были использованы логические сигналы от детекторов D1-D3. В результате была получена информация об амплитуде и форме сигнала нейтронного детектора и временах возникновения сигналов в детекторах D1-D3.

Информация о форме сигнала нейтронного детектора, позволяет для каждого события определять параметр разделения по форме импульса (PSD). При этом нейтронные события в детекторе D4 однозначно отделяются от событий, вызванных другими частицами (гамма-квантами).

Отбор событий может быть либо только по срабатыванию нейтронного детектора (без отбора), либо в совпадении с детекторами заряженных частиц, установленными на оси пучка в ионопроводе (D1+D2+D3) – "отобранные события".

В таблице 1 представлены параметры Run-ов и полученные результаты

Таблица 1 - Параметры Run-ов и их результаты

N	Дли т- нос ть	Положе ние D4	Мише	Энерг ия пучка , МэВ/	D4 без D123	строб	a	строб "И" D1+D2 +D3		4 со обом	γ/c1 p	n/ct	стр/
	Run , мин			A	Всего событ ий	γ	n		γ	n		1	
9	53	на оси	есть	18	4672	358 6	10 86	1071	47 9	59 2	0.4 5	0.55	20.2
1 0	480	вне	нет	18	24600	246 00	0	0	-	-	-	-	-
1 1	39	на оси	есть	18	2016	146 1	55 5	350	84	26 6	0.2 4	0.76	8.97
1 2	20	вне	нет	18	1016	101 4	2	0	-	-	-	-	-

Далее рассмотрим данные полученные в нескольких Run-ax.

Данные полученные в Run-10 (мишень есть, D4-вне пучка)

Начнем рассмотрение результатов с данных, полученных в Run-10. В этом измерении детектор D4 располагался вне оси пучка (рис. 4, позиция (а)). Длительность измерения – 480 мин. На рис.5, показана двумерная диаграмма A-PSD сигналов детектора D4, полученная в режиме без совпадения с заряженными частицами (детекторы D1-D3).

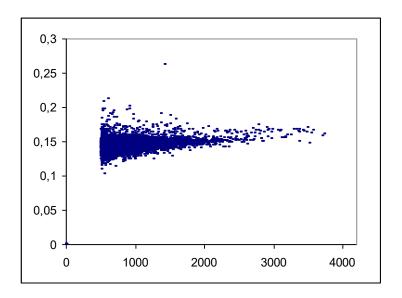


Рисунок 5 - Двумерная диаграмма A-PSD

Видно, что в широком диапазоне амплитуд (A – по оси X) параметр PSD имеет величину PSD \sim 0.15. Калибровка детектора, проведенная ранее с использованием гамманейтронного Pu-Be источника, показала, что такое значение соответствует регистрации гамма-квантов. На рис. 6. показан соответствующий спектр параметра PSD.

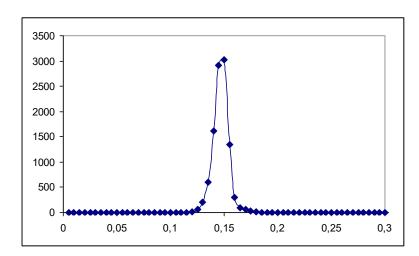


Рисунок 6 - Спектр PSD (пик при PSD~0.15 соответствует гамма-квантам)

При включении совпадений с заряженными частицами (D1+D2+D3) не наблюдается совпадений. Таким образом, из рассмотрения данных Run-10 можно заключить, что:

- 1. В детекторе, расположенном сбоку от оси пучка в данном измерении не зарегистрированы нейтроны.
- 2. Зарегистрированные в детекторе гамма-кванты, не связаны с прохождением заряженных частиц через детекторы D1-D3.

Данные полученные в Run-9 (мишень есть, D4-на оси пучка)

В этом измерении детектор D4 располагался <u>на оси</u> пучка (рис. 4, позиция (б)). Длительность измерения сотавила 53 мин. На рис.7, показана двумерная диаграмма A-PSD сигналов детектора D4, полученная в режиме без совпадения с заряженными частицами (детекторы D1-D3).

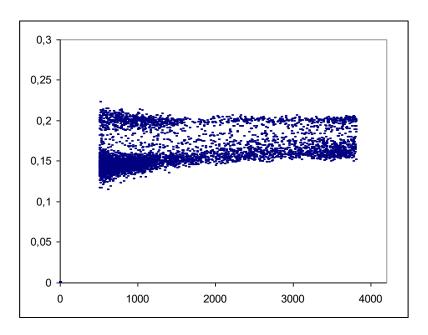


Рисунок 7 - Двумерная диаграмма A-PSD

Видно, что в сравнении с аналогичным рисунком для Run-10, здесь кроме локуса отвечающего гамма-квантам (PSD~0.15), есть и локус отвечающий нейтронам (PSD~0.20). Это же видно и на рис. 8, представляющем спектр PSD.

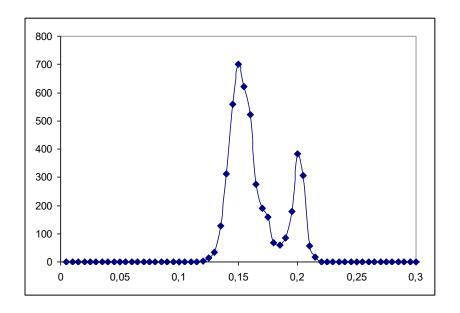


Рисунок 8 - Спектр PSD нейтронного детектора в режиме "без совпадений"

Здесь левый пик соответствует гамма-квантам, а правый нейтронам. Видно, что отношение числа зарегистрированных гамма к числу нейтронов составляет 3:1. Однако это соотношение изменяется (1:1.5) при включении совпадения с заряженными частицами пучка (рис. 9).

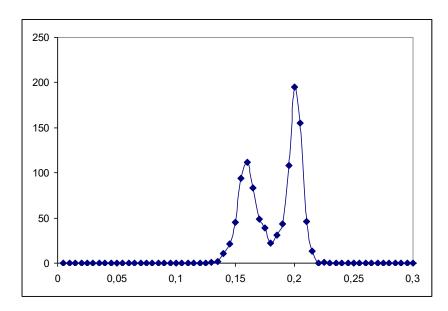


Рисунок 9 - Спектр PSD нейтронного детектора в режиме "совпадение с заряженными частицами пучка"

Таким образом, из рассмотрения данных Run-9 можно заключить, что:

1. Отношение числа зарегистрированных нейтронов к гамма-квантам возрастает

- при введении совпадения с заряженными частицами, проходящими через детекторы D1-D3 (см. данные Табл. 1).
- 2. В детекторе, расположенном на оси пучка зарегистрированы как гамма-кванты, так и нейтроны.
- 3. Зарегистрированные нейтроны в основном связаны с частицами пучка.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЕАНСА

- 1. Детектор стильбена достаточно хорошо показал себя в качестве детектора нейтронов при установке его на оси пучка
- 2. При установке вне оси, по крайней мере в положении (а), показанном на схеме Рис.4, детектор регистрировал только гамма-кванты, не связанные с заряженными частицами проходящими через детекторы D1-D3.
- 3. В положении на оси пучка (Рис. 4, позиция (б)) детектор D4 регистрировал как нейтроны, так и гамма-кванты. При этом стробирование заряженными частицами приводило к увеличению доли зарегистрированных нейтронов.
- 4. Таким образом, можно заключить, что в основном зарегистрированные нейтроны связаны с заряженными частицами, проходившими через детекторы D1-D2-D3.

Моделирование реакции неупругого рассеяния альфа-частиц для исследования кластерной структуры возбуждённых состояний ⁹Ве

Для определения вклада кластерных конфигураций (${}^8\text{Be} + n$, $\alpha + \alpha + n$, ${}^5\text{He} + \alpha$) в структуру ${}^9\text{Be}$ предлагается исследование неупругого рассеяния альфа-частиц на кластерах ядра ${}^9\text{Be}$. Результаты проведенного кинематического моделирования реакций ${}^9\text{Be}(\alpha,\alpha'n)X$ и ${}^9\text{Be}(\alpha,\alpha'\alpha)X$ показывают, что регистрация рассеянной альфа-частицы в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния ${}^9\text{Be}$ позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний.

Ядра бериллия привлекают внимание экспериментаторов и теоретиков из-за их кластерной структуры. Хорошо известно, что основное состояние 8 Be является несвязанным с энергией 92 кэВ и распадается на две альфа-частицы за время порядка 10^{-16} с [8]. Единственным стабильным изотопом бериллия является изотоп 9 Be. Дополнительный нейтрон действует как ковалентная частица между центрами альфа-частиц, увеличивая стабильность структуры ядра 9 Be. Вместе с трехчастичной структурой 9 Be рассматриваются также двухчастичные конфигурации 8 Be + n и 5 He + α , которые могут играть важную роль для возбужденных состояний 9 Be.

Несмотря на то, что исследования кластерной структуры ⁹Ве ведутся в течение длительного времени, необходимость получения количественных данных о вероятности

развала возбужденных состояний через различные кластерные каналы имеется до сих пор [8-10]. Для определения кластерной структуры возбужденных состояний 9 Ве предлагается исследование неупругого рассеяния альфа-частиц на кластерах ядра 9 Ве с регистрацией, как рассеянной альфа-частицы, так и частицы от развала возбужденных состояний 9 Ве. Поскольку пороги развала через каналы 8 Ве + n, α + α + n и 5 Не + α достаточно малы (рис. 10), многие возбужденные состояния 9 Ве могут разваливаться с испусканием нейтронов и альфа-частиц.

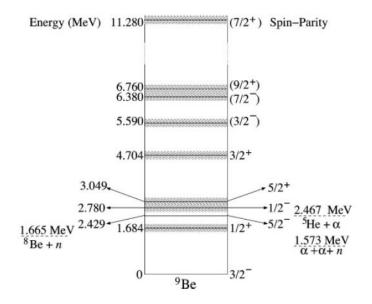


Рисунок 10 - Энергетические уровни и пороги развала ⁹Be.

Моделирование и эксперимент

Для кинематического моделирования реакции неупругого рассеяния использована программа кинематического моделирования ядерных реакций [11], в которой события с произвольно выбранными (или частично определенными параметрами, например, углами или энергиями некоторых вторичных частиц) выбираются в соответствии с критерием соблюдения законов сохранения энергии и импульса. В результате работы программы получается массив выходных параметров (энергий и углов вылета), соответствующих определенной реакции.

На первом этапе моделируется двухчастичная реакция неупругого рассеяния альфа-частицы на ядре ${}^9\mathrm{Be}$ с возбуждением определенного низколежащего уровня E^* . Выбирая угол регистрации альфа-частицы \Box_α , мы фиксируем энергию альфа-частицы под этим углом E_α . Это значение энергии вторичной альфа-частицы использовалось в качестве входного параметра при моделировании реакций с тремя и четырьмя частицами в конечном состоянии.

$$\alpha + {}^{9}\text{Be} \rightarrow \alpha' + {}^{9}\text{Be}^*$$
: ${}^{9}\text{Be}^* \rightarrow {}^{5}\text{He} + \alpha \rightarrow \alpha + \alpha + n$:

$$\alpha + {}^{9}\text{Be} \rightarrow \alpha' + {}^{9}\text{Be}^{*}; {}^{9}\text{Be}^{*} \rightarrow {}^{8}\text{Be} + n \rightarrow \alpha + \alpha + n;$$

 $\alpha + {}^{9}\text{Be} \rightarrow \alpha' + {}^{9}\text{Be}^{*}; {}^{9}\text{Be}^{*} \rightarrow \alpha + \alpha + n.$

Было проведено кинематическое моделирование ${}^{9}\text{Be}(\alpha,\alpha'\alpha)X$ для различных возбужденных уровней ${}^{9}\text{Be}$ и каналов развала. На рис. 11 показаны энергетические спектры распадных альфа-частиц, вылетающих в интервале углов $-40\Box\pm10\Box$ (отрицательные углы соответствуют углу вылета слева от оси пучка) от развала ${}^{9}\text{Be}$ с уровнем 4.704 МэВ для различных каналов распада. Параметры моделирования: энергия пучка $E_{\alpha}=30$ МэВ, углы регистрации вторичных частиц $\Box_{\alpha'}=90\Box$ и $\Box_{\alpha}=-40\Box\pm10\Box$. Видно, что поведение моделированного энергетического спектра распадных альфа-частиц для конфигурации ${}^{5}\text{He}+\alpha$ существенно отличается от поведения спектров для конфигураций ${}^{8}\text{Be}+n$ и $\alpha+\alpha+n$. Однако развал через последние две конфигурации приводит к почти одинаковым энергетическим спектрам.

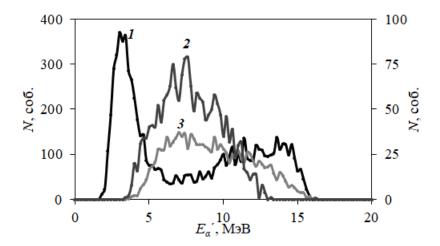


Рисунок 11 - Энергетические спектры распадных альфа-частиц в реакции ${}^9{\rm Be}(\alpha,\alpha'\alpha)X$ для возбужденного уровня 4.704 МэВ ядра ${}^9{\rm Be}$ и различных каналов развала: $1-{}^5{\rm He}+\alpha$; $2-{}^8{\rm Be}+n$; $3-\alpha+\alpha+n$.

Также было выполнено моделирование неупругого рассеяния альфа-частиц с регистрацией рассеянных альфа-частиц и нейтронов. На рис. 12 показан моделированный энергетический спектр нейтронов, вылетающих в интервале углов $\Box_{\alpha} = -40 \Box \pm 10 \Box$ от развала ядра 9 Ве с возбужденным уровнем 4.704 МэВ для различных каналов распада. Угол регистрации рассеянной альфа-частицы $\Box_{\alpha'} = 80^{\circ} \pm 1 \Box$, энергия пучка $E_{\alpha} = 30$ МэВ. Видно, что регистрация нейтронов дает возможность различить развал 9 Ве через каналы 8 Ве + n и α + α + n.

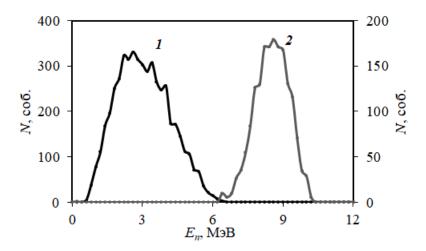


Рисунок 12 - Моделированные энергетические спектры нейтронов в реакции ${}^{9}\text{Be}(\alpha, \alpha' n)X$ для возбужденного уровня 4.704 МэВ ядра ${}^{9}\text{Be}$ и каналов развала: $1 - \alpha + \alpha + n$; $2 - {}^{8}\text{Be} + n$.

Предварительные измерения проводились в инклюзивном и эксклюзивном вариантах эксперимента по квазисвободному рассеянию дейтронов на кластерах ядра 9 Ве. В экспериментах использовался пучок дейтронов с энергией 15 МэВ НИИЯФ МГУ. Для инклюзивного эксперимента 9 Ве(d,d)X (с регистрацией одного дейтрона) получен энергетический спектр дейтронов, рассеянных от 9 Ве при $\Box_{d} = 60 \Box$ (рис. 13). Энергии возбужденных уровней 9 Ве указаны на рис. 10.

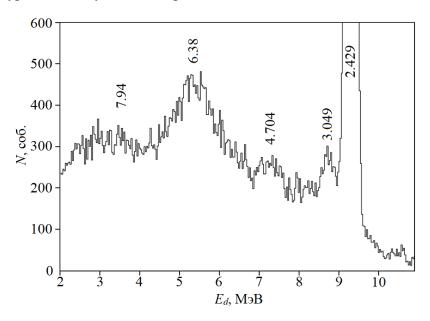


Рисунок 13 - Энергетический спектр дейтронов, рассеянных на ядре 9 Ве при $\Box_{d} = 60 \Box$.

Проведено кинематическое моделирование реакций ${}^{9}\text{Be}(\alpha,\alpha'n)X$ и ${}^{9}\text{Be}(\alpha,\alpha'\alpha)X$ для различных возбужденных уровней и различных каналов развала ядра ${}^{9}\text{Be}$. Результаты моделирования показывают, что регистрация рассеянной альфа-частицы в совпадении с

частицей от развала определенного возбужденного состояния 9 Ве позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний. Начато исследование кластерной структуры 9 Ве в инклюзивном и эксклюзивном эксперименте на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ. Получены предварительные данные об энергетических спектрах и дифференциальных сечениях d— 9 Ве рассеяния для некоторых возбужденных состояний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. V. T. Voronchev, V. M. Krasnopol'sky and V. I. Kukulin, J. Phys. G 8, 649 (1982).
- 2. M. V. Zhukov et al., Phys. Rep. 231, 151 (1993).
- 3. Л. И. Галанина, Н. С. Зеленская, ЯФ 70, 308 (2007) [Phys. Atom. Nucl. 70, 283 (2007)].
- 4. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C 60, 044605 (1999).
- 5. Г. Е. Беловицкий и др., ЯФ 72, 1772 (2009) [Phys. Atom. Nucl. 72, 1714 (2009)].
- 6. R. Raabe, A. A. Andreyev,...L.I. Galanina, N.S. Zelenskaya, Phys. Rev. C 67, 4446021 (2003).
- 7. I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, et al., Phys. Rev. Lett. 55, 2676 (1985).
- 8. T.A.D. Brown, P. Papka, B.R. Fulton, et al. Decay studies for states in 9Be up to 11 MeV: Insights into the $n+^8$ Be and $\alpha+^5$ He cluster structure // Phys. Rev. C76, (2007) P.054605(1–8).
- 9. Y. Hirayama, T. Shimoda, H. Miyatake, et al. Unexpected spin-parity assignments of the excited states in ⁹Be // Phys. Rev. C91 (2015) P.024328(1–14).
- 10. A.S. Denikin, S.M. Lukyanov, N.K. Skobelev, et al. Inelastic Scattering and Clusters Transfer in 3,4He + 9Be Reactions // Physics of Particles and Nuclei Letters. 12 (2015) 703–712.
- 11. С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский. Математическое моделирование малонуклонных экспериментов с тремя и более частицами в конечном состоянии // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т.81. no 6. С.753–757.

8. Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров».

Научный руководитель: А.В.Андреев, гнс, дхн.

Основные исполнители

Зуев С.В., снс, кфмн
Бурмистров Ю.М., мнс
Мордовской М.В, внс, кфмн
Афонин А.А. стажер-исслед.

Исполнители

Поташев С.И., снс, кфмн Сабинин С.Л.

Тишин В.В.

Работы по данной теме проводились на созданном ранее активационно-измерительном комплексе, включающем W-Ве-фотонейтронный источник нейтронов на базе линейного ускорителя электронов и низкофоновый гамма-спектрометр. Источник обеспечивает поток тепловых нейтронов порядка 10^7-10^8 нейтрон/см 2 -с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения. Комплекс включает низкофоновую камеру с пассивной защитой, гамма спектрометр на основе детектора из особочистого германия и систему регистрации, сбора и обработки информации с детектора. Текущий вариант защиты обеспечивает значение скорости счета фона менее 3 имп/с в диапазоне энергий регистрации гамма-квантов 100-2500 кэВ при эффективности регистрации 100%. Наличие активационно-измерительного комплекса позволяет решать различные задачи с использованием гамма-активационного (ГАА) и нейтронно-активационного анализа (НАА).

В настоящей работе методом гамма-активационного анализа измерены выходы фотоядерных реакций с возбуждением изомерных состояний ядер кадмия и индия: 111 Cd $(\gamma, \gamma')^{111m}$ Cd, 113 In $(\gamma, \gamma')^{113m}$ In, 115 In $(\gamma, \gamma')^{115m}$ In при энергии фотонов 4 – 9 MэВ. Измерения проводились методом наведенной активности с использованием реальных и виртуальных фотонов [1]. Реальные фотоны (пучок тормозного излучения) были получены на линейном ускорителе ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Выход реакции с реальными фотонами измеряли, используя в качестве тормозной мишени вольфрамовый радиатор толщиной 0.4 мм, расположенный на расстоянии 7 см перед мишенью из Cd или In (рис. 14). При измерении выхода реакции с виртуальными фотонами (электронами) радиатор удалялся из пучка. Энергия электронов в обоих случаях была одинаковой. Диаметр электронного пучка на радиаторе или мишени составлял 8 мм, длительность импульса 3

мкс, частота повторения 50 Γ ц и ширина спектра (FWHM) около 0.5 МэВ, ток электронов ~ 1 мкА.

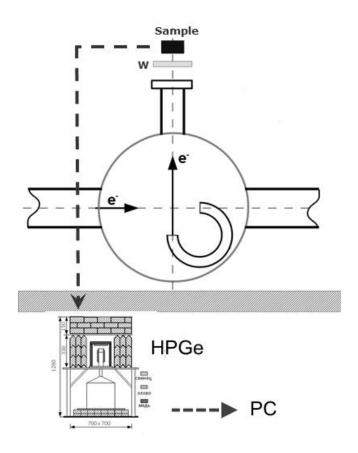


Рисунок 14 - Схема установки для изучения реакций фотовозбуждения

После облучения образцы помещали в низкофоновую камеру с детектором из сверхчистого германия (HPGe) объемом 130 см 3 [2]. Защита от фона состояла из свинца толщиной 15 см, меди (2 см) и олова (1 см). Общий уровень фонового счета в интервале энергий E=100-1000 кэВ не превышал 3 с $^{-1}$. Типичные активационные спектры показаны на рис. 15 и 16.

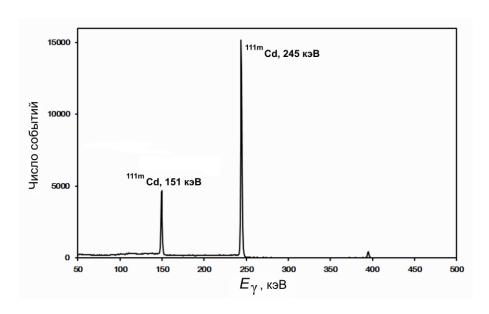


Рисунок 15 - Гамма-спектр активированного образца Cd. $E_{\gamma \max} = 9$ МэВ, время облучения – 1200 с, время измерения – 1200 с

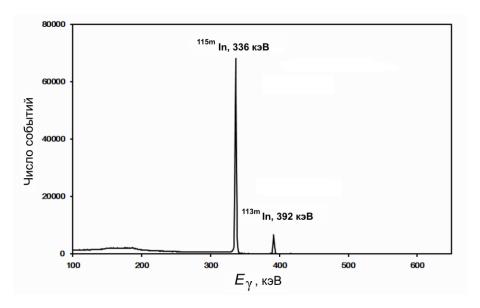


Рисунок 16 - Гамма-спектр активированного образца In. $E_{\gamma \max} = 7.5 \text{ M}{\circ}\text{B}$, время облучения -900 c, время измерения -1200 c

Результаты эксперимента представлены на рис. 17: $\sigma_q(E_{\gamma max})$ — сечение на эквивалентный фотон фотовозбуждения фотонами и $\sigma_e(E_e)$ — сечение фотовозбуждения электронами. Представленные значения индуцированных электронами сечений $\sigma_e(E_e)$ были скорректированы на вклад тормозного излучения, создаваемого в мишени движущимися электронами.

Экспериментальные точки, приведенные в работах [3, 4] соответствуют измерениям с урановой мишенью. Результат предыдущей работы [1] представляет собой усредненное по изученным ядрам Сd и In значение. Теоретические кривые представляют расчеты с использованием борновского приближения с плоскими (PWBA) [5] и искаженными (DWBA) [4] волнами, ограниченные вкладом E1.

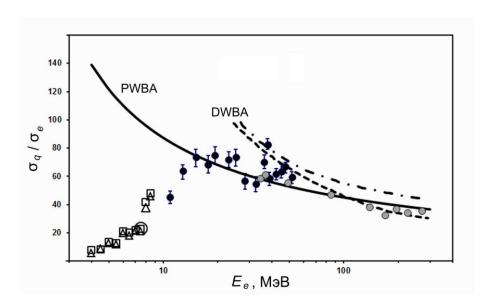


Рисунок 17 - Отношение $\sigma_q(E_{\gamma max})/\sigma_e(E_e)$, как функция энергии электронов. Экспериментальные данные: • и • – приведены в работах [3 и 4], \circ – из работы [1], \Box – 113m In (настоящая работа), Δ – 115m In (настоящая работа). Кривые: PWBA – результат вычисления по формуле (1), DWBA – результаты расчета методом искаженных волн [4].

Следует отметить, что отношение σ_q/σ_e имеет относительный характер и не требует абсолютного измерения. Поэтому его погрешности зависят главным образом от оценки потоков для нормализации. Эта процедура одинакова для разных изотопов, поэтому полученный результат носит общий характер.

Видно, что значения отношения для всех теоретических кривых увеличиваются к порогу, но экспериментальные точки показывают максимум вблизи $E_{\rm e} = 20$ МэВ. Чтобы объяснить это различие между теорией и экспериментом, можно предположить, что виртуальные фотоны имеют различную мультипольность в областях низких ($E_{\rm e} < 20$ МэВ) и высоких ($E_{\rm e} > 20$ МэВ) энергий. Возможно, это означает, что в дополнение к вкладу Е1 возбуждения Е2 могут играть важную роль вблизи порога.

Ранее нами изучался состав радиоактивных и нерадиоактивных элементов в пробах атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы. Пробы отбирались на специальные волокнистые фильтрующие материалы с последующим анализом осевших на них выпадений и аэрозолей. Было показано, что все рассмотренные фильтрующие материалы пригодны для определения содержания радиоактивных элементов в пробах. Однако в процессе нейтронно-активационного анализа (НАА) нерадиоактивных элементов в «чистых» образцах сравнения отмечены заметные следы Cl, K, Na и Mn. В данной работе проводится анализ расширенного набора различных фильтрующих материалов и рассматривается их пригодность для изучения содержания в них нерадиоактивных элементов методом НАА.

В настоящей работе в качестве фильтрующих материалов исследовались марля отбеленная, аналитический фильтрующий материал ЛФС-2, фильтрующие материалы типа ФП (Фильтры Петрянова) ФПП-15-1,5 из перхлорвиниловых волокон со средним диаметром 1.5 мкм нанесенных на марлевую подложку и ФПА-15 из волокон из диацетатцеллюлозы, кварцевые фильтры из кварцевых микроволокон (SiO₂) высокой чистоты и холстопрошивное фильтровальное полотно (ХПП).

Фильтры активировались в W-Be-фотонейтронном источнике потоком тепловых нейтронов $\sim 10^7$ нейтрон/см²·с в течение ~ 2 часов. Время измерения активационных успектров ~ 20 часов. НАА фильтров проводился для «чистых» образцов, не участвовавших в пробоотборе, которые являются образцами сравнения.

На рис. 18 представлены активационные спектры исследуемых материалов для короткоживущих изотопов. Времена облучения \sim 2 часов, выдержки \sim 4 минут, измерения \sim 30 минут. На рис. 19 также представлены активационные спектры исследуемых материалов, но для долгоживущих изотопов. Времена облучения \sim 2 часов, выдержки \sim 1 часа, измерения \sim 15–30 часов.

Общим результатом анализа спектров является присутствие в них заметных следов марганца (Mn-56), натрия (Na-24) и хлора (Cl-38). На спектрах с долгоживущими изотопами присутствуют также следы калия (K-40 и K-42). Для фильтров Петрянова наблюдается присутствие следов йода (I-128) и брома (Br-80 и Br-82). В промышленном фильтре ХПП присутствуют следы калия (K-42), алюминия (Al-28) и индия (In-116m). Для кварцевого фильтра характерно отсутствие следов примесных элементов.

На рис. 20 показано содержание примесей в образцах относительно к их содержанию в ЛФС-2. Содержания примесей в ЛФС-2 выбраны за 1 из-за их минимальных значений. При этом содержание марганца в марле и фильтрах Петрянова сравнимо. Это возможно из-за того, что в марлевую основу фильтров Петрянова и марлю отбеленную марганец попадает в процессе производства. Содержание С1 в марле находится в пределах ГОСТ. На рис. 21 показано содержание ряда других примесных элементов в исследуемых материалах. Заметные вклады дают следы калия (К-42), брома (Br-82), йода (I-128), алюминия (Al-27) и индия (In-116m). Наибольшее количество таких примесей содержится в промышленном фильтре ХПП. При этом следует отметить, что фильтры из марли и ЛСФ-2 можно использовать для анализа самих этих элементов с помощью НАА.

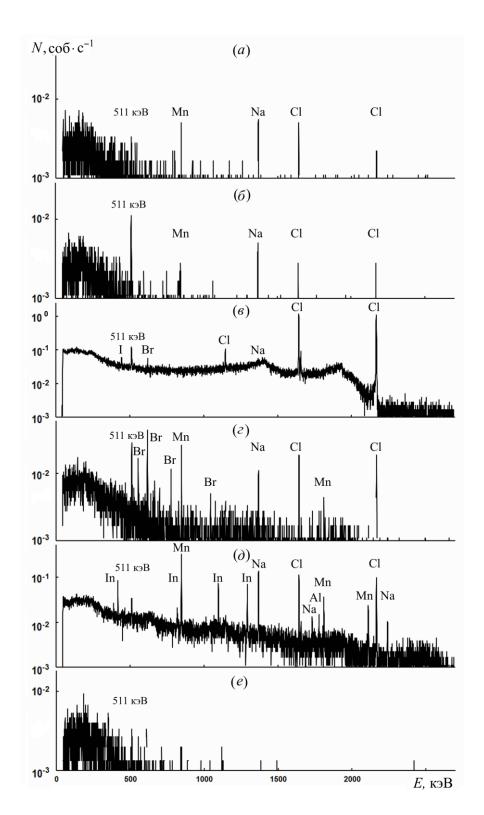


Рисунок 18 - Активационные спектры исследуемых материалов для короткоживущих изотопов: (a) — марля, (δ) — ЛФС-2, (ϵ) — ФПП, (ϵ) — ФПА, (δ) — ХПП, (ϵ) — кварц

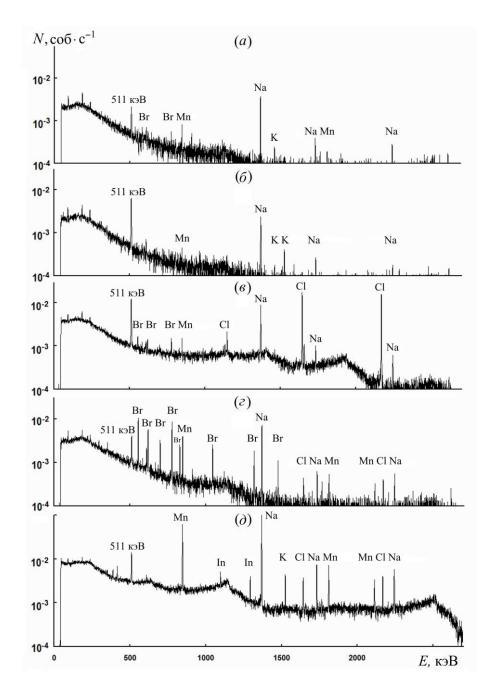


Рисунок 19 - Активационные спектры исследуемых материалов для долгоживущих изотопов: (a) — марля, (б) — ЛФС-2, (в) — ФПП, (г) — ФПА, (д) — ХПП

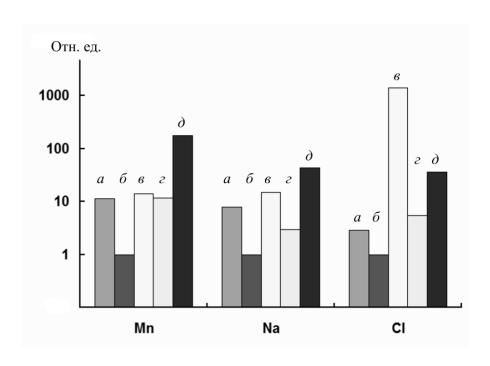


Рисунок 20 - Содержание основных примесных элементов в материалах относительно ЛСФ-2: Мп — светло-серый цвет, Nа— темно-серый цвет, Cl — белый цвет. По оси абсцисс указаны материалы: а — марля, δ — ЛФС-2, ϵ — ФПП, ϵ — ФПА, δ — ХПП.

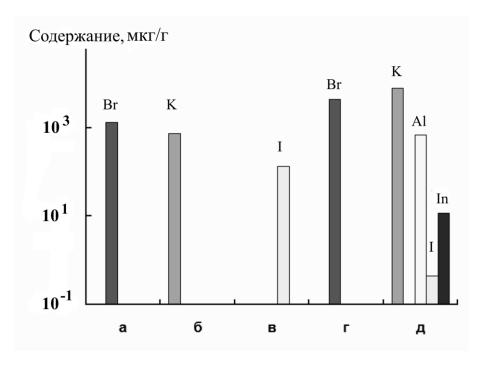


Рисунок 21 - Содержание других примесных элементов в материалах. Обозначения по оси абсцисс – как на рис. 20.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Недорезов В. Г., Конобеевский Е. С., Зуев С. В., Полонский А. Л., Туринге А. А. Возбуждение изомерных состояний 111m Cd, 113m In, 115m In фотонами с энергией до 8 МэВ// ЯФ. 2018. Т. 80, С. 423 426.
- 2. Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Фирсов В. И. Низкофоновый гамма спектрометр с защитой на антисовпадениях от космического излучения // ЯФ и Инж. 2016. Т. 4. С. 879 882.
- 3. Nedorezov V., Konobeevski E., Polonski A., Ponomarev V., Savel'ev A., Solodukhov G., Tsymbalov I., Turinge A., Zuyev S., Gorlova D. Photoexcitation of spin isomers of In and Cd nuclei in the pigmy resonance region // Phys. Scripta. 2019. V. 94, 015303.
- 4. Недорезов В. Г., Ранюк Ю. Н. Деление ядер под действием фотонов и электронов промежуточных энергий // ЭЧАЯ. 1984. Т. 15, вып. 2. С. 379 417.
- 5. Batii V. G., Vladimirov Yu. V., Rakivnenko Yu. N., Ranyuk Yu. N., Rastrepin O. A., Skakun E. A. Radionuclide accumulation for photo- and electron disintegration of nuclei in the A ~ 90 region // Atomn. Energ. 1987. V. 63. P. 386 389,

9. Задача «Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы »

Научный руководитель: И.В.Суркова, снс, кфмн.

Основные исполнители

Заварзина В.П., снс, кфмн.

Мордовской М.В, внс, кфмн.

Скоркин В.М., снс, кфмн.

Мицук В.В. стажер-исслед.

Исполнители

Осипчук И.И., нс, кфмн.

Поташев С.И., снс, кфмн.

Сабинин С.Л.

Тишин В.В.

Проводимые авторами расчеты и анализ экспериментальных данных по нейтронядерному взаимодействию показывают, что для пополнения базы данных интересными могут стать нейтронные сечения, полученные на ускорителе ЛУЭ-8-5 с фотонейтронным источником. Работы по данной теме подразумевают определение доступных интервалов энергий нейтронов, интенсивностей, исследование фоновых условий.

1. Определение энергетического спектра быстрых нейтронов W-Ве источника ИЯИ PAH в реакции $n+{}^1{ m H} o n+p$

Для исследования возможности измерения ядерных сечений на пучках быстрых «квазимоноэнергетических» нейтронов W-Ве фотонейтронного источника ИЯИ РАН проведено моделирование спектра нейтронов, образованных в реакции γ + ${}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be} + n$ при различных граничных энергиях фотонного спектра. Полученные спектры использовались далее для моделирования отклика водородосодержащего детектора на нейтроны в реакции n + ${}^1\text{H} \rightarrow n$ + p. Создана экспериментальная установка для определения энергетического спектра нейтронов W-Ве источника. Проведены измерения спектров вторичных протонов детектированных в активной водородосодержащей мишени при облучении нейтронами и сравнение их с расчетными. Работа является продолжением исследования экспериментальных условий измерения нейтронных сечений на фотонейтронном источнике, установленном на пучке электронов линейного ускорителя

ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН [1].

Для получения потока быстрых и тепловых нейтронов используется реакция ⁹Ве (□, п). Тормозное гамма-излучение образуется при облучении электронами с энергией 4—10 МэВ вольфрамового конвертера. Одна из целей исследований состоит в определении возможности получения нейтронных данных на этой установке с использованием быстрых нейтронов с квазимоноэнергетическим спектром.

Моделирование условий эксперимента

Модельные расчеты по программе MCNP5 процессов взаимодействия электронов, фотонов и нейтронов с элементами конструкции W-Ве источника показали, что энергетический спектр нейтронов, полученный при облучении бериллиевой мишени тормозными фотонами, содержит быструю часть (1–5 МэВ), вклад которой в спектр зависит от толщины бериллиевой мишени (рис. 22) [2].

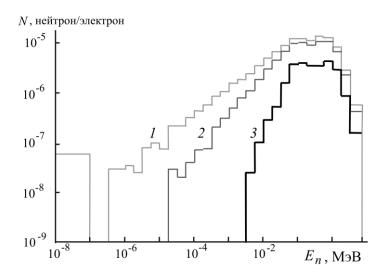


Рисунок 22 - Энергетический спектр нейтронов из W-Ве мишени при облучении 7 МэВ электронами в зависимости от толщины бериллиевой мишени: I-1 см, 2-5 см, 3-10 см. Модельный расчет.

Результаты расчетов энергетических спектров тормозных фотонов были использованы в процедуре квазимонохроматизации пучка фотонов и показали возможность получения «квазимоноэнергетического» пучка фотонов. Такая возможность обусловлена особенностью ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН — плавное изменение энергии

электронов от 4 до 10 МэВ позволяет при облучении W-мишени получать различные наборы спектров фотонов с различными граничными энергиями. Комбинация таких спектров рассматривается в рамках процедуры «квазимонохроматизации» как «квазимоноэнергетический» спектр фотонов.

Результаты моделирования нейтронообразующей реакции $\gamma + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be} + n$ при облучении бериллиевой мишени такими «квазимоноэнергетическими» фотонами показали в свою очередь возможность получения «квазимоноэнергетического» пучка быстрых нейтронов [3].

В настоящей работе рассмотрена возможность определения энергетического спектра нейтронов, полученного при облучении Ве мишени тормозными фотонами с определенной граничной энергией. Для измерения энергетического спектра нейтронов рассматривалась реакция упругого рассеяния нейтронов на водороде $n+1 \to n+p$. При этом в качестве активной мишени предполагается использовать водородосодержащий сцинтиллятор. Рассеянный протон будет регистрироваться в самой мишени, а нейтрон в дополнительном сцинтилляционном детекторе. Энергия протона будет определяться по световыходу в активной мишени, а энергия нейтрона по времени пролета.

Восстановление энергии первичного нейтрона возможно либо по энергии одной из вторичных частиц (протона или нейтрона) при фиксированном угле установки нейтронного детектора относительно направления первичного пучка нейтронов, либо по суммарной энергии протона и нейтрона.

Перед измерениями было проведено моделирование условий эксперимента. На первом этапе рассматривается облучение 9 Ве мишени тормозными фотонами (энергетический спектр фотонов показан на рис. 23a), образованными при облучении W мишени пучком электронов определенной энергии (для спектра на рис. $23a E_e = 7.5 \text{ M}$ эВ).

Нейтроны образуются в широком интервале углов и для энергий электронов 4–10 МэВ могут иметь предельную энергию ≈ 2 –8 МэВ. С помощью результатов моделирования и с учетом конструктивных особенностей источника можно определить оптимальный угол для выведенного пучка быстрых нейтронов. С учетом измеренных ранее на ускорителе фоновых условий для моделирования и проведения эксперимента был выбран угол в 150 \square , относительно направления пучка электронов. При расчетах учитывалось, что фотоны попадают на Ве мишень в растворе углов $\square_{\Phi} = 0 \square \pm 30 \square$, а

вылет образовавшихся нейтронов происходит под углом $\Box_n = 150\Box \pm 10\Box$. При этих условиях получен моделированный энергетический спектр нейтронов, приведенный на рис. 23 δ . На следующем этапе моделирования нейтронами с полученным спектром облучается водородосодержащий (СН-сцинтиллятор) детектор, одновременно служащий мишенью и детектором рассеянных протонов.

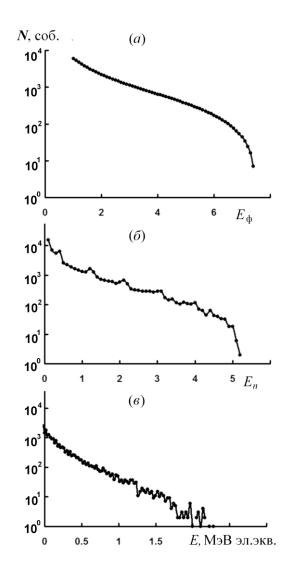


Рисунок 23 - Модельные энергетические спектры вторичных частиц, соответствующие энергии электронов 7.5 МэВ: (а) — фотонов, (б) — нейтронов и (в) — спектр световыхода в водородосодержащем детекторе, где по оси абсцисс — эквивалентная энергия электронов. По оси ординат отложено количество событий.

Следующий этап моделирования – вычисление энергетического спектра протонов, полученного при облучении нейтронами мишени и, затем, амплитудного спектра сигналов

от зарегистрированных протонов в мишени-сцинтилляторе (рис. 23*в*) с учетом геометрии и эффективности детектора.

Экспериментальная установка и результаты

Схема экспериментальный установки для определения энергетического спектра первичных нейтронов в реакции $n + {}^{1}H \rightarrow n + p$ приведена на рис. 24.

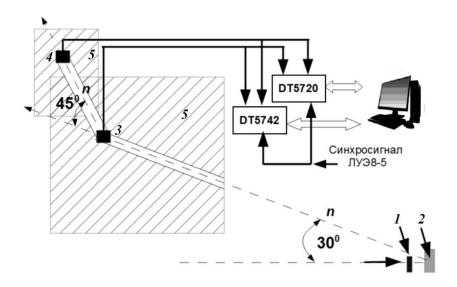


Рисунок 24 - Схема установки: I — W-мишень, 2 — Ве-мишень, 3, 4 — детекторы Д1 и Д2, 5 — свинцовая защита с коллиматорами.

Детектор Д1 (жидководородный сцинтиллятор ЕЈ301) является одновременно водородной мишенью, детектором вторичных протонов и генератором стартового импульса для измерения времени пролета вторичного нейтрона. Он помещен в массивную защиту с коллиматорами на расстоянии 8 м от Ве-нейтронопроизводящей мишени под углом в 150 к начальному направлению электронного пучка. Детектор рассеянных нейтронов Д2, аналогичный детектору Д1, установлен на расстоянии в 2 м от Д1 под углом в 45 к направлению падающего первичного пучка нейтронов. Детектор Д2 генерирует стоповый импульс для определения времени пролета рассеянных нейтронов.

Осциллограммы сигналов детекторов записывались с помощью цифровых процессоров CAEN DT5720 и DT5742. Это позволяло по форме импульса отличать события регистрации протонов в детекторе Д1 и нейтронов в детекторе Д2 от у-квантов

(для этой цели служит параметр разделения событий по форме импульса PSD (Pulse Shape Discrimination), позволяющий разделять сигналы разного происхождения.

На рис. 25 показаны экспериментальные графики распределения величины параметра PSD для сигналов детектора Д1 в двух наборах: черные точки – с широким коллиматором ~ 5 см, время набора 3 мин., серые точки – с узким, время набора 15 мин. При раскрытом коллиматоре в детектор попадает значительное количество сопровождающих сброс пучка γ-квантов. Протонам соответствует пик с большим значением параметра PSD (форма сигнала имеет более пологий задний фронт, чем у γ-квантов). Видно, что при сравнимых потоках события вызванные протонами и гамма-квантами достаточно хорошо разделяются.

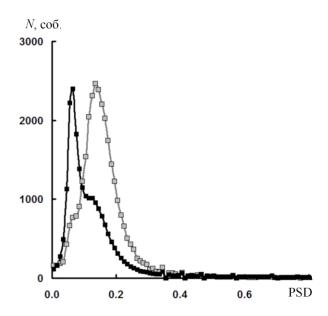


Рисунок 25 - Распределение величины параметра PSD по событиям в измерениях с разными коллиматорами — с широким (черные точки) и с узким (серые точки). Установленный порог для амплитуды сигнала $\sim 0.2~{\rm M}$ эВ эл.экв.

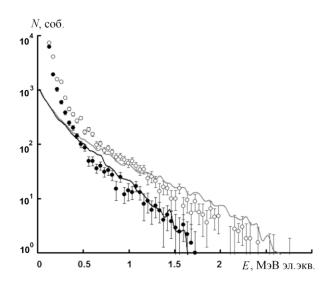


Рисунок 26 - Спектры световыхода в активной мишени Д1 при облучении нейтронами. Расчетные кривые: при энергии ускорителя 8.5 МэВ (черная линия) и 6.5 МэВ (серая линия); экспериментальные данные: для 8.5 МэВ (черные точки) и 6.5 МэВ (серые точки). По оси абсцисс — эквивалентная энергия электронов, по оси ординат — количество событий.

На рис. 26 показаны экспериментальные спектры сигналов детектора Д1, полученные в 2-х измерениях по 10 мин при токе электронов 5 мкА, энергии электронов 6.5 и 8.5 МэВ, толщине бериллиевой мишени 100 мм. При этом проведен отбор по параметру PSD, соответствующий регистрации протонов. Здесь же приведены моделированные кривые для этих же энергий электронов, соответствующие регистрации протонов в детекторе при попадании нейтронов в жидководородный детектор. Видно качественное согласие экспериментальных и моделированных распределений, указывающее на наличие быстрых нейтронов (предельные энергии 4.5–6.5 МэВ) в энергетическом спектре нейтронов из Ве-мишени при энергии электронного пучка 6.5 и 8.5 МэВ, соответственно.

2. Исследование характеристик выведенного пучка фотонейтронного источника ИН-ЛУЭ

W-Ве-фотонейтронный источник нейтронов на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 в течении нескольких лет интенсивно используется для облучения

различных образцов небольшого размера во внутренней полости источника с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов 10^7 - 10^8 с $^{-1}$ см $^{-2}$. Однако для ряда задач необходимо облучение объектов больших размеров (нейтронография) или исследование вторичного излучения с детекторами около облучаемого образца. Для этих целей предусмотрен выведенный пучок нейтронов, проходящий через коллиматор. Целью настоящей работы является исследование параметров этого пучка.

Схема источника показана на рис. 27. Электроны ускорителя ЛУЭ-8-5 с максимальной энергией 8.5-9 МэВ попадают на вольфрамовый конвертор (1) и образуют в нем поток тормозных фотонов с максимальной энергией 8.5-9 МэВ. Тормозные гаммакванты, падая на бериллиевую мишень (2), состоящую, как показано на рис. 27, из двух блоков 10*10*10 см³, рождают быстрые нейтроны в реакции 9 Ве (γ,n) . Нейтроны в полиэтиленовом блоке-замедлителе (3) замедляются до тепловой энергии, при этом максимальная плотность потока тепловых нейтронов достигается в объеме 10x10x10 см³ (5), расположенном между блоками бериллиевой мишени. Эта внутренняя область обычно используется для облучения образцов небольшого размера тепловыми нейтронами. Слои защиты из борированного полиэтилена (4) замедляют вышедшие из замедлителя быстрые нейтроны и поглощают медленные и тепловые нейтроны.

Для облучения внешних объектов в конструкции источника предусмотрен канал вывода нейтронов в виде коллиматора (6) с диаметром поперечного сечения 30 мм, расположенный под углом 67□ относительно направления электронного пучка и выходящий из центра области (5) с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов.

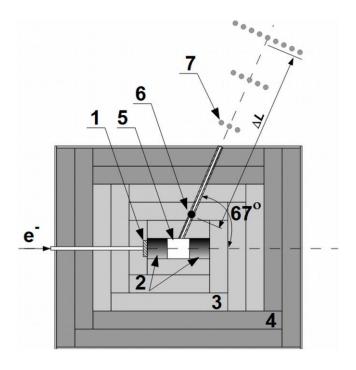


Рисунок 27 - Схема фотонейтронного источника: 1 – W-тормозная мишень-конвертер, 2 – Ве-нейтронообразующая мишень, 3 – полиэтиленовый замедлитель, 4 – защита из борированного полиэтилена, 5 – полость для внутреннего облучения мишеней, 6 – коллиматор выведенного пучка нейтронов, 7 – активационные образцы 55 Mn

Методика измерений плотности потока нейтронов

Плотность потока нейтронов измерялась [1] с использованием активационного метода и известных сечений (n,γ) -реакций. В качестве монитора плотности потока нейтронов в измерениях были использованы образцы 55 Mn. Экспериментально измеренная плотность потока тепловых нейтронов во внутренней области (между бериллиевыми блоками) составляет $\sim 10^7$ нейтрон/с·см² при среднем токе электронов 40 мкА.

В задачу данной работы входило исследование плотности потока выведенного пучка тепловых нейтронов в зависимости от расстояния до центра источника и распределение плотности потока от расстояния от оси коллиматора. В качестве мониторов потока использовались образцы 55 Mn (KMnO₄), которые в результате активации тепловыми нейтронами в реакции 55 Mn(n,γ) 56 Mn приводят к образованию \square -активного изотопа 56 Mn с периодом полураспада 2.58 ч.

Измерение активности облученных образцов проводилось в низкофоновой камере с использованием гамма-спектрометра из сверхчистого германия (HPGe) и системы регистрации, сбора и обработки информации с детекторов [4]. Текущий вариант защиты обеспечивает значение скорости счета фона менее 3 имп/с в диапазоне энергий регистрации гамма-квантов 100 - 2500 кэВ.

Для определения плотности потока нейтронов используется метод нейтронноактивационного анализа (НАА) [5]. В рамках НАА площадь пика в гамма-спектре активированного нейтронами образца представляется в виде:

(1)
$$S_i = \frac{mgN_A pa}{M\lambda} \Phi \times \sigma \mathcal{E}(t_1, t_2, t_3)$$

где: S — площадь пика в спектре; \Box — сечение активации; \Box — плотность потока тепловых нейтронов; $E(t_1,t_2,t_3)=\left(1-e^{-\lambda t_1}\right)e^{-\lambda t_2}\left(1-e^{-\lambda t_3}\right)$ — фактор учитывающий наработку и распад радиоактивного изотопа за время облучения (t_1) , задержки (t_2) и измерения (t_3) ; λ — постоянная радиоактивного распада; m — масса образца; g — содержание изотопа в естественной смеси изотопов; p — выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа; M — атомный вес элемента; a — коэффициент, учитывающий экспериментальные условия. Если известно сечение активации изотопа тепловыми нейтронами и все параметры облучения и измерения, то из уравнения (1) можно получить искомое значение плотности потока в определенной точке.

Характеристики выведенного пучка нейтронов

Измерения проводились при среднем токе электронов 40 мкА. Образцы Мп (КМпО₄) весом ~ 3 г, устанавливались по линии, перпендикулярной оси коллиматора на расстоянии 60, 81, 127 и 160 см от центра источника. Для контроля один образец Мп весом 0.1 г. облучался во внутренней камере источника при плотности потока ~10⁷ с⁻¹см⁻². Количество образцов на выведенном пучке варьировалось от 3 до 9 в зависимости от расстояния до образцов. Время облучения также варьировалось от 30 до 120 мин. После облучения образцы перемещались в низкофоновую камеру и активационные □-спектры образцов измерялись с помощью НРGе-спектрометра. Типичный энергетический спектр, полученный для образца Мп, показан на рис. 28.

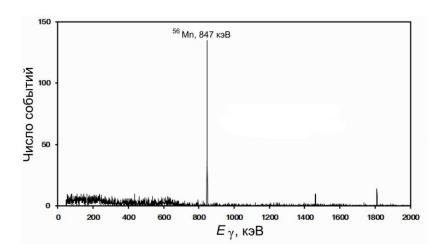


Рисунок 28 - Спектр гамма-квантов активированного образца ⁵⁶Mn, используемого в качестве монитора плотности потока

Спектры для каждого облученного образца записывались в компьютер и обрабатывались с помощью программы SpectraLineGP [6]. В результате обработки вычислялась площадь пика с энергией 847 кэВ, соответствующего образованию изотопа 56 Mn. Далее по формуле (1) с использованием известного сечения реакции 55 Mn(n, γ) 56 Mn, времен облучения, выдержки и измерения и других известных параметров (эффективности детектора, времени распада и др.) вычислялась плотность потока нейтронов в точках расположения детекторов.

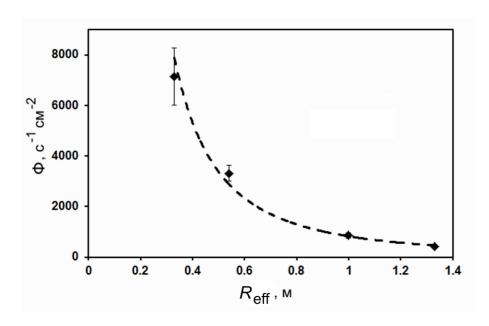


Рисунок 29 - Зависимость плотности потока нейтронов от эффективного расстояния. Кривая – функция , где $\Phi_0 = 824 \ c^{-1}$.

На рис. 29 представлены экспериментальные значения плотности потока нейтронов на оси коллиматора для различных расстояний от центра источника. Приведена также расчетная кривая для точечного источника , при этом совпадение с экспериментальными данными получается при предположении, что центр точечного источника смещен от геометрического центра на 0.27 м. На рис.29 представлена зависимость плотности потока от расстояния $R_{\rm eff}=R-0.27$, где R- расстояние от геометрического центра до точки измерения.

На рис. 30 показана зависимость плотности потока нейтронов от смещения от оси коллиматора ($\Box L$) на расстоянии 1.6 м от центра источника. В данном измерении использовались 9 образцов ⁵⁵Мп, расположенные со смещением 5 см по линии перпендикулярной оси коллиматора на расстоянии 1.6 м от геометрического центра источника (центр внутренней полости 5 на рис. 27). Центральный детектор располагался на оси коллиматора ($\Box L$ =0). На рисунке показана также аппроксимационная кривая, рассчитанная как сумма гауссиана и постоянного члена. На этом расстоянии ширина распределения FWHM = 26 см. Аналогично были получены данные о поперечном распределении плотности тока на других расстояниях от центра источника.

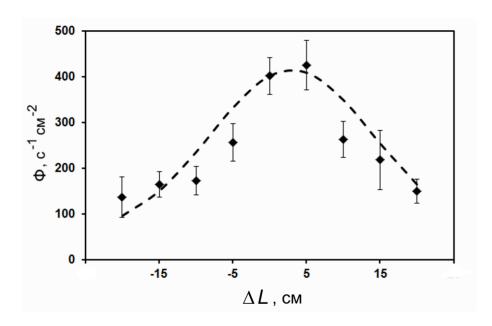


Рисунок 30 - Зависимость плотности потока нейтронов от смещения от оси коллиматора на расстоянии 1.6 м от центра источника. Параметры подгонки: $\Phi_1 = 360 \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$, $\Phi_2 = 55 \text{ c}^{-1}\text{cm}^{-2}$.

Полученные значения плотности потока нейтронов в зависимости от расстояния до центра источника и распределение плотности потока от расстояния до оси коллиматора (профиль пучка) приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Параметры выведенного пучка нейтронов

Расстояние от точки эффектив-ного центра источника, см	Плотность потока, с ⁻¹ ,см ⁻²	Ширина распределения (FWHM) плотности потока, см
33	7144	Не изм.
54	3320	5
100	859	12
133	425	26

3. Исследование параметров гамма излучения при радиационном захвате замедляющихся нейтронов в материалах окружающей среды

Проведены работы по исследованию гамма и нейтронного фона от взаимодействия замедляющихся нейтронов с материалами на ускорителе электронов ЛУЭ-8-5.

Создан и испытан сцинтилляционный спектрометр на основе детектора БДМГ2-38 и анализатора US-006 (Kolibri) для измерения энергетического спектра гаммаизлучения от радиационного захвата нейтронов в комбинированном замедлителе и окружающих материалах на ускорителе ЛУЭ-8-5 (Рис. 31).

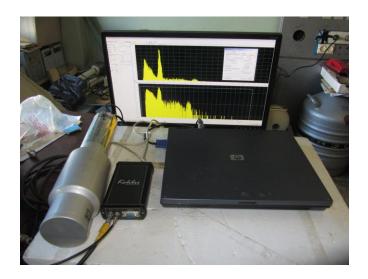


Рисунок 31 - Сцинтилляционный гама спектрометр на основе детектора БДМГ2-38 и анализатора US-006 (Kolibri)

Исследованы плотность потока замедляющихся нейтронов и радиационная стойкость оргстекла в комбинированном замедлителе с элементами из тяжёлых металлов и полимерных материалов.



Рисунок 32 - Неоднородное радиационное повреждение органического стекла при облучении дозой свыше МГр на нейтронном источнике РАДЭКС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. *Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др.* // Изв. РАН Сер. физ. 2017. Т. 81. С. 824.
- 2. *Andreev A., Burmistrov Yu., Gromov A. et al.* // Fifth Int. Conf. on Nucl. Fragm. (NUFRA2015). Kemer. Oct. 2015. https://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/talks/Sobolevsky_ nufra2015.pdf.
- 3. Мордовской М.В., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Мицук В.В., Суркова И.В., Скоркин В.М. // Изв. РАН Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 829.
- 4. Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Фирсов В. И. // ЯФ и Инж. 2016. Т. 4. С. 879.
- 5. Гутько В. И. Активационный анализ. Минск: МГЭУ, 2008. 74 с.
- 6. SpectraLineGP. http://lsrm.ru/products/detail.php?ELEMENT_CODE=SpectraLineGP.

10. Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер, 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 электронов, реальных и виртуальных фотонов»

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

ФИО	Дата рождения	Уч. степень	Должность
Гуревич Григорий Манович	28.11.1935	д.фм.н.	г.н.с.
Джилавян Леонид Завенович	27.03.1940	к.фм.н.	B.H.C.
Кондратьев Рудольф Леонидович	19.10.1940	к.ф-м.н.	с.н.с.
Лапик Александр Михайлович	28.05.1953		н.с.
Лисин Валерий Павлович	24.08.1945	к.ф-м.н.	B.H.C.
Мушкаренков Александр Николаевич	19.12.1980	К.ф-м.н.	с.н.с.
Недорезов Владимир Георгиевич	13.09.1946	д.фм.н.	зав. лаб.
Полонский Андрей Леонидович	14.09.1956	к.ф-м.н.	с.н.с.
Руднев Николай Вячеславович	18.12.1972		M.H.C.
Русаков Артур Владимирович	25.11.1964		н.с.
Солодухов Геннадий Васильевич	19.11.1935	к.ф-м.н.	в.н.с.
Тулупов Борис Алексеевич	06.08.1931	к.ф-м.н.	с.н.с
Туринге Андрей Арисович	18.12.1956	к.ф-м.н.	с.н.с.
Горлова Диана Алексеевна	06.02.1997		студентка, лаборант
Мордвинцев Илья Михайлович	29.01.1994		аспирант,

		стажер-иссл.
Цымбалов Иван Николаевич	04.11.1991	аспирант, стажер-иссл.

Приведенные ниже 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, включая исследование пигми резонансов вблизи порога.
- 3. Нелинейные эффекты квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских электронов от фемтосекундных тераваттных лазеров.
- Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.

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

Распад $\eta \rightarrow 3\pi$, запрещенный изоспиновой симметрией, возникает главным образом из-за разности масс u и d кварков. Точное измерение этого распада для заряженной и нейтральной мод может служить чувствительным тестом для величины изоспинового нарушения в КХД. Коллаборацией А2 на ускорителе МАМІ с участием учёных ИЯИ РАН выполнены измерения реакции $\gamma p \rightarrow \eta p$ с высокой статистикой. Из этих измерений получены наиболее точные на настоящее время данные по распаду $\eta \rightarrow 3\pi^0$, что позволило впервые детально изучить динамику этого распада. Проведено сравнение полученных данных с недавними теоретическими расчетами (рис. 33). Также с лучшей в мире статистической точностью исследована реакция $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ от порога до $E\gamma$ =1.45 ГэВ, что позволило извлечь прецизионные данные по наблюдаемым, необходимым для понимания динамики реакции, и провести сравнение с существующими теоретическими моделями.

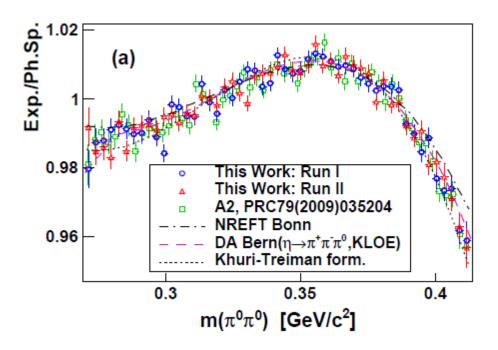


Рисунок 33 - Сравнение полученных данных с теоретическими расчетами

Коллаборацией A2 на ускорителе MAMI (Майнц, Германия) с участием учёных ИЯИ РАН выполнены первые в мире прецизионные измерения полных сечений (рис. 34) и угловых распределений для фоторождения π^0 мезонов на квазисвободных нуклонах, связанных в дейтроне Установлено значительное расхождение между сечениями на свободных и связанных протонах, обусловленное взаимодействием нуклонов в конечном состоянии. Это расхождение использовано для оценки сечения фоторождения нейтральных пионов на свободных нейтронах.

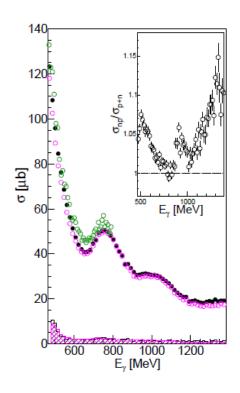


Рисунок 34 - Полное сечение инклюзивного фоторождения нейтральных пионов на дейтроне как функция энергии налетающих фотонов.

Изучение мод распада η ' мезона играет важную роль для понимания квантовой хромодинамики и связанных с ней теоретических моделей. Коллаборация A2 с участием ученых ИЯИ РАН выполнила экспериментальное исследование распада η ' $\to \pi^0\pi^0\eta \to 6\gamma$ с наилучшей на настоящее время статистической точностью посредством регистрации η ' мезонов, рождающихся в реакции $\gamma p \to \eta$ 'р. Полученная статистика и достигнутое энергетическое разрешение позволили впервые наблюдать структуру в сечении ниже порога рождения $\pi^+\pi^-$.

Достигнутый к настоящему времени прогресс в ускорительной и детекторной технике позволяет исследовать реакции множественного рождения мезонов с малыми статическими и систематическими неопределенностями, что открывает новые возможности для барионной спектроскопии. Коллаборацией A2 впервые в мире измерены спин-зависимые сечения фоторождения $\pi^0\eta$ пар на дейтроне с использованием поляризованной дейтронной мишени ОИЯИ-ИЯИ и циркулярно поляризованного фотонного пучка от ускорителя МАМІ . Выполнен анализ вклада различных нуклонных резонансов в эту реакцию в исследуемой области энергий 400-1450 МэВ.

2. Свойства гигантских резонансов в ядрах.

Выполнен ряд экспериментальных и теоретических исследований гигантских

резонансов в ядрах. Получены новые экспериментальные данные по возбуждению спиновых изомеров Cd и In реальными и виртуальными фотонами вблизи порога. Изучен вклад дипольных и квадрупольных возбуждений в области пигми-резонанса (от 5 до 10 МэВ). Обнаружено отклонение от предсказаний модели Вайцзекера-Вильямса, связанное с изменением мультипольности фотопоглощения вблизи порога.

Изучены вклады изовекторных E2 и E1 гигантских резонансов в прямые и обратные реакции под действием реальных и виртуальных фотонов. В рамках микроскопической модели теоретически исследованы прямые и полупрямые E1 фотонейтронные реакции на средних ядрах.

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

Получены новые экспериментальные и модельные данные по генерации позитронов вблизи порога. Измерения выполнены на фемтосекундном лазерном комплексе МЛЦ МГУ и линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Измерения проводились с помощью трех различных детектирующих методов: с использованием детектора МЕДИПИКС, люминофорных пленок и видеокамер, а также с помощью сцинтилляционных линеек и кремниевых фотоумножителей.

На тераваттной лазерной установке МЛЦ МГУ получен направленный пучок электронов с температурой до 2 МэВ, что соответствует экспоненциально спадающему спектру с максимальной энергией около 10 МэВ, интенсивностью до 10^9 e/c и расходимостью ~ 0.1 рад На этом пучке получены первые данные по коэффициенту e-e+ конверсии вблизи порога.

4. Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.

Разработана методика регистрации запаздывающих нейтронов на импульсном ускорителе ЛУЭ-8 ИЯИ РАН с использованием двухкоординатного газоразрядного детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из бора-10 . Получены новые и уточненные данные по выходу запаздывающих нейтронов из ядра 238 U при $E_{\rm max} = 10$ МэВ. Отработан метод получения короткоживущих изотопов для ядерной медицины на электронных ускорителях.

11. Задача «Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN»

Список исполнителей

Руководитель		_Т.Л.Каравичева
работ:канд. физ мат. наук, и.о.зав.лаб.	подпись, дата	
Главный научный сотрудник		А.Б.Курепин
д-р. физмат. наук	подпись, дата	
Зам.Директора ИЯИ РАН, зав КОРЭ	подпись, дата	О.В.Каравичев
Ведущий научный сотрудник д-р. физмат. наук	подпись, дата	И.А.Пшеничнов
Старший научный сотрудник		Н.С.Топильская
канд. физмат. наук	подпись, дата	
Заведующий сектором		Д.В.Серебряков
канд. физмат. наук	подпись, дата	
Научный сотрудник		А.И.Маевская
	подпись, дата	
Младший научный сотрудник		А.Н.Курепин
канд. физмат. наук	подпись, дата	

Младший научный сотрудник		Д.А.Финогеев
	подпись, дата	
Младший научный сотрудник		А.А.Тихонов
	подпись, дата	
Ведущий инженер- электроник		И.В.Морозов
	подпись, дата	
Инженер		Н.А.Курепин
	подпись, дата	
Стажер- исследователь	подпись, дата	А.А.Фурс
Стажер-		А.И.Шабанов
исследователь Младший научный	подпись, дата	
сотрудник	подпись, дата	Е.В.Карпечев
Младший научный		10.4.1/
сотрудник		Ю.А.Меликян
	подпись, дата	
Стажер- исследователь, аспирантка МФТИ		У.А.Дмитриева
	подпись, дата	

Работы по техническому обслуживанию и экспертному сопровождению детектора ТО

Настройка, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора ТО входят в зону ответственности ИЯИ и МИФИ. В первом квартале во время технической остановки БАК были проведены работы по замене системы питания детектора (блок питания A1532, CAEN), устранены нелинейность на высоких амплитудах в трех модулях измерения амплитуды сигналов, устранены кабельные проблемы, которые возникали при передачи данных. Проведена модернизация программного обеспечения для системы управления и контроля детектора.

Выполнен анализ работы детектора Т0 в 2017 году и проведена подготовка переднего триггерного детектора Т0 для участия в физических измерениях на установке ALICE после технической остановки LHC в декабре 2017 года.

Во время зимней 2017-2018 гг. технической остановки БАК (EYETS-2018) была проведена модернизация системы считывания и управления детектором, которая позволила автоматически определять задержки для распределения синхросигналов ВС (Bunch Crossing) в триггерную электронику детектора Т0. Это позволило сократить время настройки детектора при сезонных изменениях в задержках прихода синхросигнала.

Модернизация, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора Т0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ, МИФИ.

Участие детектора Т0 в физических измерениях

В 2018 году проводились сеансы физических измерений на пучках сталкивающихся протонов при рекордно высокой энергии в системе центра масс \sqrt{s} =13ТэВ и при столкновениях ²⁰⁸Pb +²⁰⁸Pb при рекордно высокой энергии в системе центра масс \sqrt{s} NN=5.02 ТэВ.

ТО детектор принимал участие во всех измерительных сеансах, проводимых экспериментом ALICE. Эффективность работы детектора ТО в 2018 г. может быть проиллюстрирована временем набора физических данных различными детекторами эксперимента ALICE (рис. 35 и рис. 36). Общее время набора данных составило 1678 часов для p-p столкновений, из которых детектор ТО участвовал в наборе данных 1640 часов (98%), и для 208 Pb $+^{208}$ Pb столкновений составило 99 %.

Эффективность участия детектора T0 в наборе физических данных по участию детектора в ранах для pp и - ^{208}Pb + ^{208}Pb столкновениям составило 92% и 98% соответственно, (рис. 37 и 38).

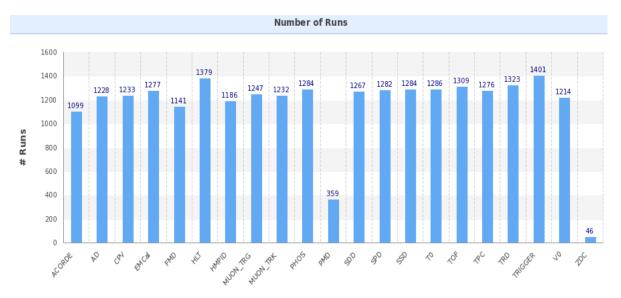


Рисунок 35 - Количество ранов в 2018 году, в которых принимали участие определённые детекторные устройства супердетектора ALICE в p-p столкновениях .

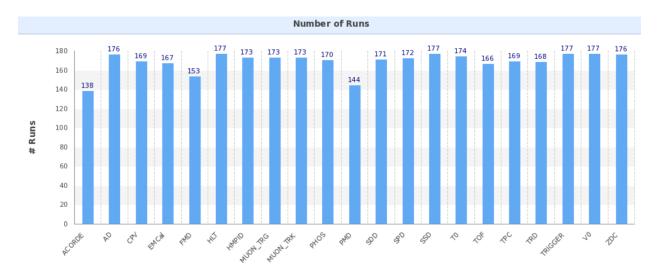


Рисунок 36 - Количество ранов в 2018 году, в которых принимали участие определённые детекторные устройства супердетектора ALICE в 208 Pb + 208 Pb-столкновениях .

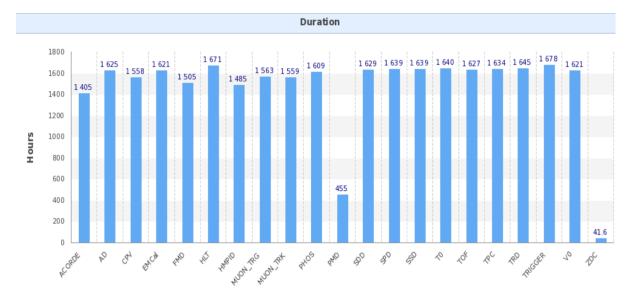


Рисунок 37 - Время набора физических данных для р-р столкновений по детекторам

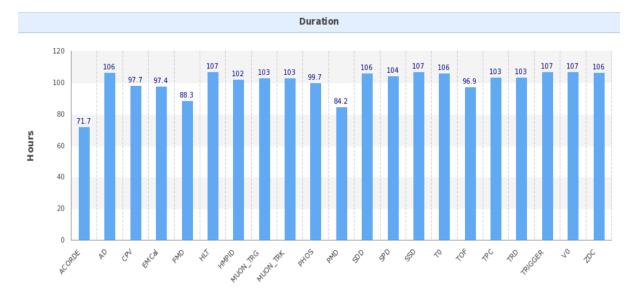


Рисунок 38 - Время набора физических данных для p-p столкновений 208 Pb $+^{208}$ Pb по детекторам.

В данный момент анализируются проблемы, возникавшие в процессе набора данных и оценивается качество накопленных данных.

Участие в сменных дежурствах на установке ALICE во время набора физических данных

Сотрудники группы ИЯИ, МИФИ в рамках коллаборации ALICE-ТО приняли участие в круглосуточных дежурствах в сменах и обеспечивали непрерывное, круглосуточное экспертное сопровождение детектора ТО и прототипа детектора ФИТ, установленного в шахте ALICE, в ходе сеансов по набору физических данных. В табл. 3. приведено распределение количества дежурств, выполненных сотрудниками коллаборации ALICE-ТО в 2018 году с указанием количества смен.

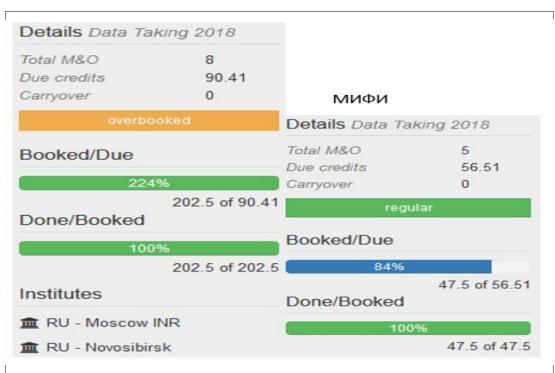


Таблица 3 - Распределение по институтам количества дежурств (on-call) по детектору T0 в 2018 году.

В эксперименте ALICE определена квота ИЯИ и МИФИ по дежурствам в сменах в 2018 году, которая равна 80 смен для ИЯИ и 57 смен для МИФИ. В настоящий момент сотрудники отработали в зачет ИЯИ 202,5 смены и в зачет МИФИ 47.5 смен, что составило 224 % для ИЯИ и 84% для МИФИ.

Обязанностью дежурного эксперта T0 (on-call) является контроль качества данных детектора в процессе набора (on-line). На основе программного обеспечения AMORE осуществляется мониторинг качества данных (Data Quality Monitoring, DQM). Это позволяет дежурным в сменах и экспертам по детекторам идентифицировать возможные проблемы и устранять их.

В 2018 г. сотрудниками ИЯИ РАН и МИФИ была обеспечена стабильная работа детектора Т0.

Определение момента столкновения пучков для время-пролетной системы с использованием детектора T0

Одним из важнейших способов идентификации заряженных частиц в промежуточном диапазоне поперечного импульса от $0.5~\Gamma \ni B/c - 4~\Gamma \ni B/c$ для установки ALICE является время-пролетный метод. Эта задача в основном выполняется с использованием временных измерений, которые основаны на точном определении момента столкновения пучков, длине пути, импульсе и времени прихода треков к детектору Time-of-Flight (TOF).

Времяпролетный детектор (ТОF) является сборкой многозазорных резистивных плоскопараллельных камер (МRPC), расположенных на расстоянии 3.8 м от точки
взаимодействия в интервале псевдо-быстрот $|\eta| < 0,9$. Детектор T0 состоит из набора
черенковских счётчиков T0C и T0A, расположенных по обе стороны от точки
взаимодействия в областях -3,28 < η < 2,97 и 4,61 < η < 4,92 соответственно. Важной
компонентой идентификации частиц является точное определение момента столкновения
пучков, которое может определяться детектором T0 (t^{T0}_{ev}), самим детектором TOF(t^{T0F}_{ev}),
или считаться равным нулю(t^{fill}_{ev}) если в событии отсутствуют данные с обоих
детекторов. Проведенные исследования показали максимальную эффективность
использования детектора T0 для событий с малой множественностью, которая
определяется количеством треков на детекторе TOF. Если количество треков превышает
15, то все методы определения момента столкновения пучков дают одинаковый результат.

Для p-p столкновений при энергии в системе центра масс \sqrt{s} =13 ТэВ и при столкновениях 208 Pb $^{+208}$ Pb при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ. разрешение определения момента столкновений пучков не превышает 47 пс и 20 пс соответственно. Проведенные исследования показали, что разрешение не зависит от значения магнитного поля и частоты взаимодействий.

Программа автоматического мониторирования разрешения и центрирования (t^{TO}_{ev}), включена в общую систему контроля качества данных и публикуется на странице http://aliqat0.web.cern.ch/aliqat0 в конце каждого цикла реконструкции данных. На рисунках 39 и 40 показаны тренды разрешения и центрирования момента столкновения пучков для периода LHC18k и LHC18l (p-p столкновений при энергии в системе центра масс \sqrt{s} =13 ТэВ).

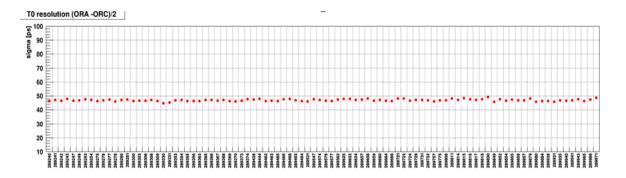


Рисунок 39 - Тренд определения разрешения момента столкновения пучков для периода LHC18k.

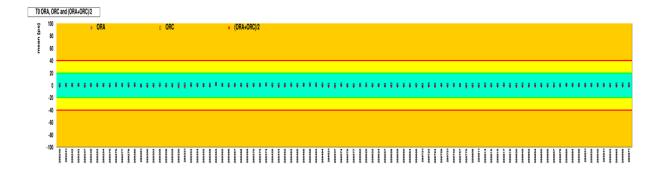


Рисунок 40 - Тренд центрирования момента столкновения пучков для периода LHC18l. Зеленая, желтая и оранжевая области показывают границы допустимых отклонений.

В настоящее время на супердетекторе ALICE закончен набор физических данных при столкновениях 208 Pb $+^{208}$ Pb при рекордно высокой энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ.

Предварительный анализ данных показывает, что разрешение определения момента столкновений пучков остается стабильным и не превышает 20 пс. (рис. 41). На рис. 42 показан тренд разрешения момента столкновений ионов свинца с энергией $\sqrt{s_{NN=}}$ 5.02 ТэВ в ноябре 2018 года. Первые несколько ранов использовались для настройки временных каналов, поэтому разрешение в этих ранах составляло около 30 пс.

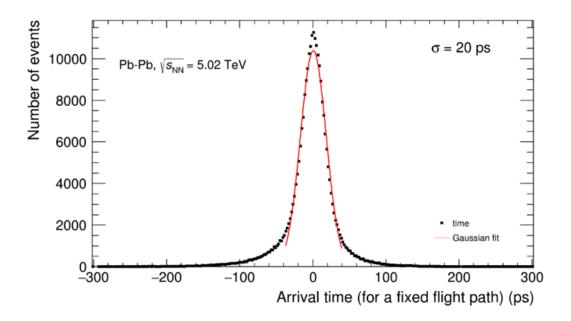


Рисунок 41 - Распределение времени момента столкновений 208 Pb $+^{208}$ Pb при $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ.

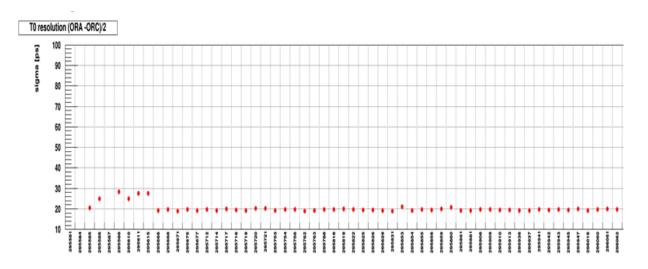


Рисунок 42 - Тренд разрешения момента столкновения 208 Pb + 208 Pb при $\sqrt{s_{NN}}$ = 5.02 ТэВ — период LHC18q

Основным признаком старения фотоумножителей является сокращение амплитуды сигнала при неизменном напряжении питания и интенсивности внешней засветки. Уменьшение амплитуды сигналов с модулей детектора ТО может влиять на разрешение определения момента столкновений пучков. Тренды средних значений амплитуд для каждого канала детектора публикуются на сайте контроля качества данных установки АLICE. Пример такого тренда для одного из 12 каналов детектора ТО со стороны А изображен на рис. 43. Видно, что значение колеблется и интервале 1.6-1.7 МИП / канал, что демонстрирует отсутствие видимого старения ФЭУ в ходе эксплуатации детектора ТО.

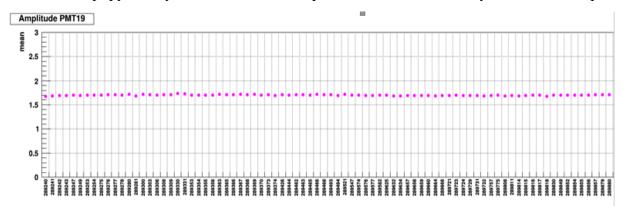


Рисунок 43 - Тренд средних значений амплитуд для канала A7 для периода LHC18k.

Другим фактором, влияющим на разрешение определения момента столкновения пучков, является нестабильность синхронизирующего временного сигнала ускорителя (BC. — bunch Crossing). Оптический сигнал BC проходит несколько километров по оптическому волокну, проложенному вдоль тоннеля ускорителя. В зависимости от

температуры среды, смещение времени прихода сигнала BC может достигать сотни пикосекунд. Для контроля прихода сигнала BC в считывающую электронику детектора используется тренд прихода этого сигнала в системе AMORE (рис. 44).

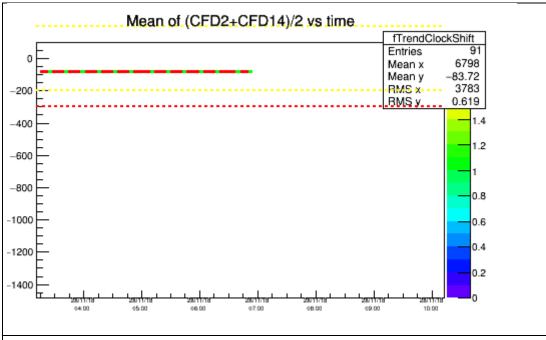


Рисунок 44 - Тренд измерения в режиме on-line смещения времени прихода синхронизирующего временного сигнала ускорителя.

Согласование экспериментальных и симулированных данных для детектора ТО.

Важным условием анализа данных детектора ТО является согласование экспериментальных данных с результатами моделирования по методу Монте-Карло после применения к симулированным амплитудам ограничений, которые определяются используемой электроникой. На рис. 45 сравниваются результаты моделирования программами GEANT3, GEANT4 и экспериментальных данных для взаимодействий пучков протонов с энергией 13 ТэВ. Видно, что все результаты хорошо согласуются между собой.

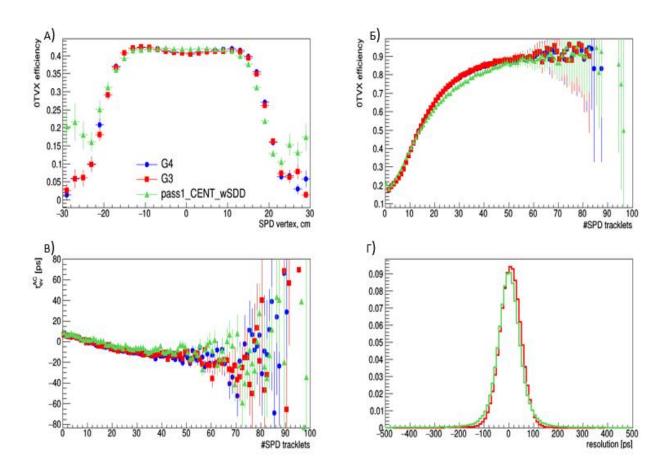


Рисунок 45 - Эффективность триггера 0TVX как функции z-координаты точки взаимодействия (а) и множественности события (б); распределение момента столкновения пучков в зависимости от множественности события (в) и разрешение определения момента столкновений пучков (г). Результаты моделирования программами GEANT3 -красные квадраты, GEANT4 -синие точки и экспериментальных данных - зеленые треугольники.

Измерение и мониторинг светимости с использованием детектора Т0

Светимость в эксперименте ALICE измеряется передними детекторами. Для p-p столкновений используются детекторы V0, T0, AD, для адро-ядерных столкновений детектор ZDC. Во время фазы запуска БАК, для того чтобы оценить качество пучка, используются детекторы V0, Т0 и AD для мониторинга светимости и оценки фоновых событий. В качестве основного сигнала для оценки светимости использовался триггерный сигнал 0TVX (сигнал генерируется, если вершина столкновении находится в пределах ±20 см). Знание видимого (триггерного) сечения позволяет в режиме реального времени проводить мониторинг светимости. Видимое сечение σ_{vis} , наблюдаемое данным детектором (или набором детекторов) с заданным триггерным условием, является частью полного сечения неупругого взаимодействия σ_{inel} : $\sigma_{vis} = \epsilon \sigma_{inel}$, где ϵ - доля неупругих событий, которые удовлетворяют условию триггера. В июле 2017 года, для р-р столкновений при энергии $\sqrt{s} = 5$ TeV, было проведено сканирование по методу Ван дер Меера. В настоящее время завершен анализ этих данных. Чтобы проверить стабильность измерения светимости, обеспечиваемого детекторами Т0 и V0 для этого набора данных, соотношение между светимостями, измеренными этими двумя детекторами, было рассчитано для всех записанных ранов. Для каждого рана интегрированная светимость измеряется из отсчетов триггеров на детекторах T0- и V0; они корректируются на фоновые события и делятся на соответствующее видимые сечения. Результаты показаны на рис. 46 как функция времени выполнения сканирования. В первых 40 ранах, взятых при относительно низком µvis (вероятность более одного события в банче 0,003 для V0), соотношение систематически ниже единицы, примерно на 1%. В последних 10 ранах, взятых при более высоком μ vis (обычно 0,04 для V0), соотношение систематически выше единицы, примерно на 1%. Возможными объяснениями такого поведения являются не совершенное вычитание фона при низких µvis, а также не корректный учет событий с pileир .наложениями или уменьшение эффективности V0 при более высоком µvis. На рис. 46 справа показано распределение отношения светимости по всем по ранам. Каждый ран взвешивается с соответствующей интегральной светимостью. Видимые сечения для р-р столкновений при энергии $\sqrt{s} = 5$ TeV составляют:

$$\sigma_{T0} = 20.77 \pm 0.02$$
 (stat.) mb,
 $\sigma_{V0} = 50.77 \pm 0.05$ (stat.) mb

Представленные результаты показывают стабильность измерения светимости во время всех измерений обоими детекторами.

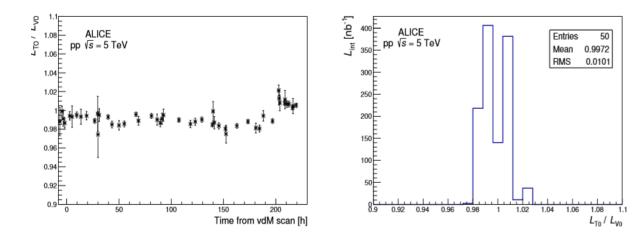


Рисунок 46 - Слева: отношение светимостей, измеренных детекторами T0 (L_{T0}) и V0 (L_{V0}) для p-p-столкновений при $\sqrt{s}=5$ ТэВ, в зависимости от времени проведения измерений. Справа: распределение отношения светимости от отношения L_{T0} / L_{V0} после взвешивания каждого рана с соответствующей интегральной светимостью (L_{int}).

Было дополнительно исследовано влияние отношение частоты триггерных сигналов OTVX (детектор T0) и CINT7 (детектор V0) для p-p столкновений при энергии \sqrt{s} = 13 ТэВ (рис. 47). Отбор событий для анализа данных был сделан при условии отсутствия "pile-up". Однако, на рис. 47 видна линейная зависимость отношений триггерных сигналов от значений μ . Это означает, что не совсем эффективно проводится отбор событий без "pile-up".

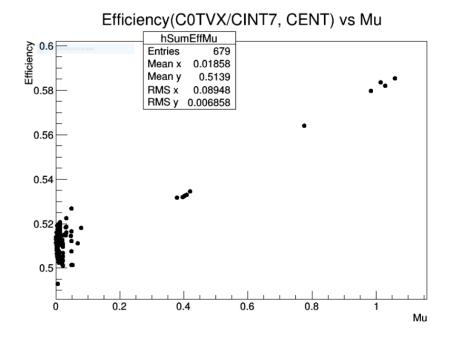


Рисунок 47 - Зависимость отношения частоты триггерных сигналов OTVX (детектор T0) и CINT7 (детектор V0) для p-p столкновений при

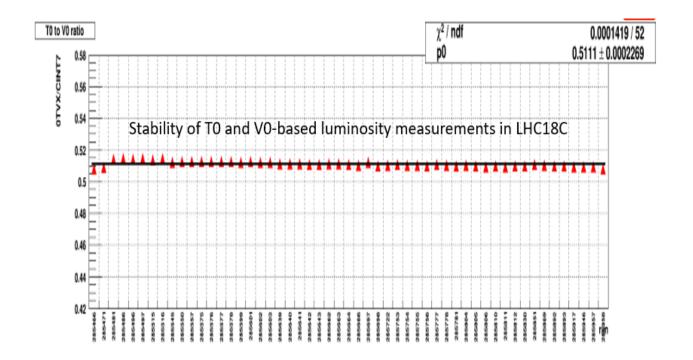


Рисунок 48 - Тренд отношения частоты триггерных сигналов OTVX (детекторТ0) и CINT7 (детектор V0) для столкновениях 208 Pb + 208 Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ.

Предварительный анализ данных 2018 года для столкновений 208 Pb 208 Pb при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ показывает (рис. 48), что отношение частоты триггерных сигналов детекторов Т0 и V0, которые используются для определения светимости, остается стабильным во время всего периода измерений.

Эмиссия нейтронов и протонов ядрами свинца в результате электромагнитной диссоциации

В 2018 году группой ИЯИ РАН выполнен анализ экспериментальных данных с детекторов ZDC, полученных в сеансах столкновений ядер свинца 208 Pb при $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ, проходивших в 2015 годах на установке ALICE. Путем анализа спектров в протонных ZDC (рис. 49) получены сечения каналов вылета определенного количества нейтронов и протонов вперёд в результате электромагнитной диссоциации (ЭМД) 208 Pb. В дополнение к ранее опубликованным данным Run I, собранным для 208 Pb- 208 Pb столкновений при $\sqrt{s_{NN}}$ =2.76 ТэВ, впервые извлечены выходы протонов от ЭМД в каналах

с различной множественностью нейтронов. Результаты сопоставлены с предсказаниями модели RELDIS.

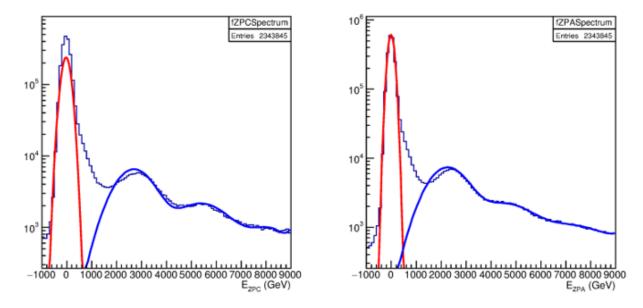


Рисунок 49 - Энергетические спектры в протонных ZDC на стороне C (слева) и на стороне A (справа) от ЭМД 208 Рb в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ. Красная кривая представляет аппроксимацию пьедестала, синяя — спектр энергий в ZDC с широкими 1р и 2р пиками от ЭМД.

Таблица 4 - Сечения эмиссии определённого количества протонов (при произвольном количестве нейтронов) от ЭМД 208 Рb в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02 ТэВ, полученные при двух значениях аксептанса протонных ZDC, в сравнении

ZP	ZN	$\sigma\pm\sigma_{ m stat}$	σ _{RELDIS} (b)	
		p = 0.8	p = 0.75	ORELDIS (0)
1p	Yn	$23.3 \pm 0.1 \pm 2.7$	$23.4 \pm 0.1 \pm 2.6$	$28. \pm 1.4$
2p	Yn	$10.8 \pm 0.08 \pm 1.6$	$11.75 \pm 0.09 \pm 2.5$	$11. \pm 0.6$
3p	Yn	$3.\pm0.03\pm3.2$	$2.4 \pm 0.04 \pm 5.7$	5.3 ± 0.3
4p	Yn	$4.2 \pm 0.05 \pm 5.2$	$4.2 \pm 0.07 \pm 7.9$	2.8 ± 0.2

с результатами модели RELDIS.

Таблица 5 - Сечения эмиссии определённого количества нейтронов (при произвольном количестве протонов) от ЭМД 208 Рb в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}$ = 5.02 ТэВ, полученные при двух значениях аксептанса протонных ZDC, в сравнении с

ZN	ZP	$\sigma_{\text{visible}} \pm \sigma_{\text{stat}}$ (b)		$\sigma + \sigma + \sigma$ (b)	σ(b)
		Side C	Side A	$\sigma \pm \sigma_{\rm stat} \pm \sigma_{\rm syst}$ (b)	σ_{RELDIS} (b)
1n	Yp	104.2 ± 0.2	105.2 ± 0.2	$107.8 \pm 0.3 \pm 5.5$	107.6 ± 5.4
2n	Yp	23.93 ± 0.08	22.84 ± 0.08	$24.8 \pm 0.1 \pm 1.5$	26.0 ± 1.3
3n	Yp	7.65 ± 0.04	7.48 ± 0.04	$7.55 \pm 0.06 \pm 0.4$	11.3 ± 0.6
4n	Yp	5.30 ± 0.03	5.36 ± 0.03	$5.75 \pm 0.05 \pm 0.3$	7.9 ± 0.4
5n	Yp	4.27 ± 0.03	4.40 ± 0.03	$4.33 \pm 0.05 \pm 0.2$	6.4 ± 0.3

результатами модели RELDIS.

Обнаружено хорошее согласие теории и эксперимента для распределений нейтронов и протонов по множественности (Таблицы 4 и 5). Вместе с тем измеренные сечения эмиссии одного протона одновременно с одним, двумя и тремя нейтронами оказались существенно меньше предсказанных теорией. Планируется уточнить процедуру выделения 1р-событий путем выполнения двумерного фитирования корреляции энергий в протонном и нейтронном ZDC, установленных с одной стороны от точки взаимодействия. В ходе данного анализа предложен и реализован способ учета поправок на ограниченный аксептанс протонного калориметра на основе простой комбинаторной модели, который может быть использоваться независимо или параллельно с вычислением аксептанса ZDC методом Монте-Карло.

Полученные впервые экспериментальные данные по эмиссии заданного количества нейтронов и протонов позволяют оценить выходы вторичных ядер от ЭМД ядер ²⁰⁸Pb , которые имеют близкие к ним отношения заряда к массе. К ним относятся ядра ^{205,206,207}Pb, ^{204,205,206,207}Tl, которые образуются в результате эмиссии нейтронов без эмиссии протонов и в результате эмиссии одного протона вместе с нейтронами. Как обсуждалось в литературе, некоторые из таких ядер, имея сечения образования в несколько раз превышающие сечения адронных взаимодействий ²⁰⁸Pb создают нежелательную локальную тепловую нагрузку на компоненты БАК, поэтому необходимы точные измерения их выходов. Значение таких измерений возрастает для подготовки работы LHC с увеличенной светимостью и проектирования будущего адронного коллайдера FCC-hh.

В связи с обсуждаемыми в ЦЕРНе планами исследовать столкновения других ядер (помимо ²⁰⁸Pb) в будущих Run 3 и Run 4 на БАК были проведены вычисления сечений адронного взаимодействия ядер, ЭМД и сечений рождения электрон-позитронных пар для ряда средних и легких ядер элементов, пригодных для использования в ионных источниках. Рассмотрение соотношения между этими сечениями (табл. 6) показало, что столкновения ядер In и Xe могут быть выгодны с точки зрения уменьшения потерь ядер пучка в электромагнитных процессах при достаточной частоте нуклон-нуклонных столкновений внутриядерных нуклонов в этих ядрах.

Таблица 6 - Сечения адронного взаимодействия ядер вычисленные с помощью модели Глаубера, сечения ЭМД вычисленные с помощью модели RELDIS, сечения рождения электрон-позитронных пар, суммарное полное сечение и доля адронного сечения для взаимодействий различных ядер на LHC.

beams	E/A (TeV)	E/Z (TeV)	$\sigma_{\rm had}^{ a)} \ (b)$	$\sigma_{\text{EMD}}^{c)}$ (b)	σ_{BFPP} (b)	σ _{tot} (b)	$\sigma_{ m had}/\sigma_{ m tot}$
$^{40}Ar^{18+}$	2.93	6.5	2.689	1.7	~0.016	4.4	61
$^{40}\text{Ca}^{20+}$	3.25	6.5	2.69	2.	0.034 ^{d)}	4.7	57
$^{63}\text{Cu}^{29+}$	2.99	6.5	3.65	5.8	~0.46	9.9	36
$^{78}{\rm Kr}^{36+}$	3.00	6.5	4.19	12.4	~0.85	17.4	24
$^{84}{\rm Kr}^{36+}$	2.79	6.5	4.38	13.4	~0.85	18.6	24
$^{115}In^{49+}$	2.77	6.5	5.34	40.4	~7.4	53.	10
$^{129}\mathrm{Xe}^{54+}$	2.72	6.5	5.61 ^{b)}	50.6	~14.6	71.	8
²⁰⁸ Pb ⁸²⁺	2.51	6.36	7.66 ^{b)}	211.4	271.8d)	491.	1.6
238U92+	2.51	6.5	8.37	299.	602.2 ^{d)}	910.	0.9

3. AD детектор

До сих пор не существует теоретических методов, которые позволили бы предсказать поведение дифракционных сечений, поэтому важнейшим источником информации об этих процессах являются экспериментальные данные. Использование детектора AD позволяет исследовать дифракционные процессы при малых поперечных импульсах.

АD (ALICE Diffractive) детектор (рис.50) состоит из двух частей (А и С) расположенных по обе стороны от точки взаимодействия (IP) эксперимента ALICE. Каждая часть представляет из себя двухслойный годоскоп из сцинтилляторов размером 22x22x2,5 см3, установленных возле вакуумной трубы на расстоянии 18 м (сторона A) и 20 м (сторона C) от точки взаимодействия. Свет от сцинтилляторов собирается и передается спектро-смещающим волокном к ФЭУ (fine mesh Hamamatsu PMT R5946, hybrid assembly H6153-70). AD детектор покрывает диапазон псевдобыстрот в интервале $4.8 < \eta < 6.3$ со стороны A и $-7,0 < \eta < -4,9$ со стороны C, что позволяет исследовать дифракционные процессы при малых поперечных импульсах. Детектор AD также используется в эксперименте ALICE для измерения светимости и для мониторинга фоновых событий. Данные с детектора позволяют формировать эффективные тритгера дифракционных событий с большой разницей быстрот частиц, регистрируемых в протонпротонных столкновениях, что позволит исследовать различные процессы дифракции.

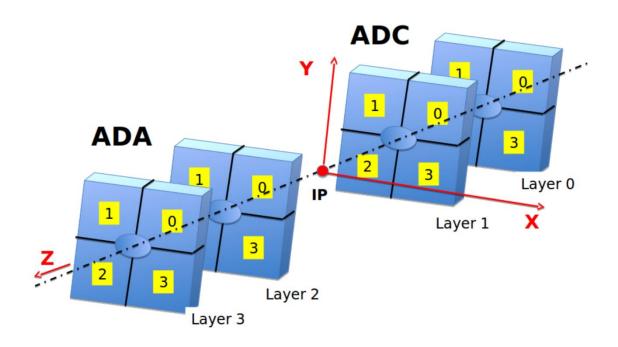


Рисунок 50 - Расположение детекторов ADA и ADC относительно точки взаимодействия пучков.

В ходе сеанса 2018 года проведены новые измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м.. Проводится обработка полученных экспериментальных данных по одиночной, двойной и центральной дифракции, которая включает анализ данных не только с с детекторов ADA и ADC, но и данных центральных детекторов ITS (вершинный детектор), TOF – T0 (время пролетная система), TPC (время проекционная камера) и др.

В рамках программы модернизации детекторных систем установки ALICE проведена работа по подготовке технического проекта нового детектора FDD (Forward Diffraction Detector) на основе работающего детектора AD.

Для проведения тестовых измерений прототипа детектора FDD изготовлены две сцинтилляционные пластины (рис. 51).

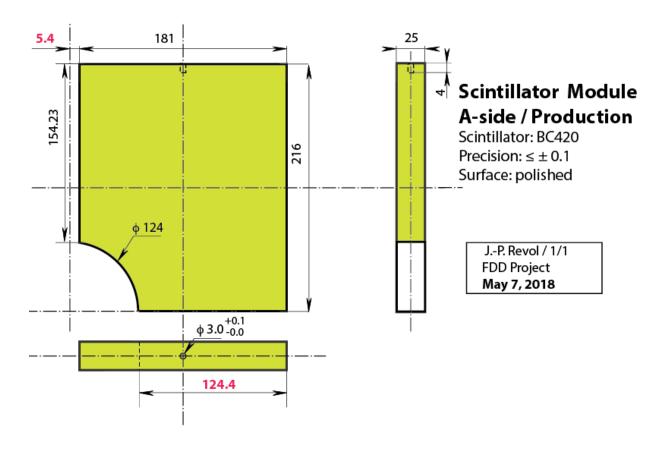


Рисунок 51 - Чертеж сцинтилляционных пластин

Поскольку одной из основных задач при подготовке технического проекта FDD является выбор оптимального типа фотоумножителя, были проведены исследования старения

ФЭУ, которые используются в детекторе AD. Была изучена временная стабильность амплитуды сигнала от одного МИПа для каждого ФЭУ при постоянном напряжении в зависимости от даты рана (рис. 52). Для контроля на рис. 52 приведена корреляция с напряжением (чтобы убедиться, что все измерения произведены при неизменном напряжении на каждом ФЭУ) для каждого канала. Путем линейной аппроксимации, была определена величина падения отклика ФЭУ на 1 МІР за 1 месяц (табл. 7).

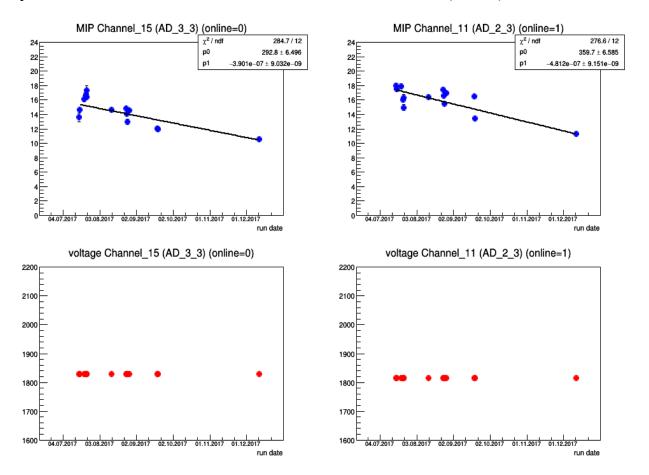


Рисунок 52 - Синий график — зависимость значения амплитуды сигнала от одного МИПа от даты рана (стабильность детектора). Красный график— зависимость напряжения на детекторе AD от даты рана (каналы 0-1).

Таблица 7 - Коэффициенты "старения" ФЭУ (Ch – online номера каналов.)

Ch _{0: $k = -1.01 \pm 0.02 \text{ month}^{-1}$}	$^{\text{Ch}}_{\text{8: k}} = -1.47 \pm 0.03 \text{ month}^{-1}$
Ch _{1: $k = -1.25 \pm 0.02 \text{ month}^{-1}$}	Ch _{9: $k = -2.03 \pm 0.03$ month ⁻¹}
Ch2: $k = -1.31 \pm 0.03$ month -1	Ch10: $k = -1.37 \pm 0.02$ month -1

Ch3: $k = -1.17 \pm 0.02$ month -1	Ch11: $k = -1.35 \pm 0.03$ month -1
Ch4: $k = -1.44 \pm 0.02$ month -1	Ch12: $k = -1.44 \pm 0.03$ month -1
Ch5: $k = -1.20 \pm 0.03$ month -1	Ch13: $k = -1.96 \pm 0.03$ month -1
Ch6: $k = -1.02 \pm 0.03$ month -1	Ch14: $k = -1.42 \pm 0.03$ month -1
Ch7: $k = -1.38 \pm 0.02$ month -1	Ch15: $k = -1.35 \pm 0.02$ month -1

Данные в таблице показывают, как падает за месяц (30 дней) сигнал ФЭУ при отклике на 1 МИП.

В связи с развитием технологий производства ФЭУ было принято решение использовать для детектора FDD новые ФЭУ и провести их исследования на старение, на влияние магнитного поля на работу данного ФЭУ. В процессе тестирования ФЭУ в тестовом стенде использовался в качестве дигитайзера осциллограф LeCroy WaveSurfer 3024. Ввиду того, что данный осциллограф имеет некоторые ограничения, связанные с количеством записей, производимых на внешний носитель, а внутренняя память устройства имеет сравнительно малый объём, была реализована связь с компьютером, используя Ethernet link и MAUI программный интерфейс. Данный подход позволил производить непрерывное считывание данных из осциллографа продолжительное время, фактически ограниченное лишь количеством свободного места на накопителе компьютера. Так же возможно удалённое управление и контроль состояния осциллографа. Это позволяет серьезно упростить тестовый стенд и проводить необходимые измерения.

12. Задача «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)»

Руководитель - в.н.с., канд. физ.-мат. наук Губер Ф.Ф

Исполнители:

ст.н.с., канд. физ.-мат. наук Ивашкин А.П.

ст.н.с., канд. физ.-мат. наук Решетин А.И.

доцент, МИФИ. канд. физ.-мат. наук Селюженков И.В.

(ст. н. с. - 0.5. ставки)

доцент., канд. физ.-мат. наук Тараненко А.В

н.с. Голубева М.Б.

н.с. Морозов С.В.

н.с. Петухов О.А

н.с. Усенко Е.А.

инженер Борисенко Д.С

стажер-исследователь Шабанов А.И.

Установка ХАДЕС (HADES – High Acceptance DiElectron Spectrometer) [1] представляет собой широкоапертурный магнитный спектрометр для идентификации и измерения энергии адронов и электронов/позитронов, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях налетающих ядер 1 - 2 ГэВ на нуклон и в адрон-ядерных взаимодействиях при энергиях до 4 ГэВ.

Геометрически спектрометр разделен азимутально на шесть идентичных секторов, которые определяются расположением обмоток сверхпроводящего тороидального магнита, и перекрывают область полярных углов в диапазоне от 18° до 88° и практически полный азимутальный угол. Поперечное сечение двух противоположных секторов показано на рис. 53. При такой геометрии аксептанс установки в области промежуточных быстрот для дилептонных пар достаточно большой и составляет ~ 40%.

Для идентификации и измерения импульсов заряженных частиц спектрометр имеет несколько детекторных подсистем. Электроны и заряженные адроны — пионы, каоны, протоны и более тяжелые заряженные фрагменты идентифицируются по времени пролета частиц между стартовым детектором, расположенным перед мишенью и двумя системами RPC и TOF, расположенными после магнита. RPC — резистивные плоскостные камеры имеют временное разрешение порядка 80 пс [2], а сцинтилляционный годоскоп TOF [3] - порядка 180 пс. Это позволяет с высокой эффективностью идентифицировать заряженные частицы в столкновениях тяжелых ядер.

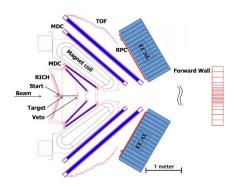


Рисунок 53 - Схема установки ХАДЕС

Для идентификации электронов, помимо описанной выше времяпролетной системы, используется кольцевой черенковский пороговый детектор (RICH), расположенный в области вокруг мишени, отсутствует где магнитное поле. Дополнительно, также для этой цели, в области передних углов ранее использовался предливневый детектор (SHOWER), который настоящее время заменен на электромагнитный калориметр – ECAL.

Измерение импульсов заряженных частиц и их углов вылета из мишени обеспечивается трековой системой детекторов, состоящей из сверхпроводящего тороидального магнита и набора из четырех плоскостей мини дрейфовых камер (MDC). Камеры измеряют положение и направление движения заряженных частиц до и после области магнитного поля. Из отклонения траекторий в магните определяется импульс каждой частицы. Данная система обеспечивает импульсное разрешение для заряженной частицы с точностью порядка 1 %.

Еще одной важной детекторной системой установки ХАДЕС является передний многоканальный сцинтилляционный годоскоп FW (Forward Wall) [4]. Годоскоп

располагается на расстоянии 7 м от мишени и перекрывает область полярного угла от 0,33 до 7,17 градусов. Основные частицы, попадающие в него, это спектаторы - фрагменты пучка, которые не взаимодействовали в мишени. Передний сцинтилляционный годоскоп предназначен для измерения геометрии ядро-ядерных столкновений, центральности и угла плоскости реакции. Этот годоскоп был впервые использован на установке ХАДЕС для идентификации *пр* взаимодействий при исследовании образования электронпозитронных пар в *dp*-реакции при энергии налетающих дейтронов 1,24 ГэВ на нуклон [5]. Определяющий вклад в создание, модернизацию и обслуживание этого годоскопа внесла группа ИЯИ РАН. В 2012 г. годоскоп был использован в эксперименте по исследованию образования электрон-позитронных пар в реакции Au+Au при энергии налетающих ядер золота 1,24 ГэВ на нуклон. Основное назначение переднего годоскопа в этом эксперименте состояло в определении плоскости реакции при пособытийном анализе данных для анализа потоков заряженных частиц в данной реакции.

В предстоящем в марте 2019 года физическом сеансе на ускорителе ионов SIS18 передний сцинтилляционный годоскоп будет использоваться для определения центральности соударений в мишени и измерении угла плоскости реакции на пучке ионов серебра с энергией 1,65A ГэВ (Ag + Ag).

Конструктивно передний сцинтилляционный годоскоп представляет собой плоскость, собранную из отдельных ячеек. Каждая детекторная ячейка переднего годоскопа состоит из следующих функциональных элементов (см. рис. 54): пластмассового сцинтиллятора ВС408 (1), «воздушного» световода с корпусом из алюминиевого сплава с полированной внутренней светоотражающей поверхностью (2), ФЭУ типа XP2982 для детекторных ячеек малого размера и ФЭУ типа XP2262 для детекторных ячеек среднего и большого размеров (3) и делителя высокого напряжения для питания ФЭУ (4).

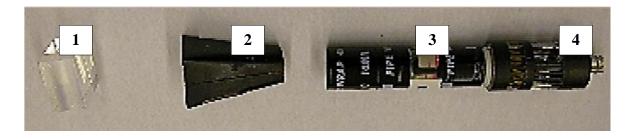


Рисунок 54 - Функциональные элементы сцинтилляционной детекторной ячейки переднего годоскопа FW.

На рис. 55, слева, показана схема годоскопа. Годоскоп состоит из 288 ячеек – 140 ячеек в центральной области годоскопа с поперечным размером ячеек 4 см х 4 см, 64 ячеек в центральной области годоскопа с поперечным размером ячеек 8 см х 8 см и 84 больших ячеек во внешней области годоскопа с поперечным размером ячеек 16 см х 16 см. Толщина сцинтилляторов детекторных ячеек составляет 1" (2,54 см). Материал ячеекпластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола ВС408. По оси пучка годоскопа расположено квадратное отверстие размером 8×8 см² для пропускания наиболее тяжелых фрагментов пучка. Полный поперечный размер переднего сцинтилляционного годоскопа FW установки ХАДЕС составляет 180 × 180 см². На рис. 55, справа показана фотография внешнего вида годоскопа FW, собранного и установленного на специальной платформе. Платформа позволяет перемещать годоскоп и выставлять его на нужной дистанции от точки взаимодействия пучка с мишенью. Модули высоковольтного питания (HV) также расположены на передвижной платформе. Управление высоким напряжением, измерение токов потребления ФЭУ каждой ячейки осуществляется системой мониторинга медленных параметров (slow control), реализованной в среде EPICS. Симметричное расположение ячеек сцинтилляционного годоскопа было выбрано для оптимизации аксептанса и уменьшения вклада систематических ошибок в определение угла плоскости реакции.

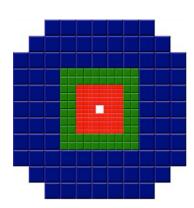




Рисунок 55 - Слева - схема расположения сцинтилляционных детекторных ячеек на плоскости годоскопа. Справа - общий вид плоскости переднего годоскопа FW установки XAДЕС.

Годоскоп FW был протестирован группой ИЯИ РАН в 2018г. на космических мюонах после большого перерыва в физических сеансах. Необходимость проверки переднего годоскопа была связана с тем, что часть ячеек годоскопа показала неустойчивую работу в предыдущих экспериментальных сеансах. Было установлено, что основные проблемы связаны нестабильной работой ФЭУ c В нескольких сцинтилляционных ячейках вблизи оси пучка, где интенсивность загрузки детекторов является максимальной. В процессе тестов выяснилось также, что некоторые ФЭУ вообще не работают и требуют замены. Замена была произведена на ФЭУ, аналогичные установленным.

Проверка ячеек годоскопа была выполнена посредством регистрации энерговыделений от космических мюонов, проходящих через годоскоп в вертикальном направлении. С этой целью был организован триггер, требующий срабатывания по крайней мере 3 сцинтилляционных ячеек годоскопа. Таким образом, триггер выбирал космические мюоны, проходящие преимущественно в вертикальной плоскости годоскопа.

Полная информация по всем ячейкам годоскопа представлена на Рис. 56, где слева показано распределение по количеству отсчетов в сработавшей ячейке. Для ячеек с номерами 1-144 скорость счета ниже, т.к. в этом случае площадь ячейки для проходящих через нее космических мюонов меньше и, соответственно, меньше вероятность получить сигнал в данной ячейке годоскопа. Двумерное распределение амплитудных спектров всех ячеек годоскопа показано на рис. 56, справа. Видно, что спектры ячеек годоскопа с одинаковыми размерами похожи друг на друга и в целом не выбиваются за пределы ожидаемых распределений. Спектры космических мюонов затем будут использованы для амплитудной калибровки ячеек в эксперименте на ионном сеансе.

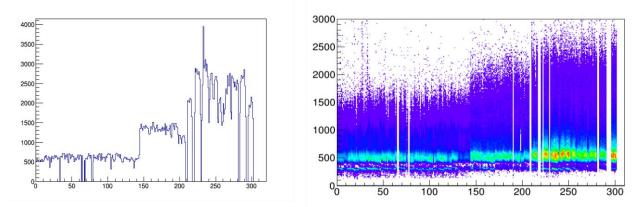


Рисунок 56 - Слева, скорости счета в сцинтилляционных ячейках годоскопа в зависимости от номера ячейки. Справа, двумерное распределение амплитудных спектров космических

Анализ данных показал, что в целом передний годоскоп полностью подготовлен группой ИЯИ РАН к физическому сеансу, который состоится в марте 2019г.

Другим важным направлением работы группы ИЯИ РАН в ХАДЕСе в 2018 г. было продолжение работы по созданию и тестированию нового электромагнитного калориметра (ECAL), дополняющего и расширяющего экспериментальные возможности дилептонного спектрометра ХАДЕС. Этот ECAL позволит выполнить точные измерения инклюзивных сечений рождения π^0 -, η -мезонов и фотонов в столкновениях тяжёлых ионов, а также улучшить разделение электронов (позитронов) и пионов с импульсами, большими 400 МэВ/с в измерениях спектров инвариантных масс дилептонных пар в эксперименте ХАДЕС в энергетической области SIS18 и в будущем на SIS100 (FAIR). ECAL, состоящий из 978 черенковских детекторных модулей с радиаторами на основе свинцового стекла [6-8], которые сгруппированы в 6 секторов по 163 модуля в каждом секторе. Калориметр перекрывает переднюю область азимутальных углов в диапазоне $16^0 < 0 < 45^0$ и заменяет в эксперименте ХАДЕС Pre-Shower-детектор. Схема ЕКАЛ показана на Рис. 57. Общая эффективная рабочая площадь ECAL составляет около 8 м².

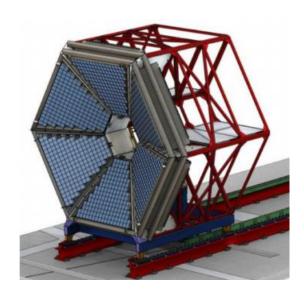


Рисунок 57 - Схема конструкция электромагнитного калориметра ECAL на установке XAДЕС.

Каждый черенковский детекторный ECAL-модуль (рис. 58) состоит из радиаторного блока из свинцового стекла CEREN25 (1) размером $92 \times 92 \times 420$ мм, обернутого бумагой фирмы Tyvek (2), ФЭУ (3) с защитной алюминиевой крышкой (4), корпуса детекторного модуля из латуни (5) и цилиндрического магнитно-защитного экрана из сплава на основе Ni (6), изготовленного фирмой Aaronia (Germany). Свинцовое стекло CEREN25 имеет следующие основные свойства: радиационная длина $(X_0) - 2,51$ см, показатель преломления -1,708 (при $\lambda = 400$ нм) и радиус Мольера -3,6 см.

При прохождении релятивистской частицы через радиатор из свинцового стекла развиваются электромагнитный или адронный ливни. Частицы ливня излучают в радиаторе черенковский свет, который регистрируется ФЭУ. Амплитуда выходного сигнала пропорциональна энергии первичной частицы (лептона или фотона).

В основном, модули ECAL укомплектованы ФЭУ Hamamatsu R6091 (3-дюймовый фотокатод). ФЭУ THORN EMI (1,5-дюймовый фотокатод) используются в некоторых модулях из-за проблем с финансированием закупки новых ФЭУ Hamamatsu R6091.

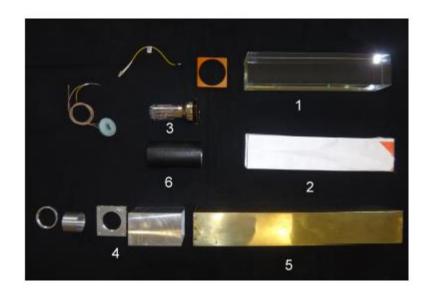


Рисунок 58 - Конструкция черенковского детекторного ЕСАL-модуля:

1 – радиаторный блок из свинцового стекла CEREN25; 2 – бумага фирмы Tyvek; 3 – ФЭУ; 4 – защитная алюминиевая крышка; 5 – корпус детекторного модуля из латуни; 6 – цилиндрический магнитно-защитный экран из сплава на основе Ni, изготовленного фирмой Aaronia (Germany).

Каждый ЕСАL-модуль тестировался в 2018г. на 2-х стендах, созданных группой ИЯИ в GSI: в детекторной лаборатории GSI и на ХАДЕС после установки модуля на специальной платформе ECAL. В тестах на космических мюонах в детекторной лаборатории GSI отбирались космические мюоны, проходящие через радиатор в вертикальном направлении. Пи этом, подбирались значения рабочего HV-напряжения на ФЭУ Нататать R6091 и THORN EMI 9903, исходя из требуемой величины средней амплитуды сигнала -1500 мВ, в условиях регистрации космического излучения и световых импульсов от LED-оптической системы. Для каждого модуля была проведена оценка амплитудного разрешения спектра космических частиц.

После монтажа модулей уже непосредственно на установке ХАДЕС, были проведены дополнительные тестирования ЕСАL-модулей на космических мюонах. Для этих тестов был использован испытательный стенд, состоящий из NIM триггерной электроники, анализатора аналоговых сигналов CAEN Desktop Digitizer DT5742 и CAEN HV-системы высоковольтного питания. В этом тесте с помощью триггера отбирались космические мюоны, которые, в основном, проходили поперек модулей калориметра, т.е. их путь в модуле был примерно в 4 раза меньше, чем тестах в лаборатории. Сравнение результатов испытаний ECAL-модулей в детекторной лаборатории GSI (модули испытывались в вертикальном положении) и в ECAL-секторах на установке ХАДЕС (модули — в полу-горизонтальном положении) представлено на рис. 59. Видно, что отношение зарядовых величин, измеренных в детекторной лаборатории GSI и в ECAL-секторах на ХАДЕСе соответствует отношению (около 4) толщины радиаторов в этих двух положениях модулей.

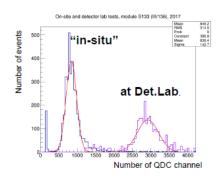


Рисунок 59 - Сравнение результатов испытаний одного из ECALмодуля в детекторной лаборатории GSI (модули испытывались в вертикальном положении) и в ECAL-секторах

установленных на ХАДЕСе (модули – в полу-горизонтальном положении).

В стендовых испытаниях на космическом излучении проведена оценка энергетического разрешения детекторных ЕСАL-модулей, которое определялось по интегральным зарядовым спектрам. Энергетическое разрешение ЕСАL-модуля с 3-дюймовым ФЭУ составило 8-9%, а энергетическое разрешение ЕСАL-модуля с 1,5-дюймовым ФЭУ составило 11-19% для интегральных спектров. Выполненные ранее тесты детекторных ЕСАL-модулей на пучке фотонов в МАМІ (University Mainz, Germany) [8] и детальное моделирование показали, что энергетическое разрешение ЕСАL составляет (5 - 6) % / $\sqrt{(E(GeV))}$, что позволит провести идентификацию η -мезонов в предстоящем эксперименте по столкновению ядер Ag + Ag, а также в будущих экспериментах на ускорителе SIS100 по столкновению ядер Ni + Ni в диапазоне энергий 2 - 8 A GeV.

Таким образом, в 2018г. четыре сектора ECAL (из шести) были полностью протестированы, установлены на установке XAДЕС и подготовлены к проведению в марте 2019 г. Ag-Ag сеанса при энергии пучка 1,65 A GeV.

Список цитируемой литературы

- [1] The High-Acceptance Dielectron Spectrometer HADES. G. Agakishiev et al,. Eur.Phys.J.A41:243-277,2009.
- [2] D. Belver et al., Nucl.Instrum.Meth.A602:687-690, 2009.
- [3] Agodi, et al., Nucl.Instrum.Meth. A492 (2002) 14-25.
- [4] О.В. Андреева, М.Б. Голубева, Ф.Ф. Губер, А.П. Ивашкин, А.Б. Курепин, А.И. Решетин, А.С. Садовский, Е.А. Усенко, Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС, ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2014, № 2, с. 13-30, DOI: 10.7868/S0032816214020141
- [5] К. Lapidus, диссертация «Образование электрон-позитронных пар в квазисвободных нейтрон-протонных столкновениях», http://www.dissercat.com/content/obrazovanie-elektron-pozitronnykh-par-v-kvazisvobodnykh-neitron-protonnykh-stolknoveniyakh.
- [6] Svoboda O, Blume C, Czyžycki W *at al* 2014 Electromagnetic calorimeter for the HADES@FAIR experiment *Journal of Instrumentation* 9 C05002

- [7] Czyžycki W at al 2011 Electromagnetic Calorimeter for HADES arXiv: 1109.5550
- [8] P. Rodriguez-Ramos et al. Electromagnetic Calorimeter for HADES Experiment, EPJ Web of Conferences **81**, **06009** (2014).

13. Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке СВМ в GSI»

Руководитель: в.н.с., канд. физ.-мат. наук Губер Ф.Ф

Исполнители:

с.н.с., канд. физ.-мат. наук Ивашкин А.П.

доцент, МИФИ. канд. физ.-мат. наук Селюженков И.В.

(ст. н. с. - 0.5. ставки)

н.с. Голубева М.Б.

н.с. Морозов С.В.

н.с. Петухов О.А

н.с. Усенко Е.А.

мнс Финогеев Д.А.

стажер-исследователь Известный А.В.

Студент 5к МФТИ, лаборант ИЯИ Карпушкин Н.М.

аспирант МИФИ (0.5 ставки м.н.с) Каширин Е.П.

Установка СВМ [1] представляет собой магнитный спектрометр, состоящий из сверхпроводящего магнита, ряда детекторных систем для идентификации типа частиц и определения их импульсов, электромагнитного калориметра, а также переднего адронного калориметра — PSD (Projectile Spectator Detector), рис. 60. Передний адронный калориметр PSD [2] планируется использовать в экспериментах на установке СВМ для пособытийного определения центральности, а также ориентации плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях с хорошей точностью, что необходимо для проведения исследований анизотропии азимутальных потоков частиц, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях

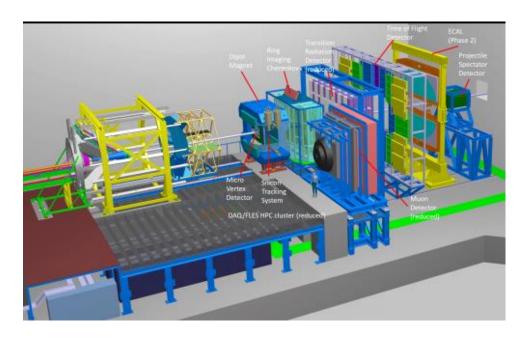
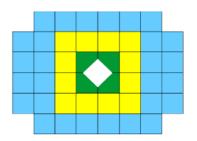


Рисунок 60 - Общий вид установки СВМ.

PSD — это модульный адронный калориметр, состоящий из 44 отдельных модулей (рис. 61, слева) с отверстием ромбовидной формы (200 х 200 мм²) в центральной части калориметра для прохождения налетающего пучка ядер [2]. Каждый модуль адронного калориметра (рис. 61, справа) имеет поперечный размер 20 х 20 см² и состоит из 60 слоев пластин свинца с толщиной 16 мм 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.



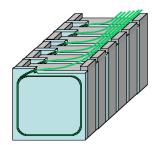


Рисунок 61 - Схема общего вида переднего адронного калориметра (слева) и схема отдельного модуля PSD (справа).

Свет с каждой из 60 сцинтилляционных пластин в модуле собирается с помощью спектросмещающего оптоволокна Kuraray 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 HAMAMATSU MPPC S12572-010P для считывания света с 10 секций модуля. Такая продольная сегментация модуля из 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. Фотография одного из собранных в ИЯИ модулей (без верхней крышки), на которой видна структура модуля, показана на рис.62.



Рисунок 62 - Фотография одного из собранных модулей (без верхней крышки). На переднем плане видны оптические разъемы с вклеенными оптоволокнами.

Конструкция калориметра и его характеристики подробно описаны в Техническом проекте переднего адронного калориметра установки СВМ [2].

В 2018 г. были проведены измерения световыхода с продольных секций каждого модуля адронного калориметра на космических мюонах. Эти измерения необходимы для

проверки качества собранных модулей, а также для разработки методики энергетической калибровки модулей калориметра, которая будет проходить непосредственно перед экспериментами на установке СВМ.

Для измерения световыхода с собранных секций модуля адронного калориметра на космических мюонах в ИЯИ был создан специальный стенд и измерялся световыход с каждой отдельной секции модулей калориметра с помощью специально разработанной методики отбора треков мюонов в секциях калориметра. Усредненный по 40 модулям световыход в продольных секциях представлен на рис. 63. Зигзагоподобная зависимость световыхода от номера секции в модулях обусловлена затуханием света в оптоволокне и и особенностью сбора света оптоволокном со сцинтилляцилнных пластин калориметра. Средний световой выход по всем секциям 40 измеренных модулей составляет около 45 фотоэлектронов, что позволяет надежно проводить энергетическую калибровку модулей калориметра с помощью частиц с минимальной ионизирующей способностью.

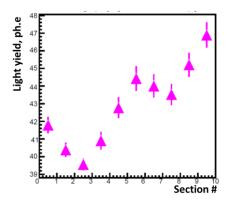


Рисунок 63 - Усредненный по 40 модулям световыход в продольных секциях.

В 2018 г. было продолжено исследование отклика супермодуля адронного калориметра СВМ на пучках протонов и пионов в диапазоне импульсов 2-5 ГэВ/с в ЦЕРНе на тестовом пучке Т10. Данный диапазон энергий особенно важен также для эксперимента ВМ@N, Дубна, где будет использоваться часть модулей СВМ калориметра.

Супермодуль калориметра был собран в 2018 г. и состоит из 9 изготовленных модулей PSD с поперечными размерами $20x20 \text{ см}^2$, собранных в сборку сборки 3x3. Поперечный размер супермодуля составляет $60x60 \text{ см}^2$, продольная длина каждого модуля равна 5,6 λ , что достаточно для того, чтобы большая часть энергии адронного ливня выделялась внутри калориметра. Общий вес супермодуля составляет около 4,5 тонн.





Рисунок 64 - Слева - фото супермодуля PSD. Справа - фотография супермодуля PSD на канале T10.

Энергетическая калибровка всех 10 секций в каждом из 9 модулей выполнялась с помощью мюонов от распада пионов в канале транспортировки. Полученные результаты измерений [3, 4] энергетического разрешения и линейности отклика супермодуля PSD для протонов и пионов на пучке T10 в диапазоне энергий 1-5 ГэВ были объединены с измеренными ранее данными на пучке T9 с энергиями протонов до 10 ГэВ. Объединенные результаты измерений в полном диапазоне энергий 1-10 ГэВ/с представлены на рис. 65. Энергетическое разрешение супермодуля находится в хорошем согласии с разрешением, измеренным ранее для одного модуля [6] и с предсказаниями Монте-Карло расчетов.

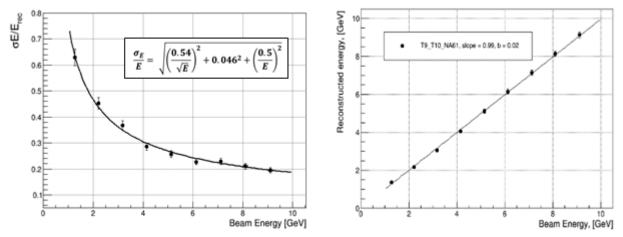


Рисунок 65 - Справа - энергетическое разрешение супермодуля PSD для протонов как функция энергии частиц. Слева - линейность отклика супермодуля для протонов

Результаты проведенных измерений показывают, что адронный калориметр установки СВМ, собранный из модулей со слоистой свинцово-сцинтилляционной структурой с отношением толщин 4:1, и с выбранным способом считывания сигналов с использованием микропиксельных лавинных фотодиодов, удовлетворяет требованиям эксперимента СВМ.

Ожидаемые загрузки модулей адронного калориметра в экспериментах СВМ и mCВМ предъявляют повышенные требования к скорости считывания и надежности электроники, которая будет использоваться для считывания и обработки сигналов с секций калориметра. Электроника калориметра должна обеспечивать считывание 440 каналов со секций калориметра скоростью до 1МГц. При этом, считывание должно проводиться в режиме без триггера, то есть пакетами через определенные временные промежутки.

Для изучения различных типов электроники, удовлетворяющих данным требованиям, группой ИЯИ в 2018г. были протестированы два основных типа электроники считывания: электроники с прямым считывание сигнала и электроники со считыванием предварительно обработанного сигнала. В тестах супермодуля калориметра (90 каналов считывания) на пучках адронов в 2018г. качестве основного варианта электроники с непосредственным сбором сигнала использовались 2 модуля потоковых АЦП ADC64s2, разработанные в ОИЯИ, Дубна) [5], и интегрированные с ПЛИС в качестве элемента, на котором собрана схема опроса АЦП, настройки параметров сбора данных и алгоритмов передачи данных по стандартным и собственным протоколам обмена данных.

Данный модуль считывающей электроники предназначен для оцифровки и сбора данных в виде осциллограмм (waveform), с заданными параметрами длины осциллограммы и несколькими функциями оптимизации. Используемые в тестах платы FEE были доработаны и дополнены дифференциальным усилителем, который содержал также цепи интеграторов, позволяющие варьировать длину импульса, поскольку время оцифровки платы ADC64s2 ограничено 16 нс на одно измерение. Длина импульса после интегрального дифференциального каскада составило порядка 200нс, что дает 12 отсчетов на импульс.

Для текущей версии модуля ADC64s2 максимальная скорость считывания 64 каналов составляет всего 40 кГц с учетом того, что максимальная пропускная способность протокола Ethernet составляет 1 Гбит/с, точность оцифровки 12 бит и для восстановления формы сигнала используется 10 точек отсчетов (160нс).

Для выполнения требований по скорости считывания в эксперименте СВМ(1МГц) необходимо модифицировать модуль с тем, чтобы использовать возможности предварительной обработки данных внутри ПЛИС (FPGA). Такая считывающая электроника для сбора данных разработана для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA и представляет собой 64-канальный модуль SADC на основе АЦП и ПЛИС (FPGA). Модуль SADC выполнен по схеме со считыванием модулем ПЛИС потоковых АЦП, при этом внутри ПЛИС осуществляется предварительная обработка осциллограммы и определяются основные параметры формы сигнала, наложения импульсов (pile-up) и конечные данные выдаются на выходной интерфейс. В настоящее время разработан модуль SADC, который обеспечивает оцифровку сигнала со скоростью 80 МС/с. Разрабатывается модуль со скоростью оцифровки 125 МС/с. Текущая версия SADC использует собственный протокол SODAnet. Группа ИЯИ в 2018г. начала работы по адаптации этого модуля для считывания сигналов с модулей адронного калориметра СВМ и начала работу по перепрограммированию ПЛИС таким образом, чтобы использовать протокол TRBnet или протокол и интерфейс GBT в эксперименте CBM. Скорости работы протоколов: GBT 3.2 Гбит/с, TRBnet 1.024 Гбит/с. Это дает скорость счета текущей версии модуля SADC до 0.5МГц при считывании всех 64 каналов. Применяя фильтры для подавления каналов, где отсутствует полезный сигнал, или увеличивая пропускную способности интерфейса в будущей версии модуля SADCдо 4.8 Гбит/с скорость считывания будет соответствовать требованиям эксперимента СВМ.

Другим методом чтения каналов калориметра является предварительное преобразование сигнала от фотодетектора во временной импульс и последующее его чтение при помощи высокоточного ВЦП. В качестве ВЦП было предложено использовать разработанный в GSI (Дармштадт) модуль-плату TRB3. Данная плата позволяет осуществлять чтение и определение длины импульса 256 каналов с точностью <20пс. При этом скорость потокового считывания может достигать 50МГц (пакеты до 63 значений). Интерфейс на основе SFP позволяет читать со скоростью до 2Гбит/с.

Для преобразования импульса сигнала с секции калориметра в ИЯИ РАН был разработан и сконструирован модуль специализированной электроники ТоТ. При этом длительность сигнала на выходе дискриминатора определяется величиной амплитуды входного сигнала. Параметры входной цепи определялись и настраивались таким образом, чтобы с одной стороны, обеспечить чувствительность к малым амплитудам (МІР), а с другой - не перегрузить канал шумами от низкого порога. При этом, длительность

сформированного сигнала в пределах амплитуд до 1В не превышает 100нс, что дает большой запас по динамическому диапазону канала электроники на основе ТоТ метода. Нелинейный отклик на больших амплитудах позволяет работать в диапазоне до нескольких вольт и со скоростью отклика канала в пределах параметров, заданных требованиями эксперимента СВМ (1МГц).

В 2018г. ИЯИ РАН на тестовом пучке Т10 в ЦЕРНе провел исследования отклика одного модуля калориметра PSD в котором в качестве фотодетекторов использовались 10 микропиксельных лавинных фотодиодов Нататаstu S12572-010Р предварительно облученные суммарным потоком нейтронов 2х10¹¹ нейтронов/ст². Эти измерения очень важны для эксперимента СВМ, т.к. модули калориметра установки СВМ с пучковым отверстием диаметром 200 мм, получат именно такие потоки в процессе эксперимента на установке СВМ как было показано в проведенном ИЯИ РАН совместно с ГСИ моделировании потоков нейтронов на задней торцевой поверхности калориметра в месте расположения фотодиодов с помощью программы FLUKA. Облучение партии из 10 фотодиодов фотодиодов таким потоком нейтронов было проведено чешскими членами коллаборации СВМ на пучке циклотрона ядерного исследовательского института (Rez, Чехия). Было показано, что энергетическое разрешение модуля адронного калориметра с облученными фотодиодами лишь незначительно ухудшается (в пределах 10%) по сравнению с необлученными фотодиодами [6, 7].

В течение 2018г. группа ИЯИ РАН занималась вопросами подготовки к эксперименту mCBM в рамках программы ФАИР-фаза-0 на действующем ускорителе SIS18 в ГСИ [8]. Цель этого эксперимента – проведение тестовых измерений отдельных уже изготовленных элементов всех детекторных систем СВМ на пучке ионов золота с интенсивностью порядка 10⁸ ионов в секунду в условиях высоких загрузок и радиационных условиях максимально приближенных к ожидаемым на СВМ, а также интеграция всех детекторных систем установки СВМ в общую систему сбора данных, которая будет использоваться на СВМ, отработка методов считывания и анализа полученных экспериментальных данных.

ИЯИ РАН готовит к использованию в этом эксперименте один из уже изготовленных модулей адронного калориметра (mPSD) [9]. Ввиду очень ограниченных размеров помещения, в котором будет размещаться установка mCBM, вопросы механической интеграции mPSD в эту установку были первоочередной задачей, которой

группа ИЯИ занималась в 2018 г. В настоящее время, согласовано размещение mPSD на mCBM.

Список цитируемой литературы

- [1] <u>CBM</u> Collaboration (<u>T. Ablyazimov</u> (<u>Dubna, JINR</u>),..., O. Andreeva, D.Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, O.Karavichev, T.Karavicheva, V. Klochkov, A. Kurepin, N.Kurepin, A.Maevskaya, S. Morozov, O. Petukhov, I.Pshenichnov, A.Reshetin, A. Sadovsky, I. Selyuzhenkov, M. Strikhanov, A. Taranenko, N.Topil'skaya, E.Usenko,..., <u>et al.</u>). Challenges in QCD matter physics --The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR, Eur.Phys.J. A53 (2017) no.3, 60, DOI: <u>10.1140/epja/i2017-12248-y</u> e-Print: <u>arXiv:1607.01487</u> [nucl-ex]
- [2] Guber F, et al., Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator https://repository.gsi.de/search?p=id:%22GSI-2015-02020%22
- [3] D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, N. Karpushkin, S. Morozov, A. Reshetin, The PSD CBM supermodule response study for hadrons in momentum range 2 6 GeV/c at CERN test beams, KnE Energ.Phys. 3 (2018) 333-339, DOI: 10.18502/ken.v3i1.1763
- [4] N.Karpushkin, D.Finogeev, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Izvestnyy, V.Ladygin, S.Morozov, A.Kugler, V.Mikhaylov, A.Senger, for the CBM collaboration, The Projectile Spectator Detector for measuring the geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment on FAIR, Принята в печать, NIM A, https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.054
- [5] http://afi.jinr.ru
- [6] Golubeva M, Guber F, Ivashkin A et al., An Experimental Study of the Hadron Calorimeter Module Response to Protons and Pions with Energies of 1–5 GeV, Instruments and Experimental Techniques, 2014, Vol. 57, No. 6, pp. 651–657
- [7] V. Mikhaylov^{a,b}, F. Guber^c, A. Ivashkin^c, A. Kugler^a, V. Kushpil^a, S. Morozov^c, O. Svoboda^a, P. Tlusty^{a,} Radiation hardness of Silicon Photomultipliers for CBM@FAIR, NA61@CERN and BM@N experiments, Nucl.Instrum.Meth. A912 (2018) 241-244, https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.066
- [8] C.Sturm et al. mCBM@SIS18, mcBM@SIS18, mcBM@SIS18, mcBM@SIS18, mcBM@SIS18, <a href="http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/experiments/CBM/documents/mcbm-proposal2GPAC-WebVersion0619-SVN7729.pdf

14. Задача «Эксперимент MPD/NICA»

Руководитель - с.н.с., канд. физ.-мат. наук Ивашкин А.П.

Исполнители:

в.н.с., канд. физ.-мат. наук Губер Ф.Ф

доцент, МИФИ. канд. физ.-мат. наук Тараненко А.В. (с.н.с. - 0.5. ставки)

н.с. Голубева М.Б.

н.с. Морозов С.В.

н.с. Петухов О.А

стажер-исследователь Известный А.В.

стажер-исследователь Парфенов П.Е.

Студентка 6к МФТИ, лаборант ИЯИ Тимошенко А.О.

Студент 5к МФТИ, лаборант ИЯИ Стрижак А.О.

В 2018 г. в рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки МРD/NICA. Полностью завершен технический проект калориметра. На завершающую стадию вышло создание адронного калориметра. Данный калориметр является одними из основных компонентов экспериментальных установок и предназначен для измерения геометрии столкновений тяжелых ионов в пучках ускорительного комплекса НИКА. Измерения энергетических и пространственных распределений невзаимодействующих нуклонов налетающих ядер (спектаторов) в калориметрах дают уникальную возможность определения центральности ядро-ядерных столкновений, плоскости реакции, а также чувствительных к свойствам горячей области столкновений импульсов отдачи спектаторов. Параллельно с изготовлением свинцово-сцинтилляционных модулей калориметров разрабатывается схема съема сигналов и система управления параметрами калориметров. Комплексный подход в разработке всех элементов детектора позволит

легко интегрировать адронные калориметры в глобальные системы сбора данных экспериментов BM@N и MPD.

В создании адронного калориметра используются современные технологии захвата и транспортировки фотонов в переизлучающих оптоволокнах. Разработанные методы позволяют собирать световое излучение одновременно с десятков сцинтилляционных пластин большого размера и транспортировать фотоны к компактным фотодетекторам, размещенным в задней части калориметра. В качестве детекторов света используются новейшие микропиксельные лавинные фотодиоды, способные детектировать сверхслабые световые сигналы на уровне одиночных фотонов.

Каждый модуль калориметра представляет собой многослойную структуру с перемежающимися слоями пассивного абсорбера адронного ливня (сурьмяно-свинцовый сплав) и пластин органического сцинтиллятора, измеряющими энергию частиц в ливне, рис. 66. Всего калориметр включает 90 индивидуальных модулей.



Рисунок 66 - Слева - фото модуля калориметра в процессе сборки. Справа — фото нескольких собранных модулей адронного калориметра.

В первой половине 2018 г. были изготовлены и поставлены четыре партии сцинтилляционных пластин. Были измерены световыходы отдельных пластин в каждой из партии, рис. 67. Измерение параметров отдельных сцинтилляционных пластин для адронного калориметра проводилось с целью контроля качества пластин для их дальнейшего использования в составе секций модулей калориметров. Для съема и транспортировки света в пластинах использовались переизлучающие оптоволокна фирмы

Кигагау (Япония) типа Y11(200) S-type диаметром 1 мм. В калориметре используются пластины размером 15x15x0.4 см³ с оптоволокном, вклеенным в канавку спиралью. Глубина канавки составляет 1.2 мм.



Рисунок 67 - Внешний вид тестовых сцинтилляционных пластин для модулей адронного калориметра MPD.

Для измерения световыхода отдельных сцинтилляционных пластин был создан стенд, позволяющий проводить измерения с источником β -излучения Sr^{90} . В работе использовался фотодетектор HAMAMATSU MPPC S12572-010P размером 3x3 мм с паспортным усилением 1.35×10⁵, снабженный индивидуальным предусилителем с коэффициентом усиления 300. Питание фотодиода осуществлялось от лабораторного источника питания АКИП-1124. Рабочее напряжение фотодиода, при котором проводились измерения составляло 70.87 В. Для контроля работы диодов в цепь был включен мультиметр Fluke 116 в режиме измерения малых токов. В качестве источника питания предусилителя напряжением +/- 6 В был использован крейт КАМАК. Для отбора событий, вызванных попаданием в исследуемую пластину электронов, под образцом пластины был установлен фотоэлектронный умножитель HAMAMATSU R7525 с пластмассовым сцинтиллятором диаметром 25 мм на основе полистирола, питаемый от отдельного источника высокого напряжения CAEN Mod.N126. Сигналы от предусилителя и ФЭУ подавались на входные каналы быстрого 16+1 канального АЦП CAEN DT 5742, имеющего частоту дискретизации 5 ГГц. Для запуска АЦП использовался сигнал с ФЭУ. Оцифрованные сигналы считывались через шину USB и обрабатывались с помощью вычислительно-обрабатывающего пакета ROOT.

При прохождении через исследуемую пластину частицы, в сцинтилляторе возникает Фотоны, захватываемые спектросмещающим вспышка света. оптоволокном, микропиксельным фотодиододом (кремниевым регистрируются лавинным фотоумножителем, SiPM). Для увеличения световыхода, противоположный конец оптоволокна был покрыт слоем специальной светоотражающей краски на основе серебра. В процессе измерения световыхода записывались зарядовые спектры с лавинного фотодиода, полученные при регистрации электронов, проходящих через исследуемую пластину и запускающий счетчик с ФЭУ, в зависимости от положения запускающего счетчика. Величина полного заряда, зарегистрированного фотодиодом, определялась программой обработки сигналов.

Величина среднего заряда определялась аппроксимацией спектра функцией Гаусса. Четко выраженные одноэлектронные пики в амплитудных распределениях позволили надежно прокалибровать шкалу АЦП в абсолютных единицах (количестве фотоэлектронов). Расстояние между пиками соответствует одному фотоэлектрону, что позволяет определить величину среднего заряда, выраженную в фотоэлектронах.

Измеренные световыходы пластин для модулей калориметра MPD имеют достаточно равномерную зависимость от точки попадания частиц с незначительным увеличением световыхода вблизи точки пролегания оптоволокна. Среднее значение световыхода составляет около 9.5 фотоэлектронов. Для одной секции калориметра, состоящей из 6 сцинтилляционных пластин, световыход от частиц с минимальной (MIP) ионизирующей способностью будет составлять несколько десятков фотоэлектронов. Данный световыход позволяет выполнить надежную энергетическую калибровку секций калориметра с помощью космических мюонов. Качество сцинтилляционных пластин признано удовлетворительным ДЛЯ дальнейшего использования в модулях адронного калориметра.

После сборки модулей основное внимание уделялось тестированию изготовленных модулей калориметра с помощью космических мюонов. Данное тестирование имеет двойную задачу. Первое, необходимо осуществлять постоянный контроль за качеством собранных модулей калориметра. Второе, необходимо разработать методику калибровки продольных секций модулей калориметра с помощью космических лучей. Основной задачей в данном исследовании является отбор космических мюонов с заданной геометрией треков.

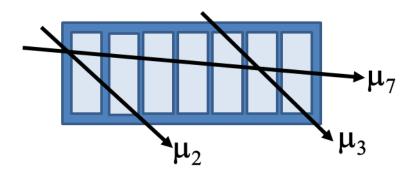


Рисунок 68 - Геометрии треков мюонов, проходящих через продольные секции калориметра и используемые для исследования световыхода. Данные геометрии соответствуют трекам космических мюонов, проходящих через все секции модуля (горизонтальные мюоны), две секции и три секции модуля (наклонные треки).

Для измерения световыхода каждой отдельной секции калориметра можно использовать мюонные треки трех классов, рис. 68:

- 1) События, в которых мюон проходил через все 10 секций (горизонтальные мюоны). В этом случае можно провести измерения сразу во всех секциях. Отбор событий и выделение их на фоне электронных шумов происходит наиболее надежно. К сожалению, такие события достаточно редкие и за сутки набора данных регистрируется менее 50 горизонтальных мюонов. Поэтому данный метод использовался лишь для контрольных измерений, продолжающихся несколько суток.
- 2) События, в которых мюон проходил через три секции исследуемую, и две соседние –триггерные. В этом случае, выделение сигналов от мюонов и подавление электронных шумов происходит очень надежно. Однако этот метод неприменим для двух крайних секций модуля.
- 3) События, в которых мюон проходил через две соседние секции. В этом случае, выделение сигналов от мюонов и подавление электронных шумов происходит также надежно. И этот метод применим для всех секций модуля.

В результате, использовался последний метод отбора мюонных событий по срабатыванию двух соседних секций модуля.

Примеры амплитудных спектров космических мюонов в секциях модуля калориметра показаны на рис. 69.

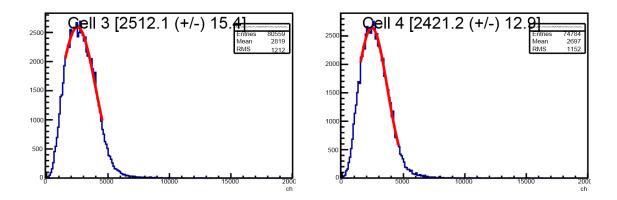
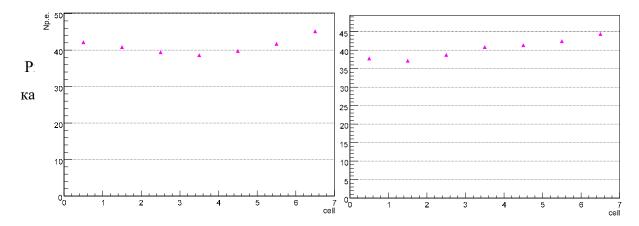


Рисунок 69 - Примеры амплитудных спектров космических мюонов в двух секциях модуля калориметра.



На рис.70 представлены распределения светового выхода в продольных секциях двух модулей калориметра, измеренные с помощью космических мюонов. Как видно, световой выход в секциях модулей составляет около 45 фотоэлектронов, что позволяет надежно выделить сигнал от мюонов на фоне электронных шумов.

Усредненный по 50 модулям калориметра световой выход в продольных секциях представлен на рис. 71.

Структура распределения на рис. 71 отражает ослабление света в переизлучающих волокнах. Чем больше номер секции, тем короче длина волокна и тем меньше ослабление света во время прохождения до фотодетекторов.

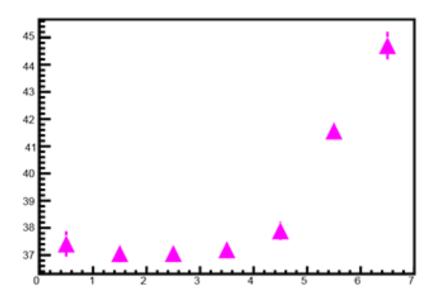


Рисунок 71 - Усредненный по 50 модулям калориметра световой выход в продольных секциях, измеренный с помощью космических мюонов.

В настоящее время разрабатываются несколько подходов в энергетической калибровке модулей с помощью космических мюонов. Проведены измерения светового выхода с продольных секций калориметра с несколькими вариантами аналоговой электроники. Разрабатываются методы энергетической калибровки модулей калориметра космическими мюонами, проходящими через различное количество продольных секций модулей.

В 2018 г. проведены расчеты параметров адронного калориметра с увеличенным отверстием для пучка. Это было вызвано необходимостью использовать на первом этапе эксперимента трубу для пучка диаметром 130 мм. Как следствие, центральный модуль в калориметре не будет использоваться, что приводит к существенным утечкам фрагментов, вылетающих под большими углами. Невозможность детектирования тяжелых фрагментов в калориметре приводит к ухудшению разрешения калориметра по прицельному параметру. Тем не менее, проведенные расчеты показывают, что применение новых алгоритмов по идентификации центральности взаимодействий обеспечивают разрешение по прицельному параметру около 10% для полу-центральных и периферийных событий. С этой целью использовалась корреляция между полным энерговыделением в калориметре и пространственным распределением энергии в модулях калориметра, позволяющим ввести новую экспериментальную наблюдаемую, энергетическую асимметрию. Корреляции между полным энерговыделением и асимметрией представлены на рис.72 для минимальной и максимальной энергий пучка ускорительного комплекса НИКА. Как видно, данные корреляции позволяют надежно идентифицировать центральные и

периферические столкновения.

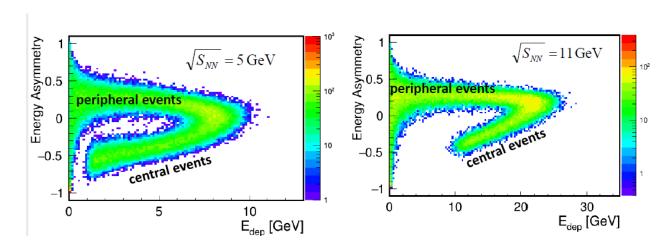


Рисунок 72 - Корреляции между полным энерговыделением и асимметрией для минимальной (слева) и максимальной (справа) энергий пучка ускорительного комплекса НИКА.

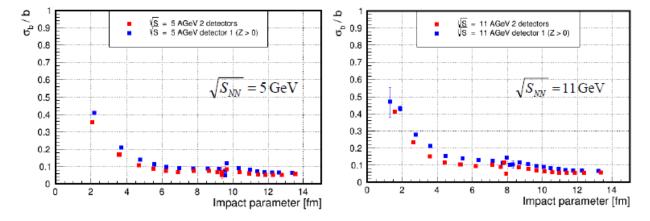


Рисунок 73 - Зависимость разрешения по прицельному параметру от величины прицельного параметра для минимальной (слева) и максимальной (справа) энергий пучка ускорительного комплекса НИКА.

Корреляции, представленные на рис. 72 позволяют определить разрешение по прицельному параметру в каждом их интервалов по энерговыделению. Полученные зависимости разрешения по прицельному параметру от величины прицельного параметра для минимальной и максимальной энергий пучка ускорительного комплекса НИКА показаны на рис. 73. Как видно, разрешение по прицельному параметру составляет около 10% для полу-центральных и периферийных событий.

15. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Задача «Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX».

Были получены новые данные по процессу образования кварк-глюонной материи, изучены ее новые свойства, установлен ряд ограничений для существующих теоретических моделей. В истекшем году было опубликовано 6 статей в реферируемых журналах и 8 электронных препринтов, которые одновременно были посланы в редакции журналов. План работ на 2018 год выполнен полностью.

2 Задача « Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики. Получение данных о энергиях виртуального рр и пр синглетного состояния на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ».

2018 г. проведена подготовка и проведен эксперимент на нейтронном канале РАДЭКС при энергии нейтронов до 200 МэВ. В эксперименте была использована активная дейтериевая мишень (с регистрацией протона в реакции nd-pnn) и два детектора вторичных нейтронов. В декабре 2018 г. получены предварительные экспериментальные данные для реакции $dp \square ppn$ при энергии первичных дейтронов 15 МэВ на циклотроне У-120 НИИЯФ МГУ. В настоящее время ведется обработка полученных данных. План работ на 2018 год выполнен полностью.

3 Задача «Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях».

Предложено исследование реакции подхвата кора из двухнейтронных гало-ядер 6 Не и 11 Li. В эксперименте NN-корреляции в гало-ядре будут оценены по энергии квазисвязанного состояния NN-пары. В результате кинематического моделирования реакции 6 He+ 2 H \rightarrow 6 Li+(nn) \rightarrow 6 Li+n+n показано, что энергия nn-квазисвязанного состояния может быть определена по форме энергетического спектра нейтронов, вылетающих при развале этого состояния, определены параметры планируемого эксперимента. Для определения вклада кластерных конфигураций (8 Be + n, α + α + n, 5 He + α) в структуру 9 Be начато исследование неупругого рассеяния дейтронов и альфа-частиц на кластерах ядра 9 Be. Результаты проведенного кинематического моделирования реакций 9 Be(α , α)X, 9 Be(α , α)X, 9 Be(α , α)X и 9 Be(α , α)X показывают, что регистрация рассеянной альфа-частицы (дейтрона) в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния 9 Be позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний. План работ на 2018 год выполнен полностью.

4 Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гаммаизлучений с использованием германиевых гамма-спектрометров». С помощью активационно-измерительного комплекса, включающего W-Вефотонейтронный источник нейтронов и низкофоновый гамма-спектрометр проведены измерения с использованием гамма-активационного и нейтронно-активационного анализа. Отработана методика измерений.

Получены новые экспериментальные результаты по фотовозбуждению спиновых изомеров Cd и In реальными и виртуальными фотонами (электронами) в области пороговой энергии. Измерения проводились с использованием электронного линейного ускорителя INR LUE-8 МэВ. Результаты сопоставлены с теоретическими расчетами в рамках феноменологических моделей. Отмечается наличие несоответствия между экспериментальными данными и теоретическими расчетами.

Целью данной работы также являлось выбор фильтрующих материалов пригодных для отбора проб атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы и для анализа в них содержания и состава нерадиоактивных элементов методом НАА. Для этого исследовались различные фильтрующие материалы: марля отбеленная, аналитический фильтрующий материал ЛФС-2, фильтры Петрянова двух видов, промышленный фильтр из холстопрошивного полотна и кварцевый фильтр. НАА этих материалов (кроме кварцевого фильтра) указывает на систематическое присутствие в них в качестве основных примесей следов Mn, Na и Cl, что может быть связано уже с самим процессом производства. Данное исследование сужает круг задач, которые могут решаться с использованием подобных фильтров. Для НАА в этом случае должны использоваться те участки активационных спектров, в которых отсутствуют вклады от этих примесей. Наиболее универсальными являются кварцевые фильтры, но они имеют ограниченные размеры, высокую стоимость и имеют свою область применений. Использование марли и ЛФС-2 позволяет все же решать задачи поиска следов металлов в атмосферных аэрозолях и наземных выпадениях из атмосферы методом НАА. План работ на 2018 год выполнен полностью.

5 Задача «Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы».

Возможность плавного изменения энергии электронов от 4 до 10 МэВ на ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН позволяет при облучении W-мишени получать различные наборы тормозных спектров фотонов. Тормозные гамма-кванты, падая на бериллиевую мишень, рождают быстрые нейтроны в реакции ⁹Ве(γ,n). Нейтроны в полиэтиленовом блоке-замедлителе фотонейтронного источника замедляются до тепловой энергии. Исследованы характеристики выведенного пучка тепловых нейтронов фотонейтронного источника ИН-ЛУЭ. Для вывода нейтронов из источника использован коллиматор с диаметром поперечного сечения 30 мм, расположенный под углом 67 □ относительно направления электронного пучка. Получены значения плотности потока нейтронов в

зависимости от расстояния до центра источника и распределение плотности потока от расстояния до оси коллиматора (профиль пучка). Что касается быстрых нейтронов, то качественное совпадение экспериментальных спектров и результатов моделирования свидетельствует о наличии в энергетическом спектре быстрых нейтронов в интересующем нас интервале энергий, что позволяет надеяться в дальнейшем на получение «квазимоноэнергетического» пучка нейтронов в интервале энергий 1–4 МэВ. Продолжены работы по описанию нейтронных данных для большого количества четночетных изотопов. Усовершенствовано программное обеспечение. Создан новый детектор с измерительным комплексом для изучения спектра гамма фона в сложных условиях. План работ на 2018 год выполнен полностью.

6 Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер, 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 электронов, реальных и виртуальных фотонов».

В отчете приведены новые результаты, полученные в 2018 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Основное внимание уделено экспериментальному изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Новое перспективное направление связано с изучением нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов от фемтосекудных тераваттных лазеров. Получены новые данные о свойствах гигантских резонансов в ядрах, включая пигми резонансы вблизи порога. Отработаны методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню. План работ на 2018 год выполнен полностью.

7 Задача «Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN».

Важную роль в триггерной системе установки ALICE играет детектор Т0, предназначенный для формирования триггерных сигналов нулевого уровня (LM), которые используются для мониторирования и определения светимости, диагностики пучка. Высокая надежность, стабильность и отсутствие чувствительности к фоновым событиям сделали детектор Т0 опорным детектором для настройки триггерных сигналов для всех триггерных детекторов. Анализ работы детектора Т0 в 2018 году показал, что основные его параметры, необходимые для выполнения его основных функций, продолжают соответствовать техническим требованиям эксперимента ALICE. Для обеспечения дальнейшей стабильной работы детектора Т0 требуется регулярное техническое обслуживание, проведение ежегодных пусконаладочных работ и непрерывный мониторинг параметров детектора Т0 в режиме «on-line» с соответствующим контролем

после реконструкции событий. В 2018 году сотрудники группы ИЯИ, МИФИ совместно с University of Jyvaskyla (Финляндия) в рамках коллаборации ALICE-Т0 приняли участие в круглосуточных сеансах физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и ядер свинца и обеспечили непрерывное, круглосуточное экспертное сопровождение детектора Т0 и прототипа детектора ФИТ, установленного в шахте ALICE. Эффективность участия детектора Т0 в наборе физических данных составила 98% по времени набора данных и 95 % по участию детектора в ранах.

Впервые извлечены выходы протонов от ЭМД в каналах с различной множественностью нейтронов. Результаты анализа хорошо согласуются с предсказаниями модели RELDIS. В связи с обсуждаемыми в ЦЕРНе планами исследовать столкновения других ядер (помимо ²⁰⁸Pb) в будущих Run 3 и Run 4 на LHC были проведены вычисления сечений адронного взаимодействия ядер, ЭМД и сечений рождения электрон-позитронных пар для ряда средних и легких ядер элементов, пригодных для использования в ионных источниках. Результаты расчетов показывают, что столкновения ядер In и Xe могут быть выгодны с точки зрения уменьшения потерь ядер пучка в электромагнитных процессах при достаточной частоте нуклон-нуклонных столкновений внутриядерных нуклонов в этих ядрах.

В ходе сеанса 2018 года проведены новые измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м.. Проводится обработка полученных экспериментальных данных по одиночной, двойной и центральной дифракции, которая включает анализ данных не только с с детекторов ADA и ADC, но и данных центральных детекторов ITS (вершинный детектор), TOF – T0 (время пролетная система), TPC (время проекционная камера) и др. В рамках программы модернизации детекторных систем установки ALICE проведена работа по подготовке технического проекта нового детектора FDD (Forward Diffraction Detector) на основе работающего детектора AD. Для проведения тестовых измерений прототипа детектора FDD изготовлены две сцинтилляционные пластины. Для проекта по замене детектора АД на детектор детекторов FDD (Forward Diffraction Detector) для Run 3 проведены работы по исследованию старения используемых ФЭУ.

8 Задача «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)».

В 2018 г. была проведена модификация переднего годоскопа FW, которая была связана с проверкой ячеек и заменой ФЭУ в ячейках с повышенным шумом, а также выполнена калибровка годоскопа. Годоскоп полностью подготовлен к использованию в эксперименте Ag+Ag при энергии налетающих ядер серебра 1,65 АГэВ на ускорителе SIS18 в 2019 г. для определения центральности и угла плоскости реакции в Ag+Ag столкновениях. В 2018 г. продолжались начатые в 2017 г. работы по стендовым испытаниям детекторных ECALмодулей на космическом излучении, монтажу испытанных модулей в секторах основной конструкции ECAL, испытанию систем входной электроники, системы накопления и считывания экспериментальных данных. В настоящее время электромагнитный

калориметр с четырьмя полностью собранными секторами (из 6) подготовлен к использованию в эксперименте Ag+Ag на действующем ускорителе SIS18 в GSI в 2019 г. С помощью ECAL предполагается выполнить прецизионные измерения сечений рождения π^0 and η -мезонов и существенно повысить эффективность разделения пионов и электронов при значениях импульса частиц $p > 400 \text{ M} \cdot \text{B}/\text{c}$. В течение 2019 г. году планируется завершить полную сборку калориметра. План работ на 2018 год выполнен полностью.

9 Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI».

В 2018 г. ИЯИ РАН продолжал работу по подготовке переднего адронного калориметра к экспериментам на установке СВМ. Была разработана методика и проведена калибровка продольных секций всех 45 модулей изготовленных в ИЯИ РАН модулей переднего адронного калориметра на космических мюонах. Полученные данные подготовлены для размещения в базе данных СВМ. Измерен отклик супермодуля адронного калориметра СВМ на канале вторичных пучков протонов и пионов Т10 в ЦЕРНе в диапазоне энергий адронов 1 - 9 ГэВ. Проведены измерения отклика одного из модулей калориметра с фотодиодами, предварительно облученными нейтронами с потоками $2x10^{11}$ нейтронов/см², который ожидается в экспериментах СВМ, в том же диапазоне энергий адронов. Выполнены измерения отклика одного из модулей калориметра с различными прототипами аналоговой и считывающей электроники: с прямым считыванием сигнала на основе АЦП ADC64s2, разработанной в ОИЯИ, Дубна), электроники, разработанной в ИЯИ РАН со считыванием предварительно обработанного сигнала на основе ТоТ метода. Начаты работы по адаптации модуля электроники, разработанного для считывания сигналов с электромагнитного калориметра установки ПАНДА, для считывания сигналов с переднего адронного калориметра установки СВМ и ее интеграция в систему сбора и передачи данных СВМ. Разработана рабочая документация на изготовление механической системы для установки одного из модулей переднего адронного калориметра СВМ, собранного в ИЯИ РАН в качестве mPSD на установке mCBM. План работ на 2018 год выполнен полностью.

10 Задача «Эксперимент MPD/NICA»

В 2018 г. в рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Полностью завершен технический проект калориметра. На завершающую стадию вышло создание адронного калориметра. Данный калориметр является одними из основных компонентов экспериментальных установок и предназначен для измерения геометрии столкновений тяжелых ионов в пучках ускорительного комплекса НИКА. Собрана и

протестирована основная часть модулей адронного калориметра. Разработаны методы энергетической калибровки секций модулей калориметра космическими мюонами. Разработана методика измерения световыходов продольных секций модулей калориметра. Проведено Монте Карло моделирование различных вариантов измерения центральности ядро-ядерных взаимодействий в реалистичной модели экспериментальной установки МРD. Полученные результаты докладывались в 2018г. на 2х международных конференциях и опубликованы в 2х статьях в международных журналах. План работ на 2018 год выполнен полностью.

16. ПУБЛИКАЦИИ

1. Публикации по задаче «Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX».

Публикации в журналах:

- 1. Pseudorapidity Dependence of Particle Production and Elliptic Flow in Asymmetric Nuclear Collisions of p+Al, p+Au, d+Au, and 3He+Au at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV PHENIX Collaboration (A. Adare (Colorado U.) et al.). Jul 31, 2018. 8 pp. Published in Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.22, 222301 DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.222301
- 2. Production of $\pi 0$ and η mesons in Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =200 GeV

 PHENIX Collaboration (C. Aidala (Los Alamos & Michigan U.) *et al.*). May 11, 2018. 11 pp.

 Published in Phys.Rev. C98 (2018) no.5, 054903 DOI: 10.1103/PhysRevC.98.054903
- 3. <u>Low-momentum direct photon measurement in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ =200 GeV PHENIX Collaboration (A. Adare (Colorado U.) *et al.*). May 10, 2018. 11 pp. Published in Phys.Rev. C98 (2018) no.5, 054902 DOI: <u>10.1103/PhysRevC.98.054902</u></u>
- 4. Nonperturbative transverse-momentum-dependent effects in dihadron and direct photon-hadron angular correlations in *p*+*p* collisions at √s=200 GeV

 PHENIX Collaboration (C. Aidala (Michigan U.) *et al.*). May 7, 2018. 13 pp.

 Published in Phys.Rev. D98 (2018) no.7, 072004 DOI: 10.1103/PhysRevD.98.072004
- 5. Single-spin asymmetry of J/ψ production in p+p, p+Al, and p+Au collisions with transversely polarized proton beams at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV

 PHENIX Collaboration (C. Aidala (Michigan U.) et al.). May 3, 2018. 11 pp.

 Published in Phys.Rev. D98 (2018) no.1, 012006 DOI: 10.1103/PhysRevD.98.012006
- 6. Cross section and longitudinal single-spin asymmetry AL for forward $W\pm \to \mu \pm \nu$ production in polarized p+p collisions at $\sqrt{s}=510$ GeV

 PHENIX Collaboration (A. Adare *et al.*). Apr 11, 2018. 14 pp.

 Published in Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 032007 DOI: 10.1103/PhysRevD.98.032007

Доклады на конференциях:

Постерный доклад Pantuev V.S. «Corona effect in AA collisions at RHIC and LHC». Международная конференция "Quark Matter", Май 2018, Венеция, Италия.

2. Публикации по задаче «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами. Получение данных о энергиях виртуального рр и пр синглетного состояния на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ».

Статьи вышедшие:

1. Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. И. Кукулин, В. М. Лебедев, М. В. Мордовской, В. Н. Померанцев, А. В. Спасский / Низкоэнергетические параметры нейтрон-нейтронного взаимодействия: анализ данных, извлеченных из реакций nd-и dd-развалов // Ядерная физика, 2018, том 81, № 5, с. 555-563.

Статьи, принятые в печать:

1. А. А. Каспаров, А. А. Афонин, Е. С. Конобеевский, В. В. Мицук, С. В. Зуев / Кинематическое моделирование квазисвободного рассеяния дейтронов и α-частиц на кластерах легких ядер // Известия РАН. Серия физическая (принято в печать).

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

- 1. Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, А.А. Каспаров, **В. В. Мицук** / Исследование реакции d+p→p+p+n с целью изучения связанного pp-состояния // 61-я Научная конференция МФТИ 2018, Долгопрудный.
- 2. E.S. Konobeevski, **A.A. Afonin**, A.A. Kasparov, V.V. Mitcuk, M.V. Mordovskoy, S.V. Zuyev, V.M. Lebedev, A.V. Spassky / A setup for charged particles and neutrons detection for study p, d AND ⁴He reactions on light nuclei // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1 6 июля 2018 года.
- 3. **В.В. Мицук,** А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, С.В. Зуев / Two variants of a matrix detector for detecting two coincident protons in the $d+d \rightarrow p+p+n+n$ reaction: simulation of the experiment, selection of setup parameters, testing of prototypes // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1-6 июля 2018 года.
- 4. **E.Konobeevski**, V.Kukulin, A.Kasparov, V.Lebedev, M.Mordovskoy, V.Pomerantsev, A.Spassky, S.Zuyev / New analysis of data on nn scattering length obtained in n-d and d-d breakup reactions // XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow, October 08-11, 2018 (EMIN-2018).
 - 3. Публикации по задаче «Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях»

Статьи вышедшие:

1. Е. С. Конобеевский, В. П. Заварзина, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, А. С. Курлович, В. В.

Мицук / Возможность исследования нейтрон-нейтронных корреляций в гало-ядрах // Ядерная физика, 2018, том 81, № 5, с. 564-568.

Статьи принятые в печать:

- 2. А. А. Каспаров, А. А. Афонин, Е. С. Конобеевский, В. В. Мицук, С. В. Зуев / Кинематическое моделирование квазисвободного рассеяния дейтронов и α-частиц на кластерах легких ядер // Известия РАН. Серия физическая 2019.
- 3. Е. С. Конобеевский, А. А. Афонин, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. В. Мицук, М. В. Мордовской, В. М. Лебедев, А. В. Спасский / Изучение кластерной структуры легких ядер в d—9Ве взаимодействии// Известия РАН. Серия физическая 2019
- 4. А. А. Каспаров, Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, В. В. Мицук / Моделирование реакции неупругого рассеяния альфа-частиц для исследования кластерной структуры возбуждённых состояний ⁹Ве // ЭЧАЯ 2019

Доклады на конференциях

- 1. Konobeevski E., AfoninA., Kasparov A., Lebedev V., Mitcuk V., Mordovskoy M., Spassky A., Zuyev S. / Study of cluster structure of ⁹Be in d-⁹Be interaction // IX International Symposium on EXOtic Nuclei (EXON-2018). September 10-15, 2018, Petrozavodsk, Russia.
- 2. E.S. Konobeevski, A.A. Afonin, A.A. Kasparov, V.V. Mitcuk, M.V. Mordovskoy, S.V. Zuyev, V.M. Lebedev, A.V. Spassky / A setup for charged particles and neutrons detection for study p, d AND ⁴He reactions on light nuclei // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1 6 июля 2018 года.
- 3. E.S. Konobeevski, A.A. Afonin, A.A. Kasparov, V.V. Mitcuk, M.V. Mordovskoy, S.V. Zuyev, V.M. Lebedev, A.V. Spassky / Study of light nuclei cluster structure in d-9Be interaction // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1 6 июля 2018 года.
- 4. Kasparov A., Konobeevski E., Zuyev S., Afonin A., Mitcuk V. / Simulation of inelastic scattering reaction of alpha particles for studying cluster structure of ⁹Be excited states // XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow, October 08-11, 2018 (EMIN-2018).
- 5. Kasparov A.A., Afonin A.A., Konobeevski E.S., Mitcuk V.V., Zuyev S.V. / Kinematical simulation of quasifree scattering of deutrons and alpha particles on clusters in ^{6,7}Li and ⁹Be // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1 6 июля 2018 года.

4. Публикации по задаче «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров »

Статьи вышедшие:

- V. Nedorezov, E. Konobeevski, A. Polonski, V. Ponomarev, A. Savel'ev, G. Solodukhov, I. Tsymbalov, A. Turinge, S. Zuyev and D. Gorlova / Photoexcitation of spin isomers of In and Cd nuclei in the pigmy resonance region // Physica Scripta, 94 (2019) 015303.
- 2. А. А. Афонин, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский / Возможность восстановления низкоэнергетической части спектра нейтронов фотонейтронного источника методом нейтронно-активационного анализа // Известия РАН. Серия физическая, 2018, том 82, № 6, с. 814–818.
- 3. А. В. Андреев, А. А. Афонин, Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, Е. В. Плетников / Изучение состава радиоактивных и нерадиоактивных элементов в пробах атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы // Известия РАН. Серия физическая, 2018, том 82, № 6, с. 819–823.
- 4. С. В. Зуев, В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, А. А. Туринге / Разработка метода измерения сечений фотоядерных реакций с использованием модельно рассчитанных спектров квазимоноэнергетических фотонов // Ядерная физика, 2018, том 81, № 4, с. 409—414.

Статьи, принятые в печать:

- 1. С. В. Зуев, А. А. Афонин, Ю. М. Бурмистров, И. А. Капустин, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, Е. В. Плетников, В. Н. Пономарев, Г. В. Солодухов / Изучение возможности использования различных аэрозольных фильтров для нейтронно-активационного анализа // Известия РАН. Серия физическая (направлено в печать).
- 2. С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, В. Г. Недорезов, В. Н. Пономарев, Г. В. Солодухов / Фотовозбуждение ядер Сd и In реальными и виртуальными фотонами в области 4–9 МэВ // ЭЧАЯ (направлено в печать).

Патенты

1. Зуев С.В., Конобеевский Е.С. «Программа для расшифровки активационных гаммаспектров (IDENT)». Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018661464 (07.09.2018).

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

1. **С. И. Поташев**, Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, С. Х. Караевский, Е. С. Конобеевский, В. Н. Марин, В. Н. Пономарев, Г. В Солодухов, А. А. Афонин, И. В. Мешков / Исследование

- спектра эпитепловых нейтронов от компактного источника с помощью детекторов на основе гелия-3 и бор-10 // Конференции по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018. 17 21 сентября 2018 г. Санкт-Петербург, Петергоф.
- 2. Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Nedorezov V.G., Ponomarev V.N., Solodukhov G.V., **Zuyev S.V.** / Photo-excitation of Cd and In nuclei by real and virtual photons in the 4 9 MeV energy region // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1 6 июля 2018 года.
- 3. Afonin A.A., Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Ponomarev V.N., Solodukhov G.V., **Zuyev S.V**. / Study of the possibility of using various aerosol filters in neutron activation analysis // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1 6 июля 2018 года.
- 4. E. Konobeevski, M. Mordovskoy, V. Nedorezov, V. Ponomarev, G. Solodukhov, **S. Zuyev** / Photoexcitation of Cd and In nuclei by real and virtual photons in 4-9 MeV energy region // XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow, October 08-11, 2018 (EMIN-2018).
- S. Potashev, Yu. Burmistrov, S. Zuyev, S. Karaevsky, E. Konobeevski, V. Razin, A. Afonin / A four-layer gaseous detector allowing to measure the energy of charged particles // 4-я Конференция по физике частиц и астрофизике (ICPPA-2018). 22-26 октября 2018. г. Москва.

5. Публикации по задаче «Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы»

Статьи вышедшие:

- 1. V.M. Skorkin / Neutron Monitoring at the Area of IRC "Pamir-Chakaltaya" for Radiation Safety Control // Physics of Particles and Nuclei, 2018, vol. 49, No. 4, pp. 657-658.
- 2. М. В. Мордовской, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, В. В. Мицук, И. В. Суркова, В. М. Скоркин / Возможность получения квазимоноэнергетического пучка нейтронов на фотонейтронном источнике ИЯИ РАН// Известия РАН. Серия физическая, 2018, том 82, № 6, с. 829–831.

Статьи, принятые в печать:

- 1. М. В. Мордовской, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, В. В. Мицук, В. Н. Пономарев, Г. В. Солодухов, И. В. Суркова / Определение энергетического спектра быстрых нейтронов W- Ве источника ИЯИ РАН в реакции n + ¹H → n+ p // Известия РАН. Серия физическая (направлено в печать).
- 2. С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, В. Н. Пономарева, Г. В. Солодухова, А.

А. Афонин / Исследование характеристик выведенного пучка фотонейтронного источника Института ядерных исследований РАН // ЭЧАЯ (направлено в печать).

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ

Mordovskoy M.V., Zuyev S.V., Konobeevski E.S., Mitcuk V.V., Surkova I.V. / A measurement of neutron spectrum of W-Be source determining input energy from energies of secondary particles in n+1H $\rightarrow n+p$ reaction // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1-6 июля 2018 года.

M.Mordovskoy, S.Zuyev, E.Konobeevski / Measurement of the spatial distribution of thermal neutrons from the INR RAS photoneutron source // XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow, October 08-11, 2018 (EMIN-2018).

Skorkin V.M. / Distribution of DT neutrons in the combined moderator // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1-6 июля 2018 года.

Skorkin V.M. / Radiation resistance of the polymer material under neutron irradiation // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1-6 июля 2018 года.

V. Skorkin, M. Mordovskoy / The increased gamma radiation from D₂O photoneutron target on the electron accelerator // XV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei Moscow, October 08-11, 2018 (EMIN-2018).

6. Публикации по задаче «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер, 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 электронов, реальных и виртуальных фотонов»

Публикации:

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати)

1. S.Prakhov, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. High-statistics measurement of the $\eta \rightarrow 3\pi^0$ decay at the Mainz Microtron. Phys. Rev. C 97, No. 6, 065203 (2018).

- 2. V.Sokhoyan, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Experimental study of the $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ reaction with the A2 setup at the Mainz Microtron. Phys. Rev. C 97, No. 5, 055212 (2018).
- 3. M.Dieterle, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of π^0 Mesons off Protons and Neutrons in the Second and Third Nucleon
- 4. P.Adlarson, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the decay $_{-}$ $\eta' \rightarrow \pi^{0} \pi^{0} \eta$ at MAMI. Phys. Rev. D 98, Iss. 1, 012001 (2018).
- 5. A.Kaeser, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of helicity-dependent cross sections in $\pi^0 \eta$ photoproduction from quasi-free nucleons. Phys. Let. B 786 (2018) 305-312.
- 6. Ю.А.Усов, Г.М.Гуревич, В.Л.Кашеваров, Ю.Н.Узиков. Участие сотрудников ЛЯП ОИЯИ в поляризационных исследованиях GDH и SPASCHARM. Перспективы сотрудничества. Новости ОИЯИ, № 2 (2018) 20-24.
- 7. D. Paudyal, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Spin polarizabilities of the proton via measurement of Compton double-polarization observables. Phys. Rev. Let. (in print).
- 8. M.Bashkanov, G.M.Gurevich et al. Deuteron photodisintegration by polarized photons in the region of the d*(2380). Phys. Rev. Let. (in print).
- 9. C.S. Akondi, G.M.Gurevich, A.Mushkarenkov et.al. Experimental study of the $\gamma p \rightarrow K^0 \Sigma^+$, $\gamma n \rightarrow K^0 \Lambda$, and $\gamma n \rightarrow K^0 \Sigma^0$ reactions at the Mainz Microtron. Phys. Rev. C (in print).
- 10. Yu.A.Plis, G.M.Gurevich et al. Research and development of the polarized deuteron source for the Van de Graaff accelerator. PEPAN (in print).
- 11. <u>T. Jude</u>, V.Nedorezov, A.Polonski e.a.(BGO-OD collaboration). <u>Strangeness photoproduction at the BGO-OD experiment</u>, PoS Hadron2017 (2018) 054, DOI: 10.22323/1.310.0054
- 12. V. Nedorezov, A.Lapik, A.Polonski, N.Rudnev, A.Turinge. Study of nuclear media effects in photoproduction of mesons, Phys. PoS Hadron 2018, in publ.
- 13. Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. Модельное описание фотоядерного 13 С(γ , p) 12 В активационного детектирования углерода. Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 5(210). С. 1–8.
- 14. L.Z.Dzhilavyan. Production of Short-Lived Radioisotopes for Nuclear Medicine at Electron Accelerators. Physics of Atomic Nuclei, 2018 (in print).
- 15. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, Ю.Н. Покотиловский, А.В. Русаков. Характеристики фотоядерного 13 C(\square ,p) 12 B активационного детектирования углерода. Известия РАН. Серия физическая (в печати).
- 16. Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, А.В. Русаков. Представления спектров тормозного

- излучения и соответствующие выходы фотоядерных реакций. Известия РАН. Серия физическая (в печати).
- 17. Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, А.В. Русаков. Представления спектров тормозного излучения и соответствующие выходы фотоядерных реакций. Известия РАН. Серия физическая (в печати).
- 18. Л.З. Джилавян. Развитие в фотоядерном методе для обнаружения скрытых (N; C)-концентраций с регистрацией наведенных (12 N; 12 B)- активностей. ЭЧАЯ (в печати).
- 19. Л.3. Джилавян, А.М. Лапик, В.Г. Недорезов, В.Н. Пономарев, А.В. Русаков, Г.В. Солодухов. Регистрация запаздывающих нейтронов от фотоделения 238 U при E_{\square} мах \square 10 МэВ. ЭЧАЯ (в печати) .
- 20. V.Nedorezov, , E. Konobeevski, A. Polonski, V. Ponomarev, A.Savel'ev, G. Solodukhov, I. Tsymbalov, A.Turinge, S.Zuyev, D. Gorlova. Photoexcitation of spin isomers of In and Cd nuclei in the pigmy resonance region, Phys. Scripta, in publ. (2018) Article reference: PHYSSCR-106812.R1
- 21. Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, В.Г. Недорезов, В.Н. Пономарев, А.В. Русаков, Г.В. Солодухов. Регистрация запаздывающих нейтронов от фотоделения 238 U при E_{\square} мах \square 10 МэВ. ЭЧАЯ (2018) (в печати) .
- 22. S Potashev, Yu Burmistrov, A Drachev, S Karaevsky, E Konobeevski, A Kasparov, I. Meshkov, S Zuyev, A Afonin, V Marin, V. Ponomarev, and G Solodukhov, (2018). A possibility of detecting fast neutrons in a 10B solid-gas detector in The 3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, KnE Energy & Physics, pages 115–120. DOI: 10.18502/ken.v3i1.1732
- 23. И. Поташев, Ю.М. Бурмистров, А.И. Драчев, С.Х. Караевский, Г.С. Солодухов. Исследование двухкоординатного газоразрядного детектора медленных нейтронов с твердотельным конвертером из бора-10. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. Т. 10, С. 108-112 (2018). DOI 10.1134/50207352818110161.
- 24. Мешков И.В., Кузнецов С.П., Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Караевский С.Х., Солодухов Г.В. // Исследование выхода нейтронов из мишени компактного источника нейтронов на ускорителе ЛУЭ-8 с помощью детекторов на основе гелия-3 и бора-10. Известия Российской академии наук. серия физическая. Том: 82, Номер: 6, Стр.: 811-813, Год: 2018. DOI: 10.7868/50367676518060261
- 25. M.L. Gorelik, S. Shlomo, B.A.Tulupov and M.H.Urin. On unitarity of the particle hole dispersive optical model. Nuclear Physics **A** 970 (2018) 353 368.
- 26. B. A. Tulupov and M.H. Urin. On direct one-neutron decay of the giant dipole resonance. EPJ Web of Conferences **194**, 04003 (2018).
- 27. Б.А.Тулупов и М.Г. Урин. Прямые+полупрямые E1 фотонейтронные реакции: полумикроскопическое описание. ЭЧАЯ (в печати).

- 28. В.Н.Пономарев, Г.В.Солодухов, В.Г.Недорезов. Ускорительный комплекс на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5РВ ИЯИ РАН для фундаментальных исследований. Известия РАН сер. Физ. 2018, в печати.
- доклады на конференциях и школах
- 1. Yu.A.Plis, G.M.Gurevich, Yu.A.Usov.The polarized deuteron source for the Van de Graaff accelerator. 23rd International spin symposium SPIN 2018. 10-14 September 2018, Ferrara, Italy.
- 2. G.M.Gurevich. Compton scattering asymmetries and a study of the proton spin structure at MAMI. XV International seminar on electromagnetic interactions of nuclei EMIN 2018. October 08-11, 2018, Moscow, Russia.
- 3. 2.V.N.Ponomarev, G.V.Solodukhov, V.G.Nedorezov. The application of LUE-8-5RV technological complex for fundamental investigations. Poster report (2018) Int. Sem. on Electromagnetic Interactions of Nuclei (EMIN-2018). www.inr.ac.ry/~pnlab/emin2018.
- 4. Л.З. Джилавян. Получение короткоживущих радиоизотопов для ядерной медицины на ускорителях электронов. Пленарный доклад XI Черенковские чтения. «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц» (Москва. ФИАН, 17 апреля 2018)...
- 5. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, A.M. Lapik, Yu.N. Pokotilovski, A.V. Rusakov. The Characteristics of Carbon Detection with using of ¹³C(□,p)¹²B Activation. Book of abstracts of LXVIII International Conference "Nucleus 2018" (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg. 2018.
- 6. 2. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, K.A. Stopani. The Bremsstrahlung Spectra Representations and Related Yields of Photonuclear Reactions. Book of abstracts of LXVIII International Conference "Nucleus 2018" (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg. 2018. P. 93.
- 7. L.Z. Dzhilavyan, A.M. Lapik, A.V. Rusakov. Time Operational Mode of Scintillation Detectors for Measuring Induced ¹²B- and ¹²N-Activities at Pulsed Electron Accelerators. Book of abstracts of LXVIII International Conference "Nucleus 2018" (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg. 2018. P. 224...
- 8. V.N.Ponomarev, G.V.Solodukhov, V.G.Nedorezov. The application of LUE-8-5RV technological complex for fundamental investigations. Poster report (2018) Int. Sem. on Electromagnetic Interactions of Nuclei (EMIN-2018). www.inr.ac.ru/~pnlab/emin2018
- 9. С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, С. Х. Караевский, Е. С. Конобеевский, В. Н. Марин, В. Н. Пономарев, Г. В Солодухов, А. А. Афонин, И. В. Мешков / Исследование спектра эпитепловых нейтронов от компактного источника с помощью детекторов на основе гелия-3 и бор-10 // Конференции по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018. 17 21 сентября 2018 г. Санкт-Петербург,

Петергоф

- 10. Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Nedorezov V.G., Ponomarev V.N., Solodukhov G.V., Zuyev S.V A possibility of identification of fissile materials by measuring yield of photofission delayed photons. Poster report (2018) Int. Sem. on Electromagnetic Interactions of Nuclei (EMIN-2018). www.inr.ac.ry/~pnlab/emin2018
- 11. E. S. Konobeevski, M. V. Mordovskoy, V. G. Nedorezov, V. N. Ponomarev, G. V. Solodukhov, S. V. Zuyev.Photoexcitation of Cd and In nuclei by real and virtual photons in the 4-9 MeV energy region. Poster report (2018) Int. Sem. on Electromagnetic Interactions of Nuclei (EMIN-2018). www.inr.ac.ry/~pnlab/emin2018
- 12. Ponomarev, V.G. Nedorezov, G.V. Solodukhov. The application of LUE-8-5RV technogical complex for fundamental investigations. Poster report (2018) 68-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Воронеж, 2018г.
- 13. Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Nedorezov V.G., Ponomarev V.N., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. / Fission of 235,238U and 232Th nuclei by real and virtual photons in the threshold energy region // 68 Международная конференция «ЯДРО-2018» по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» Воронеж, 1-6 июля 2018 года.
- 14. С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, С. Х. Караевский, Е. С. Конобеевский, В. Н. Марин, В. Н. Пономарев, Г. В Солодухов, А. А. Афонин, И. В. Мешков. Исследование спектра эпитепловых нейтронов от компактного источника с помощью детекторов на основе гелия-3 и бор-10. Секционный доклад на Конференции по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018. 17 21 сентября 2018 г. Санкт-Петербург, Петергоф. Сайт: https://oiks.pnpi.spb.ru/events/rniks2018.

- препринты

- 1. V.Sokhoyan, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Study of the $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ reaction with the A2 setup at MAMI. arXiv:1803.00727 [nucl-ex].
- 2. S.Prakhov, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. High-statistics measurement of the $\eta \rightarrow 3\pi^0$ decay at MAMI. <u>arXiv:1803.02502v1</u> [hep-ex].
- 3. M.Dieterle, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of π^0 Mesons off Protons and Neutrons in the Second and Third Nucleon Resonance Region. arXiv:1805.10504v1 [nucl-ex].
- 4. M.Bashkanov, G.M.Gurevich et al. Deuteron photodisintegration by polarized photons in the region of the $d^*(2380)$. arXiv1809.09398v1 [nucl-ex].
- 5. A.Kaeser, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of helicity-dependent cross sections in $\pi^0 \eta$ photoproduction from quasi-free nucleons. arXiv1810.02778v1 [nucl-ex].

7. Публикации по задаче «Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN»

- [1] I.A. Pshenichnov, U.A. Dmitrieva, «Electromagnetic interactions of ultrarelativistic nuclei: a challenge for present and future heavy-ion colliders», Acta Phys. Polonica, 2018, to be published
- [2] У.А.Дмитриева «Образование тяжелых вторичных ядер в столкновениях Xe-Xe и Pb-Pb на БАК» // XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2018». Секция «Физика». Сборник тезисов. М.: Физический факультет МГУ, 2018, ISBN 978-5-8279-0125-9
- [3] U.A.Dmitrieva, I.A.Pshenichnov "Modelling transmutation of lead nuclei in ultraperipheral collisions at the LHC" // Современные проблемы физики и технологий. VII-я Международная молодежная научная школа-конференция, 16□21 апреля 2018 г.: Тезисы докладов. Часть 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2018, ISBN 978-5-7262-2467-1
- [4] C.Hadjidakis... A.B.Kurepin, ..N.S.Topilskaya et al., "A Fixed-Target Programme at the LHC: Physics Case and Projected Performances for Heavy-Ion, Hadron, Spin and Astroparticle Studies." //arXiv:1807.00603 [hep-ex]. (принято в Phys. Rept.)
- [5] E.V. Antamanova *et al.* «Anode current saturation of ALD-coated Planacon® MCP-PMTs» // Jul 10, 2018. Published in JINST 13 (2018) no.09, T09001
- [6] Yu.A. Melikyan, «Performance of Planacon MCP-PMT photosensors under extreme working conditions» // NIM A (в печати).
- [7] U.Dmitrieva, I.Pshenichnov, «On the performance of Zero Degree Calorimeters in detecting multinucleon events»,// Nucl. Inst. Meth. A 906 (2018) 114–119

Публикации в составе коллаборации ALICE

- [1] S. Acharya, *et al.* Medium modification of the shape of small-radius jets in central Pb-Pb collisions at root s(NN)=2:76 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2018). URL http://dx.doi.org/10.1007/JHEP10(2018)139
- [2] S.Acharya, *et al.* Azimuthally-differential pion femtoscopy relative to the third harmonic event plane in Pb-Pbcollisions at root(NN)-N-S=2.76TeV. PHYSICS LETTERS B 785 (2018) 320–331. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.06.042
- [3] S.Acharya, et al. Inclusive J/psi production in Xe-Xe collisions at root s(NN)=5.44 TeV.

PHYSICS LETTERS B 785 (2018) 419–428. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.08.047

- [4] S. Acharya, *et al.* Neutral pion and eta meson production at midrapidity in Pb-Pb collisions at root S-NN=2.76 TeV. PHYSICAL REVIEW C 98 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.98.044901
- [5] S.Acharya, *et al.* Dielectron production in proton-proton collisions at root s=7 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2018). URL http://dx.doi.org/10.1007/JHEP09(2018)064
- [6] S.Acharya, *et al.* Anisotropic flow in Xe-Xe collisions at root s(NN)=5.44 TeV. PHYSICS LETTERS B 784 (2018) 82–95. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.06.059
- [7] S. Acharya, *et al.* Anisotropic flow of identified particles in Pb-Pb collisions at root s(NN)=5.02 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2018). URL http://dx.doi.org/10.1007/JHEP09(2018)006
- [8] S. Acharya, *et al.* Constraints on jet quenching in p-Pb collisions at root s(NN)=5.02 TeV measured by the event-activity dependence of semi-inclusive hadron-jet distributions. PHYSICS LETTERS B 783 (2018) 95–113. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.05.059
- [9] S.Acharya, *et al.* Neutral pion and eta meson production in p-Pb collisions at root S-NN=5.02 TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 78 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6013-8
- [10] S. Acharya, *et al.* Inclusive J/psi production at forward and backward rapidity in p-Pb collisions at root s(NN)=8.16 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2018). URL http://dx.doi.org/10.1007/JHEP07(2018)160
- [11] S. Acharya, *et al.* Energy dependence and fluctuations of anisotropic fow in Pb-Pb collisions at root s(NN)=5:02 and 2:76 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2018). URL http://dx.doi.org/10.1007/JHEP07(2018)103
- [12] S. Acharya, *et al.* phi meson production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at root s(NN)=2.76 TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 78 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6034-3
- [13] S. Acharya, *et al.* First measurement of Xi(0)(c) production in pp collisions at root s=7 TeV. PHYSICS LETTERS B 781 (2018) 8–19. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.03.061
- [14] S.Acharya, *et al.* Longitudinal asymmetry and its effect on pseudorapidity distributions in Pb-Pb collisions at root s(NN)=2.76 TeV. PHYSICS LETTERS B 781 (2018) 20–32. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.03.051
- [15] S.Acharya, et al. Prompt and non-prompt J/psi production and nuclear modification at

- mid-rapidity in p-Pb collisions at root s(NN)=5.02 TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 78 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5881-2
- [16] S.Acharya, *et al.* Search for collectivity with azimuthal J/psi-hadron correlations in high multiplicity p-Pb collisions at ,root s(NN)=5.02 and 8.16 TeV. PHYSICS LETTERS B 780 (2018) 7–20. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.02.039
- [17] S.Acharya, *et al.* Measurement of Z(0)-boson production at large rapidities in Pb-Pb collisions at root s(NN)=5.02 TeV. PHYSICS LETTERS B 780 (2018) 372–383. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.03.010
- [18] S.Acharya, *et al.* Lambda(+)(c) production in pp collisions at root s=7 TeV and in p-Pb collisions at root s(NN)=5.02 TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2018). URL http://dx.doi.org/10.1007/JHEP04(2018)108
- [19] S.Acharya, *et al.* pi(0) and eta meson production in proton-proton collisions at root s=8 TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 78 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5612-8
- [20] S.Acharya, *et al.* D-Meson Azimuthal Anisotropy in Midcentral Pb-Pb Collisions root S-NN=5.02 TeV. PHYSICAL REVIEW LETTERS 120 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.102301
- [21] S.Acharya, *et al.* Production of He-4 and (4)<(He) over bar> in Pb-Pb collisions at root(NN)-N-S=2.76 TeV at the LHC. NUCLEAR PHYSICS A 971 (2018) 1–20. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2017.12.004
- [22] S.Acharya, *et al.* Production of deuterons, tritons, He-3 nuclei, and their antinuclei in pp collisions at root s=0.9, 2.76, and 7 TeV. PHYSICAL REVIEW C 97 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.97.024615
- [23] S.Acharya, *et al.* Systematic studies of correlations between different order flow harmonics in Pb-Pb collisions at root s(NN)=2.76 TeV. PHYSICAL REVIEW C 97 (2018). URL http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.97.024906
- [24] S. Acharya, *et al.* The ALICE Transition Radiation Detector: Construction, operation, and performance. NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT 881 (2018) 88–127. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.028
- [25] S.Acharya, *et al.* Constraining the magnitude of the Chiral Magnetic Effect with Event Shape Engineering in Pb-Pb collisions at root s(NN)=2.76 TeV. PHYSICS LETTERS B 777 (2018) 151–162. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2017.12.021
- [26] D.Adamova, *et al.* J/psi production as a function of charged-particle pseudorapidity density in p-Pb collisions at root s(NN)=5.02 TeV. PHYSICS LETTERS B 776 (2018) 91–104. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2017.11.008

[27] S.Acharya, *et al.* First measurement of jet mass in Pb-Pb and p-Pb collisions at the LHC. PHYSICS LETTERS B 776 (2018) 249–264. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2017.11.044

Доклады на совещаниях коллаборации ALICE в 2018 году:

- 1. I.A. Pshenichnov, U.A.Dmitrieva, "Forward neutrons and protons from ultraperipheral Pb-Pb collisions: a quest of nuclear fragmentation at the LHC". ALICE Physics Week 25.10.18: I.A
- 2. I.A. Pshenichnov, U.A.Dmitrieva, Forward neutrons and protons from UPC of Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02TeV,ALICE UD meeting 01/10/2018
- 3. I.A. Pshenichnov, U.A.Dmitrieva, Secondary nuclei from Pb-Pb UPC at $\sqrt{s_{NN}}$ =5.02TeVllisions: Analysis Note and Monte Carlo, ALICE UPC meeting 06/03/2018
- 4. T.Karavicheva, A. Maevskaya "T0 multiple centrality trigger", PWG-pp-trigger Collaboration Meeting 4-07-2018
- 5. T.Karavicheva "T0/V0 stability for pp 13 TeV", PWG-MM-Luminosity Collaboration Meeting 6-04-2018
- 6. A.Maevskay, T.Karavicheva "Update on simulation", FIT weekly Meeting, 11-10-2018
- 7. Yu. Melikyan, V. Kaplin, T. Karavicheva, Discussion on the Planacon MCP-PMT magnetic field test, FIT collaboration meeting, 18.01.2018
- 8. Yu. Melikyan, Main results of the Planacon B-field test, FIT collaboration meeting, 01.02.2018
- 9. Yu. Melikyan, Effect of the recent MCP-PMT tests to the list of the tendering requirements, FIT collaboration meeting, 08.02.2018
- 10. Yu. Melikyan, Input for a discussion about PMT handling and testing procedures, FIT collaboration meeting, 19.04.2018
- 11. Yu. Melikyan, Update on MCP-PMT test bench preparation, FIT collaboration meeting, 07.06.2018
- 12. D.V. Serebtyakov, Yu.A. Melikyan, FIT Cherenkov array (T0+), FIT Production Readiness Review, 18.07.2018
- 13. Yu. Melikyan, Status of the test bench preparation for the MCP-PMT characterization, FIT collaboration meeting, 19.07.2018
- 14. Yu. Melikyan, I. Morozov, D. Serebryakov, Update from Moscow, FIT collaboration meeting, 30.08.2018

- 15. Yu. Melikyan, I. Morozov, D. Serebryakov, Status of the preparations for MCP-PMT bench testing, FIT collaboration meeting 25.10.2018
- 16. Yu. Melikyan, V.Kaplin, Update on MCP-PMT testing procedures, FIT collaboration meeting 15.11.2018
- 17. V. Kaplin, Yu. Melikyan, N. Vozniuk, Update on MCP-PMT testing procedures, FIT collaboration meeting 22.11.2018
- 18. A. Maevskaya, T0 data vs MC, DPG & BTG Calibration & Tracking meetings, 08-03-2018
- 19. A. Maevskaya, Status of FIT developments, FIT Collaboration meeting, 25-04-2018
- A. Maevskaya , Update on software and simulations, A FIT Collaboration meeting. Maevskaya , 30-0818
- 21. A. Maevskaya ,FIT simulation O2, FIT Collaboration meeting, 07-07-2018
- 22. A. Maevskaya ,FIT-T0 labels, FIT Collaboration meeting, 10-05-2018
- 23. A. Maevskaya ,FIT offline status, FIT Collaboration meeting, 19-04-2018
- 24. A. Maevskaya ,FIT p-Pb occupancy, FIT Collaboration meeting, 08-03-2018
- 25. A. Maevskaya ,T0 QA report, QA weekly meeting, 20-11-2018
- 26. A. Maevskaya, A.Shabanov, ,T0 QA report, QA meeting, 09-11-2018
- 27. A. Maevskaya ,T0 QA report, QA meeting, 10-11-2018
- 28. N. Kurepin "Moscow electronics scheme" AD meeting 7/02/2018
- 29. C.Mayer, K.Skazytkin, N.Kurepin "Estimate cost of readout electronics (FIT solution, CIU/CCIU solution, RTB3 solution) AD meeting 21/02/2018
- 30. N.Kurepin "Trigger for AD" AD meeting 14/03/2018
- 31. A. Kurepin "Study of last AD configuration issue", AD meeting 15/08/2018
- 32. E.Karpechev "AD ageing update using the latest cosmic data" AD meeting 10/10/2018
- 33. N.Kurepin "Properties of Russian scintillator and status" AD meeting 17/10/2018
- 34. E.Karpechev "Ageing comparison between muon and collision data" AD meeting 7/11/2018 Cosmic muon analysis
- 35. D.Serebryakov "FIT Electronics progress report", FIT collaboration meeting, 18-01-2018
- 36. I.Morozov ,D.Serebryakov "Mechanical construction of T0+ detector array",FIT Production Readiness Review,18-07-2018

37. I.Morozov ,D.Serebryakov "Cherenkov array (T0+",FIT Production Readiness Review,18-07-2018

Доклады на международных конференциях:

- 1. Устный доклад «Образование тяжелых вторичных ядер в столкновениях Xe-Xe и Pb-Pb на БАК» на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018», <u>У.А. Дмитриева</u>, Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, 10.04.2018
- 2. <u>U.A. Dmitrieva</u>, I.A. Pshenichnov, «Modelling transmutation of lead nuclei in ultraperipheral collisions at the LHC» устный доклад на VII международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий», Москва, НИЯУ МИФИ, 18.04.2018
- I.A. Pshenichnov, U.A. Dmitrieva, «Electromagnetic interactions of ultrarelativistic nuclei: a challenge for present and future heavy-ion colliders», Приглашенный доклад на XIII Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, Kracow, Poland, 22-26 Мая, 2018.
- 4. I.A. Pshenichnov, S.A. Gunin, "Electromagnetic interactions of nuclei at the FCC-hh", доклад на XV Международном семинаре по электромагнитным взаимодействиям ядер, Москва, 8-11 октября 2018 г.
- Y.Melikyan « Light sensors for the Fast Interaction Trigger for the upgrade of ALICE »133rd LHCC open session, CERN, Женева, 02/2018;
- 6. Y.Melikyan , «<u>Performance of Planacon MCP-PMT photosensors under extreme</u> working conditions», 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2018), Москва, 08/2018
- D.Finogeev , «Fully digital readout and trigger for fast Cherenkov counters», 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2018), Москва, 08/2018
- 8. D.Serebryakov «Photosensors and Front-end Electronics for the Fast Interaction Trigger detector of the ALICE experiment at CERN», <u>IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics</u>, October 22-26,2018, Moscow,Russia
- 9. A.Maevskaya "Fast Interaction Trigger for the upgrade of the ALICE experiment at CERN: design and performance", XXIV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, ISHEPPXXIV, September 17-22, 2018, Dubna, Russia

Доклады на всероссийских конференциях:

Устный доклад «О регистрации многонуклонных событий в столкновениях ядро-ядро с помощью передних калориметров (ZDC)» на VII межинститутской молодёжной конференции «Физика элементарных частиц и космология 2018», <u>У.А. Дмитриева</u>, И.А. Пшеничнов, Москва, ФИАН, 09.04.2018

Защита научно-квалификационных работ аспирантов:

Ю.А. Меликян, «Разработка регистрирующей системы детектора FIT эксперимента ALICE», 29.06.2018, каф. 11 НИЯУ МИФИ

- 8. Публикации по задаче «Исследование рождения векторных мезонов в адронядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)»
- 1. <u>T. Galatyuk, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, S. Morozov, O. Petukhov, A. Reshetin, A. Rost, A. Shabanov *et al.*, Tests of the Electromagnetic Calorimeter for HADES Experiment at GSI, KnE Energ.Phys. 3 (2018) 162-169</u>
- 2. <u>HADES</u> Collaboration (<u>J. Adamczewski-Musch</u> *et al.*) Centrality determination of Au + Au collisions at 1.23A GeV with HADES, Eur.Phys.J. A54 (2018) no.5, 85
- 3. <u>HADES</u> Collaboration (<u>J. Adamczewski-Musch</u> *et al.*) Σ0 production in proton nucleus collisions near threshold, Phys.Lett. B781 (2018) 735-740, DOI: <u>10.1016/j.physletb.2018.02.043</u>
- 4.<u>HADES</u> Collaboration (<u>J. Adamczewski-Musch *et al.*</u>). Deep sub-threshold φ production in Au+Au collisions, Phys.Lett. B778 (2018) 403-407, DOI: <u>10.1016/j.physletb.2018.01.048</u>
- 5. HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) et al.). Identical pion intensity interferometry in central Au+Au collisions at 1.23A GeV, Nov 15, 2018. 6 pp, e-Print: arXiv:1811.06213 nucl-ex
- 6. O. Petukhov, P. Chudoba, T. Galatyuk, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, A. Reshetin, A. Rost, A. Shabanov, O. Svoboda and P. Tlusty, Tests of Cherenkov Electromagnetic Calorimeter for the HADES experiment, Направлено в NIMA

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

 O. Petukhov, P. Chudoba, T. Galatyuk, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda and P. Tlusty, The 10th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors RICH 2018, Moscow, Russia, July 29 – August 4, 2018, "Tests of

- Cherenkov Electromagnetic Calorimeter for the HADES experiment".
- 2. A. Reshetin (on behalf of the HADES ECAL team), "First results of the ECAL cosmic tests in the HADES cave", Доклад на совещании коллаборации ХАДЕС (HADES Collaboration Meeting XXXV, 19 –23 February 2018, GSI, Darmstadt).

9. Публикации по задаче «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI»

- [1] <u>D. Finogeev</u>, <u>M. Golubeva</u>, <u>F. Guber</u>, <u>A. Ivashkin</u>, <u>A. Izvestnyy</u>, <u>N. Karpushkin</u>, <u>S. Morozov</u>, <u>A. Reshetin</u>, The PSD CBM supermodule response study forhadrons in momentum range 2 6 GeV/c at CERN test beams, **KnE Energ.Phys. 3 (2018) 333-339**, DOI: 10.18502/ken.v3i1.1763
- [2] N.Karpushkin, D.Finogeev, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Izvestnyy, V.Ladygin, S.Morozov, A.Kugler, V.Mikhaylov, A.Senger, aor the CBM collaboration; The Projectile Spectator Detector for measuring the geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment on FAIR, Принята в печать, **NIM A**, https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.054
- [3] V. Mikhaylov, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, V. Kushpil, S. Morozov, O. Svoboda, P. Tlusty, Radiation hardness of Silicon Photomultipliers for CBM@FAIR, NA61@CERN and BM@N experiments, NIM **A912** (2018) 241, https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.066
- [4] F. Guber, I. Korolko for the CBM PSD Collaboration, Projectile Spectator Detector and Electromagnetic Calorimeter Summary, **CBM Progress Report 2017**, <u>GSI-2018-00485</u>, **p.110**, Toia, A. (Editor)*; Selyuzhenkov, I. (Editor)* 2018, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt, ISBN: 978-3-9815227-5-4, doi:10.15120/GSI-2018-00485
- [5] A. Ivashkin, D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Izvestnyy, N. Karpushkin, S. Morozov and O. Petukhov, The PSD supermodule response to a few GeV protons measured at CERN test beams, **CBM Progress Report 2017**, **GSI-2018-00485**, **p.112**, doi:10.15120/GSI-2018-00485
- [6] S. Morozov, D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Izvestnyy, N. Karpushkin, S. Morozov, O. Petukhov, N.Galatyuk, A.Rost, The PSD read-out electronics, **CBM Progress Report 2017**, **GSI-2018-00485**, **p.114**, doi:10.15120/GSI-2018-00485
- [7] V. Mikhaylov, A. Kugler, V. Kushpil, S. Morozov, and O. Svoboda, Tests of the NA61 and the CBM PSD module response with irradiated SiPMs at CERN beams, **CBM Progress Report 2017**, <u>GSI-2018-00485</u>, p.116, doi:10.15120/GSI-2018-00485
- [8] F. Guber, D. Finogeev, M. Golubeva, A. Ivashkin, and S. Morozov, mPSD at mCBM, **CBM Progress Report 2017**, <u>GSI-2018-00485</u>, p.183, doi:10.15120/GSI-2018-00485

Доклады группы ИЯИ РАН на международных совещаниях и конференциях по

тематике СВМ

- F. Guber, M. Golubeva, A. Ivashkin, S.Morozov and A.Senger for the CBM and NA61 collaborations, "The Projectile Spectator Detectors for the CBM at FAIR and NA61/SHINE at CERN", The 27th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Venezia, Italy 13-19 May 2018
- N. Karpushkin, D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, V.Ladygin, S. Morozov, A. Kugler, V. Mikhailov, A. Senger, The Projectile Spectator Detector for measurement of geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment at FAIR, The 27th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Venezia, Italy 13-19 May 2018

Доклады на совещаниях коллаборации СВМ

- 1. **Fedor Guber**, PSD project Progress and Plans, 31st CBM Collaboration Meeting, March 19 -23, 2018, GSI, Darmstadt
- 2. **Alexander Ivashkin**, PSD modules calibration on cosmic muons and study of PSD supermodule response at CERN beams in 2017, 31st CBM Collaboration Meeting, March 19 -23, 2018, GSI, Darmstadt
- 3. **Sergey Morozov**, PSD FEE and readout prototypes tests, Status of PSD DCS, 31st CBM Collaboration Meeting, March 19 -23, 2018, GSI, Darmstadt
- 4. Marina Golubeva, **Alexander Ivashkin,** PSD centrality determination using asymmetry of energy deposition in the PSD, 31st CBM Collaboration Meeting, March 19 -23, 2018, GSI, Darmstadt
- 5. **Sergey Morozov**, Status of PSD digitization, 31st CBM Collaboration Meeting, March 19 -23, 2018, GSI, Darmstadt
- 6. **Fedor Guber,** Status of PSD, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018, GSI, Darmstadt
- Alexander Ivashkin, Summary of PSD supermodule tests at CERN and cosmic tests of constructed PSD modules at INR, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018, GSI, Darmstadt
- 8. **Sergey Morozov,** Status of PSD FEE and readout electronics prototypes tests, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018, GSI, Darmstadt
- 9. **Fedor Guber,** Status of new FHCAL with PSD modules for experiment at BM@N, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018, GSI, Darmstadt
- 10. **Marina Golubeva**, Evgeny Kashirin, First simulation results for new PSD CBM geometry with large beam hole, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018,

GSI, Darmstadt

- 11. **Fedor Guber,** Status and integration of the mPSD, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018, GSI, Darmstadt
- 12. **Fedor Guber**, PSD: Status-Issues-Outlook, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1-5, 2018, GSI, Darmstadt
- 13. **Sergey Morozov,** DCS Status PSD, 32nd CBM Collaboration Meeting, October 1- 5, 2018, GSI, Darmstadt

10. Публикации по задаче «Эксперимент MPD/NICA»

- 1. D. Finogeev et al., KnE Energy and Physics 3, 149 (2018)
- 2. A.Timoshenko et al., *Forward* hadron *calorimeter* at MPD/NICA. 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors, Italy. May 27- June 02, 2018.
- 3. A.Timoshenko et al., *Forward* hadron *calorimeter* at MPD/NICA, NIM A, in Press, 2018. https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.068
- 4. A.Ivashkin et al., Determination of geometry of heavy ion collisions with Forward Hadron Calorimeter (FHCal) at MPD/NICA. "XXIVth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", September 17 22, 2018.