

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

УТВЕРЖДАЮ

директор член-корр. РАН

Л.В.Кравчук

22 января 2018

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17, 539.125

№ государственной регистрации АААА-А16-116022510108-7

Инв.№

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физика атомного ядра, релятивистская ядерная физика

(промежуточный за 2017 год)

Научный руководитель темы

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

Рубцов Г.И.

22 января 2018

Москва 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

д.ф.-м.н. Рубцов Г.И. (введение, заключение)
22 января 2018

Исполнители:

к.ф.-м.н. Каравичева Т.Л. (раздел 1)
22 января 2018

к.ф.-м.н. Губер Ф.Ф.. (разделы 2-4)
22 января 2018

к.ф.-м.н. Ивашкин А.П. (раздел 5)
22 января 2018

к.ф.-м.н. Конобеевский Е.С. (раздел 6)
22 января 2018

д.ф.-м.н. Недорезов В.Г. (разделы 7-10)
22 января 2018

РЕФЕРАТ

Отчёт: 205 страниц, 123 рисунка, 7 таблиц.

Ключевые слова:

КВАРК-ГЛЮОННАЯ МАТЕРИЯ, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР (БАК), ЦЕРН, СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, СУПЕРДЕТЕКТОР АЛИСА, ДЕТЕКТОРЫ T0, ФИТ, УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ, ЧЕРЕНКОВСКИЙ СЧЕТЧИК, АМПЛИТУДА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИМПУЛЬС, ЭЛЕКТРОНИКА, ФОРМИРОВАТЕЛЬ, УСИЛИТЕЛЬ, ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ, АМПЛИТУДНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ФРОНТАЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР, МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ПЛОСКОСТЬ РЕАКЦИИ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТИМОСТИ, ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ, МИКРОКАНАЛЬНЫЕ ФЭУ

По задаче «Физика атомного ядра, релятивистская ядерная физика»

Объекты исследования:

Детекторы мегадетектора АЛИСА на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН:

Триггерный и время-пролётный детектор T0

Фронтальный интеллектуальный детектор ФИТ

AD детекторы (ALICE Diffraction)

Идентификация заряженных частиц по время-пролетному методу.

Измерение и мониторинг светимости с использованием детекторов T0 и V0

Тестирование лазерной системы калибровки для детектора T0 и ФИТ

Расчет эллиптического потока заряженных частиц методом плоскости событий

Эмиссия нуклонов вперёд ядрами свинца на БАК в результате их ультрапериферических и адронных взаимодействий

Ультрапериферические взаимодействия ядер ^{129}Xe на БАК

Будущий эксперимент с фиксированной мишенью AFTER на пучках БАК для физики адронов и столкновений тяжелых ионов

Физические и радиобиологические основы применения пучков различных ядер для лечения онкологических заболеваний

Цели работы:

Наладка и поддержание работоспособности в полном объеме детектора T0, входящего в зону ответственности российских институтов – участников мегапроекта АЛИСА:

Модернизация лазерной система калибровки для детектора T0 и детектора ФИТ.

Изготовление и тестирование элементов детектора ФИТ.

Проведение тестовых и пучковых сеансов эксперимента ALICE российскими физиками.

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

Анализ данных для вычисления триггерных (видимых) сечений при помощи метода Ван дер Меера,

Проведение исследований дифракционных процессов при столкновении протонов сверхвысокой энергии.

Получение данных о свойствах относительно холодной ядерной материи, образующейся в результате периферических и ультрапериферических взаимодействий ядер, вне области перекрытия ядерных плотностей.

Вычисление сечений электромагнитной диссоциации ядер ^{129}Xe на БАК с целью определения сечений эмиссии нейтронов для мониторинга светимости в соответствующем сеансе.

Поиск физических сигналов, свидетельствующих о существовании нового состояния вещества – кварк-глюонной плазмы в области энергий между максимальной энергией SPS ($\sqrt{s} \sim 29$ ГэВ) и стандартной энергией RHIC ($\sqrt{s} = 200$ ГэВ) в p-A и A-A столкновениях в эксперименте AFTER.

Представление докладов, обсуждение полученных результатов и координации работ на рабочих совещаниях коллаборации АЛИСА (ALICE weeks, ALICE PP meetings, ALICE Off-line meetings, ALICE Physics Forum, CERN Heavy Ion Forum, FIT meeting, FIT design review meeting), AFTER working group meetings, совещаниях Physics Beyond Colliders, всероссийских и международных научных конференциях.

Исследования коллективных эффектов, ненуклонных степеней свободы в ядрах и поляризационных явлений при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами в эксперименте DSS.

Моделирование образования вторичных ядер в результате электромагнитных взаимодействий ядер свинца ^{208}Pb на БАК.

Моделирование методом Монте-Карло на основе библиотеки Geant4 терапевтических полей протонов и ядер ^4He , ^{12}C и ^{16}O для сравнения и оценки их физических и радиобиологических характеристик.

Результаты работ:

Проведена работа по ремонту, замене узлов и блоков, выполнена наладка детектора T0, обеспечено экспертное сопровождение детектора T0 во время проведения сеансов измерений в эксперименте АЛИСЕ.

Изготовлены элементы детектора ФИТ.

Проведены исследования прототипа детектора ФИТ в шахте эксперимента ALICE.

Выполнены первичная обработка экспериментальных данных, полученных в сеансах физических измерений на пучках Большого адронного коллайдера.

Был проведен анализ данных для вычисления триггерных (видимых) сечений при помощи метода Ван дер Меера для p-p столкновений с энергиями $\sqrt{s_{NN}} = 5$ и 13 ТэВ.

Проведено моделирование центральных дифракционных взаимодействий протонов

В рамках программы модернизации детекторных систем установки ALICE продолжены работы по исследованию возможности использования модуля TRB3 (разработка GSI, Германия) для передних сцинтилляционных детекторов AD.

Путем анализа данных, полученных с помощью ALICE ZDC, собраны предварительные данные по вылету определённого количества нейтронов, сопровождающихся эмиссией вперёд одного протона.

С помощью модели RELDIS вычислены сечения электромагнитной диссоциации ядер ^{129}Xe в результате их столкновений на БАК.

Осуществлялась разработка, отладка и использование программного обеспечения для обработки экспериментальных данных, получаемых в эксперименте АЛИСА на протонных и протон-ядерных пучках Большого адронного коллайдера.

Изучены и объяснены вариации относительной биологической эффективности терапевтических пучков протонов и ядер ^4He , ^{12}C , ^{16}O на радиальной границе терапевтического объема, показаны преимущества ^4He для терапии.

Проведен расчет светимости для различных мишеней толщиной 500 мкм для возможной установки фиксированной мишени в форме тонкого кольца, помещенной в гало пучка в эксперименте AFTER.

Проведена калибровка сцинтилляционных детекторов пробегового телескопа для измерений на пучке Нуклотрона ОИЯИ для эксперимента DSS.

Российские учёные приняли участие в рабочих совещаниях АЛИСА (ALICE weeks, ALICE PWG meetings, ALICE Off-line meetings, ALICE PHYSICS Forum, Heavy Ion Forum CERN, FIT meeting, FIT design review meetings). Принимали участие в AFTER working group meetings и совещаниях Physics Beyond Colliders в ЦЕРНе, в обсуждении постановки эксперимента с фиксированной мишенью на установке ALICE. По полученным результатам

были сделаны доклады и проводились их обсуждения для координации работ.

Итоги внедрения результатов НИР:

В 2017 году проводились физические измерительные сеансы на пучках сталкивающихся протонов и пробных столкновениях ядер ксенона. T0 детектор принимал участие (100%) во всех измерительных сеансах проводимых экспериментом ALICE.

Идентификация частиц в промежуточном интервале поперечного импульса (от 0.5 до 3-4 GeV/c) выполняется с использованием время-пролетной системы. Важной составляющей этого анализа является точное определение момента столкновения пучков. В течение всего 2017 года разрешение определения момента столкновений с использованием детектора T0 не превышало 45 пс как для протон-протон, так и ксенон-ксенон взаимодействий.

Начиная с 2012 года основным люминометром эксперимента АЛИСЕ для pp и p-Pb столкновений является детектор T0, который обеспечил мониторинг светимости во всех измерительных сеансах 2017 года для pp столкновений. Триггерные сигналы детектора T0 используются для настройки различных триггерных подсистем АЛИСЕ.

Завершен анализ данных по определению видимых сечений для p-p столкновений с энергиями в системе центра масс 13 ТэВ и 5 ТэВ, на основе данных, полученных во время сканирования методом Ван дер Мера в августе и ноябре 2015 года. Эти сечения используются для определения абсолютного сечения рождения J/ψ , $\psi(2S)$ и других важных и интересных физических процессов.

В пробном сеансе при столкновении ядер ксенона показана возможность определения центральности соударений с помощью детекторов ADA и ADC. Вычисленные сечения электромагнитной диссоциации ядер ^{129}Xe в их столкновениях на БАК использованы для оценки светимости в эксперименте ALICE в пробном сеансе.

Предложен эксперимент с мишенью в форме тонкого кольца, помещенного в гало пучка, который может быть проведен на установке ALICE. Мишень может помещаться в рабочее положение с помощью специального устройства после проведения пучка.

Научно-технический уровень выполненной научно-исследовательской работы находится на уровне лучших мировых достижений в данной области.

Задача «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA61)».

Программа научно-исследовательских работ эксперимента NA61/SHINE включает несколько направлений:

- поиск критической точки фазового перехода в сильновзаимодействующей ядерной материи, которая образуется в релятивистских ядро-ядерных столкновениях и детальное исследование начала деконфайнмента, т.е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи;
- измерения сечений образования и выходов заряженных адронов, необходимых для экспериментов в области нейтринной физики;
- измерения сечений образования пионов и каонов в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей.

Поиск критической точки фазового перехода в сильновзаимодействующей материи в эксперименте NA61/SHINE ведется посредством сканирования фазовой диаграммы, что достигается проведением измерений выходов заряженных частиц в диапазоне энергий 13 – 150 АГэВ для разных размеров сталкивающихся систем. Программа экспериментов NA61/SHINE включает проведение измерений выходов заряженных частиц в $p+p$, $p+Pb$ и в центральных столкновениях ядер ${}^7\text{Be}+{}^9\text{Be}$, $\text{Ar}+\text{Sc}$, $\text{Xe}+\text{La}$ и $\text{Pb}+\text{Pb}$ при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150/158 ГэВ/с. В 2017 году получены новые экспериментальные данные по измерению выходов заряженных частиц в реакции $\text{Xe}+\text{La}$ при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150 ГэВ/с. Тем самым, завершена программа измерений по сканированию фазовой диаграммы.

В NA61/SHINE помимо исследований обычных распределений по множественности и поперечным импульсам вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, исследуются также пособытийные флуктуации так называемых сильно интенсивных величин. Последние представляют собой комбинации первых и вторых моментов распределений таких физических величин, как множественность, поперечные импульсы вторичных частиц и энергии не взаимодействовавших нуклонов-спектаторов. Особенностью сильно интенсивных величин является то, что они не зависят ни от объема, ни от флуктуации объема взаимодействующих ядер. Таким образом, резкое изменение величины таких флуктуаций может являться отличительной чертой новых физических явлений, ожидаемых вблизи критических областей. Предварительный анализ распределений по флуктуациям сильно интенсивных величин в реакциях $p+p$, $\text{Be}+\text{Be}$ и $\text{Ar}+\text{Sc}$ показал отсутствие указаний на существование каких-либо особенностей в этих распределениях, которые могли бы свидетельствовать об обнаружении критической точки фазового перехода. Анализ полученных новых экспериментальных данных для реакции $\text{Xe}+\text{La}$, а также данные, полученные в 2016г/ для реакции $\text{Pb}+\text{Pb}$ при импульсах ядер свинца 30, 40 и 150 ГэВ/с, позволят значительно расширить область поиска критической точки на фазовой диаграмме.

По предложению ИЯИ и НИЯУ МИФИ, научная программа исследований NA61/SHINE была расширена – теперь она включает еще и исследование коллективных потоков в ядро-ядерных столкновениях в том же диапазоне энергий. Анизотропные потоки, проявляющие себя в анизотропии испускания частиц в плоскости поперечной направлению пучка, являются одними из важных наблюдаемых, чувствительных к уравнению состояния образованной материи. В 2017г. выполнен предварительный анализ экспериментальных данных, полученных в 2016 г., по исследованию прямых потоков пионов в столкновениях ядер свинца в зависимости от центральности столкновений при импульсе налетающих ядер свинца 30A ГэВ/с. Для оценки плоскости события и центральности взаимодействия использовался передний адронный калориметр. Показано, что с использованием новых данных NA61/SHINE по столкновениям Pb+Pb, полученным в ноября 2016 и планируемыми в 2018 году открывается возможность расширить измерения прямых и эллиптических потоков как функцию центральности в диапазоне энергий пучка 13 – 158 ГэВ на нуклон в гораздо больших передних быстротах по сравнению с результатами RHIC, что позволит впервые детально изучить зависимость потоков протонов и пионов от центральности столкновений и от налетающей энергии ядер свинца.

В течение 2017г. группой ИЯИ были проведены Монте Карло расчеты отклика калориметра для адронов и ионов ксенона с энергией в диапазоне 13 - 150 АГэВ/с, включая расчеты энергетического разрешения и линейности отклика переднего адронного калориметра, которые сравнивались с экспериментальными результатами.

Экспериментальное наблюдение эффектов, связанных с фазовым переходом первого рода между адронной и партонной или кварковой материей заканчивающимся критической точкой было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи в экстремальном состоянии.

В 2017гг. получены также новые экспериментальные данные по рождению пионов и каонов в столкновениях протонов и пионов с импульсами 30 - 120 ГэВ/с с легкими ядрами, которые необходимы для нейтринных экспериментов в FERMILAB и для физики космических лучей.

Группа ИЯИ, осуществляла в 2017г. постоянную экспертную поддержку функционирования калориметра во время сеансов, вела постоянный мониторинг процесса набора и качества получаемых данных с переднего адронного калориметра, проводила его энергетическую калибровку в специально выделенному для этой цели тестовому сеансу. Передний адронный калориметр (PSD – Projectile Spectator Detector) используется в Xe+La

эксперименте для пособытийного определения центральности и угла плоскости реакции, в этой реакции.

В 2017г. группы ИЯИ РАН участвовали во всех тестовых и физических сеансах, в соответствии с утвержденной в ЦЕРН программой экспериментов коллаборации NA61/SHINE: Сеанс 1 (7 июня – 3 июля); 7 июня – 18 июня Калибровка и тестирование PSD; 19 июня – 3 июля $p+Pb$ столкновения при 30A ГэВ/с

Сеанс 2: (2 августа – 6 сентября) Программа для физики нейтрино с детекторами FTPC и со считыванием данных с ToF-F с помощью DRS4

Сеанс 3: (9 октября – 18 декабря); (9 октября – 23 октября) $p+Pb$ столкновения при 40A ГэВ/с; (23 октября – 18 декабря) $Xe+La$ столкновения при 6 энергиях налетающих ядер ксенона.

Группа ИЯИ дежурила в регулярных сменах во время всех этих экспериментов, Всего группа ИЯИ в течение 2017г. отдежурила около 74 смен.

В 2017г. коллаборацией начата разработка программы экспериментов на установке NA61/ на период до 2024г. Новая программа нацелена на исследование выходов частиц с открытым очарованием (open charm), D-мезонов. Последние могут рождаться только на самых начальных стадиях ядро-ядерных столкновений и их регистрация дает тем самым уникальную возможность исследовать впервые при данных энергиях, вблизи порога рождения, процессы их взаимодействия с кварк-глюонной плазмой, которая может образовываться на более поздней стадии. Также при совместном исследовании выходов D-мезонов и скрытого очарования (выход J/ψ мезонов) возможна проверка эффектов экранирования цвета (скрининга) при связывании очарованных кварков в нейтральных по цвету нейтральных J/ψ [19, 20, 21], поэтому данные исследования чрезвычайно интересны и актуальны. Особенно интересны такие исследования вблизи порога рождения D0-мезонов при энергиях SPS. Для этих экспериментов интенсивность пучков ядер свинца и скорость набора данных планируется поднять более чем на порядок, по сравнению с интенсивностью пучка действующего эксперимента. Для этого потребуются модернизация практически всех детекторов установки. Группой ИЯИ РАН в 2017г. был разработан и подготовлен проект модернизации переднего адронного калориметра для новых экспериментов NA61/SHINE после 2020г. Планируется, что все работы по модернизации адронного калориметра установки NA61, включая их монтаж, установку фотодетекторов, аналоговой и цифровой электроники будут проведены в течение 2018-2019гг силами ИЯИ РАН в ЦЕРН. В течение 2019 – 2020гг будет проведена интеграция системы считывания калориметров в DAQ NA61/SHINE и проведены тесты на космических мюонах и пучках SPS. Подготовлен проект соглашения между коллаборациями CBM, NA61 и

ИЯИ об использовании модулей калориметра установки CBM, изготовленных в ИЯИ РАН, для временного использования их в модернизированном адронном калориметре установки NA61 в этих экспериментах.

8-12 Мая 2017г. силами НИЯУ МИФИ и ИЯИ РАН было организовано и проведено совещание международной коллаборации NA61/SHINE в МИФИ и ИЯИ РАН.

За 2017 год коллаборацией NA61/SHINE в соавторстве с группой ИЯИ опубликовано 3 работы по данной теме. Кроме того, группой ИЯИ опубликованы 2 отдельных работы.

Сотрудниками ИЯИ в 2017г. было сделано 2 доклада на международных конференциях и 9 докладов на международных рабочих совещаниях коллаборации.

Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармштадт, Германия)».

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) на ускорительном комплексе ФАИР в Дармштадте, Германия, направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи в области высокой барионной плотности, где она демонстрирует богатую структуру при конечных значениях барионных химических потенциалов. Это и предсказанный фазовый переход первого порядка между адронной и партоной или кваркониевой материей, критическая точка фазового перехода, киральный фазовый переход.

В лаборатории горячая и плотная ядерная материя исследуется в широком диапазоне температур и плотности при столкновении атомных ядер при высоких энергиях. Цель экспериментов в RHIC и LHC - исследовать свойства ядерной материи при очень высоких температурах и почти нулевых чистых барионных плотностях. Несколько экспериментальных программ посвящены исследованию фазовой диаграммы КХД при высоких чистых барионных плотностях. STAR коллаборация в RHIC сканирует энергией пучка для поиска критической конечной точки фазового перехода. Для той же цели измерения проводятся на CERN-SPS с усовершенствованным детектором NA49 (NA61) и с использованием ионных пучков легких и средних размеров. В Объединенном институте ядерных Исследования (ОИЯИ) в Дубне создается коллайдер NICA, на котором планируются эксперименты с целью поиска и исследования смешанной фазы сосуществования ядерной материи.

Исследовательская программа эксперимента CBM направлена на исследование сжатой барионной материи на первичных пучках синхротрона SIS100 ускорительного комплекса ФАИР в Дармштадте (протоны до 29 ГэВ, Au до 11A GeV, ядра с $Z / A = 0,5$ до 14A GeV) при интенсивностях ионов золота до 10^9 в секунду. Диагностические пробы для исследования

плотной фазы, такие как барионы с большой странностью, дилептонные пары и очарованные частицы будут впервые измерены CBM эксперименте в диапазоне энергий пучка до 11 АГэВ. Поэтому эксперимент CBM имеет уникальный потенциал для открытий на SIS100.

С учетом возможностей измерений при очень высоких интенсивностях пучков тяжелых ионов и высоких скоростях набора данных, физическая программа измерений на установке CBM будет направлена на исследование уравнения состояния барионного вещества при плотностях сравнимых с плотностью нейтронных звезд, исследование свойств адронов в среде с целью поиска явлений, связанных с частичным восстановлением киральной симметрии, исследование фазовых переходов от адронной материи к кваркониновой или партонной материи при высоких чистых барионных плотностях. Планируются также эксперименты по поиску и исследованию гиперядер, странных дибарионов и массивных странных объектов, исследовании механизмов рождения чармиприванных частиц и свойств очарованных частиц в плотной ядерной материи.

Экспериментальное открытие особенностей фазовой диаграммы КХД было бы большим прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи. В равной степени важной является количественная экспериментальная информация о свойствах адронов в плотной ядерной материи, которая могут пролить свет на восстановление киральной симметрии и происхождение масс адронов.

Практически весь набор наблюдаемых величин, включая пособытийные флуктуации, и выход даже таких редких частиц как J/Ψ , предполагается изучать в зависимости от центральности столкновений, которая характеризует плотность энергии, достигаемой в этих реакциях. Для определения этих глобальных характеристик событий – центральности, а также угла плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях на установке CBM будет использоваться передний адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectile Spectator Detector.

ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации CBM за разработку, изготовление и подготовку этого калориметра к физическим экспериментам на ускорительном комплексе ФАИР. В течение 2017г. в ИЯИ РАН был выполнен целый ряд работ, связанный с созданием, и подготовкой переднего адронного калориметра к экспериментам на установке CBM. В частности,

- завершены работы по изготовлению и сборке 45 модулей переднего адронного калориметра установки CBM. Эти работы проводятся в соответствие с подписанным контрактом ФАИР-ИЯИ. Ведется тестирование модулей калориметра на космике на оборудованном стенде. Разрабатывается методика калибровки продольных секций модулей калориметра на космике В течение 2017 г. группой ИЯИ продолжались работы по

тестированию на стендах в ИЯИ РАН и в GSI различных прототипов аналоговой и считывающей электроники для переднего адронного калориметра CBM.

- Проведены измерения отклика супермодуля адронного калориметра CBM на каналах вторичных пучков протонов и пионов T9 и T10 в ЦЕРНе. Для считывания сигналов с фотодиодов S12572-010P производства Hamamatsu использовалась электроника с прямым методом считывания формы импульса (быстрый АЦП ADC64s), разработанная в ОИЯИ.

- Проведены исследования отклика одного из модулей калориметра в диапазоне энергий протонов 2 – 10 ГэВ и 80 ГэВ с фотодиодами, предварительно облученными нейтронами, для определения их радиационной стойкости, предполагается использовать такие типы фотодиодов для модулей калориметра CBM. Результаты проведенных измерений показали, что энергетическое разрешение калориметра с фотодиодами, облученными потоком нейтронов 2×10^{11} нейтронов/см² падает всего лишь на 4% по сравнению с разрешением, полученным с необлученными фотодиодами.

- Выполнено моделирование (в сотрудничестве с группой в GSI) радиационных доз и потоков нейтронов, которые ожидаются для переднего адронного калориметра на установке CBM при энергиях SIS100, в зависимости от диаметра отверстия для прямого пучка в центре калориметра. Было показано, что потоки нейтронов в местах расположения фотодетекторов в 4-х центральных модулях калориметра можно существенно уменьшить, если центральное пучковое отверстие в калориметре увеличить с существующих 60 мм до 200 мм. При этом суммарный поток нейтронов на выходе центральных модулей не будет превышать 2×10^{11} нейтронов/см², что является приемлемым уровнем для стабильной работы фотодетекторов.

- В 2017 г. начаты работы по проекту mCBM в ГСИ. Исследуется возможность использования одного модуля в качестве mPSD, что позволит интегрировать считывание сигналов с этого модуля в общую систему считывания и передачу данных установки mCBM и исследовать отклик модуля калориметра при нагрузках и дозах облучения, близких к ожидаемым в эксперименте CBM.

- Разработана конструкция калориметра ZDC для установки BM@N с использованием модулей калориметра установки CBM. Начата подготовка к сборке калориметра в ОИЯИ. Завершена подготовка к сеансу по измерению отклика модуля калориметра CBM на пучках углерода, аргона и криптона на установке BM@N, который планируется в феврале 2018 г.

За 2017 год коллаборацией CBM в соавторстве с группой ИЯИ опубликовано 3 статей по данной теме. Сотрудниками ИЯИ в 2017г. было сделано 2 доклада на международных конференциях и 10 доклада на международных рабочих совещаниях коллаборации.

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 (High Acceptance DiElectron Spectrometer) и на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи в экстремальном состоянии, которая образуется в ядро-ядерных столкновениях. 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 установках ХАДЕС направлена на исследования ядерной материи при больших значениях барионной плотности и умеренных температурах. Известно, что при нулевой температуре и барионном химическом потенциале физический КХД-вакуум обладает двумя основными характеристиками: конфайнментом и спонтанно нарушенной киральной симметрией. Нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. Однако, уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе (энергии действующего ускорителя в GSI), ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке ХАДЕС 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 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.

Для корректной интерпретации данных, полученных в столкновениях тяжелых ионов, необходима также информация об элементарных нуклон-нуклонных 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 также единственным экспериментом в ГСИ, который будет получать экспериментальные данные на модернизированном ускорителе SIS18 в рамках объявленной программы ФАИР-фаза-0. В 2017 году в ГСИ утверждена программа дальнейших экспериментов на ХАДЕСе и выделено пучковое время на 2018 г. (88 смен) для эксперимента Ag+Ag на ускорителе SIS18 при энергии налетающих ядер серебра 1.65 АГэВ и 87 смен выделено для проведения экспериментов на пучке пионов в 2019 г. 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 АГэВ. Наряду с установкой ХАДЕС, на ускорительном комплексе ФАИР планируется эксперимент CBM, который позволит проводить ядро-ядерные эксперименты при значительно более высоких интенсивностях пучка, чем на ХАДЕСе и, тем самым, исследовать выходы частиц с очень низкой множественностью, включая даже J/Ψ. При столкновении тяжелых ядер в области энергий 2 – 11 АГэВ достигается максимальная плотность ядерной материи (порядка $7\rho_0$) и здесь возможно наблюдение эффектов, связанных с фазовым переходом первого рода между адронной и партонной или кварковой материей заканчивающимся критической точкой, а также эффектов, связанных с киральным фазовым переходом. Экспериментальное открытие этих процессов было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи в экстремальном состоянии.

Группа ИЯИ отвечает в эксперименте ХАДЕС за подготовку, экспертное обслуживание во время сеансов и калибровку переднего 288 сцинтилляционного годоскопа, который используется в ядро-ядерных экспериментах для определения центральности и угла плоскости реакции, а также участвует в сборке, тестировании и калибровке новой детекторной системы ХАДЕС – электромагнитного калориметра. Группа участвует также и в анализе полученных ранее на установке ХАДЕС экспериментальных данных.

В 2017 году завершены работы по модернизации переднего 288-канальногсцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) (замена фотоумножителей, реконструкция механической платформы). Этот годоскоп планируется использовать в эксперименте Ag+Ag при энергии налетающих ядер серебра 1.65 АГэВ на ускорителе SIS18 в 2018 году для определения центральности и угла плоскости реакции в Ag+Ag столкновениях.

Проведена сборка, тестирование и монтаж модулей для 3х секторов нового электромагнитного калориметра (ECAL) установки ХАДЕС. Электромагнитный калориметр с четырьмя полностью собранными секторами (из 6) будет использован в эксперименте Ag+Ag на действующем ускорителе SIS18 в GSI уже в 2018 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 $p > 400$ МэВ/с. В 2019 г. году планируется завершить полную сборку калориметра.

Разработана методика и получены предварительные результаты по определению центральности в столкновениях ионов золота Au+Au при энергии и налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с помощью переднего годоскопа FW (Forward Wall) установки HADES. Исследовались возможность определения центральности столкновений с помощью распределения по множественности хитов в FW годоскопе. Данный метод позволит избежать различных автокорреляций, которые могут быть достаточно велики при стандартном методе определения центральности с помощью количества хитов в TOF детекторах или MDC.

Получены предварительные результаты по анализу систематики при расчетах коллективных потоков заряженных частиц в экспериментальных данных по столкновению ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке ХАДЕС в 2012 г. Исследованы эффекты, связанные с высокой плотностью треков в центральных на измеренные величины коллективных потоков и методы их коррекции.

За 2017 год коллаборацией ХАДЕС в соавторстве с группой ИЯИ опубликовано 5 статей по данной теме. Кроме того, группой ИЯИ подготовлена в печать 1 статья.

Сотрудниками ИЯИ в 2017г. было сделан 1 доклад на международной конференции и 2 доклада на международных рабочих совещаниях коллаборации.

Задача «Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов».

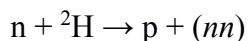
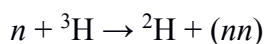
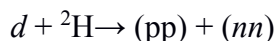
В отчёте приведены новые результаты, полученные в 2017 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особое внимание уделено изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Проводилось изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов, релятивистских ионов и фемтосекундных тераваттных лазеров. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню.

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

веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров.

Задача «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики».

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в nd и pd взаимодействиях, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования nn и pp корреляций в малонуклонных системах разработана программа экспериментов по исследованию реакций



в которых впервые будет проведено прямое определение энергии nn -виртуального синглетного 1S_0 состояния в различных реакциях и при различных энергиях налетающих частиц.

Данные для энергии nn -виртуального уровня в первой реакции при энергии дейтронов 15 МэВ получены и опубликованы в 2017 г. В результате проведенного χ^2 -анализа экспериментальных и моделированных данных получено значение $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ, которое можно соотнести с величиной nn -длины рассеяния $a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$ Фм, при значении эффективного радиуса $r_{nn} = 2.82$ Фм.

Разработана методика определения энергии pp -виртуального синглетного 1S_0 состояния в различных реакциях. Для проведения эксперимента создан матричный детектор на основе сцинтилляционных кристаллов LFS-8 и кремниевых фотоумножителей. Детектор позволит определять энергии и угол вылета двух коррелированных протонов из развала pp виртуального синглетного состояния.

Проведен анализ данных о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученных в последние годы в реакциях nd и dd -развала. 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. Из полученной зависимости можно определить значение длины рассеяния при $R \rightarrow \infty$, т.е. в отсутствие влияния на эту величину $3N$ сил.

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

Работы в рамках темы посвящены решению фундаментальной проблемы ядерной физики – исследования кластерной структуры ядер, в частности, существования 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 ${}^6\text{He}$, в котором существует dineйтронная компонента. Для ядра ${}^6\text{Li}$, также обсуждается структура этого ядра ${}^4\text{He} + (np)$.

В рамках темы предложено исследование реакции подхвата кора из двухнейтронных гало-ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$. В эксперименте NN -корреляции в гало-ядре будут оценены по энергии квазисвязанного состояния NN -пары. В результате кинематического моделирования реакции ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (nn) \rightarrow {}^6\text{Li} + n + n$ показано, что энергия nn -квазисвязанного состояния может быть определена по форме энергетического спектра нейтронов, вылетающих при развале этого состояния, определены параметры планируемого эксперимента [1].

В эксперименте будет использован пучок ${}^6\text{He}$ (${}^6\text{Li}$) с энергией $\sim 5\text{--}10$ МэВ/нуклон и тонкая мишень из дейтерированного полиэтилена. В эксклюзивном эксперименте будут регистрироваться как заряженная частица (${}^6\text{Li}$), так и один или два нейтрона. Методика детектирования нейтронов в эксперименте на пучке радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ опробована в сеансе на циклотроне У-400 в ЛФЯР ОИЯИ. Показана возможность выделения нейтронных 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 неустойчивой (распадающейся) структуре. Характерными бороминовским ядром является ядро ${}^9\text{Be}$, развал которого может происходить на кластеры $\alpha + \alpha + n$ или через нестабильные промежуточные ядра: ${}^8\text{Be}$ или ${}^5\text{He}$.

В рамках темы начато исследование структуры ядра ${}^9\text{Be}$ в реакциях передачи дейтрона и квазисвободного рассеяния дейтрона на кластерах, существующих в исследуемом ядре. Результаты моделирования показали, что каждому каналу реакции соответствует своя специфическая кинематика, позволяющая выделить события связанные с реакцией на различных кластерах. Исследование проводится при энергии налетающих дейтронов 15 МэВ в НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцина. Получены предварительные результаты исследования

угловой зависимости реакций ${}^9\text{Be}(d,d){}^9\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(d,t){}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(d,p){}^{10}\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}(d,\alpha){}^7\text{Li}$ с возбуждением основных и низколежащих возбужденных уровней ядер ${}^{8-10}\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}$.

Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений 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 нейтронно-активационного анализа 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 низкофоновом гамма-спектрометре. С помощью комплекса проведены измерения и отработана методика изучения фотоядерных реакций, исследования активности естественно-радиоактивных изотопов U и Th рядов, Be-7 и K-40 и измерения содержаний в атмосферных аэрозолях и осадках нерадиоактивных элементов. Начаты работы по изучению спектра нейтронов фотонейтронного источника.

Задача «Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8».

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

В результате работы создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. источник обеспечивает поток тепловых нейтронов порядка $10^8 - 10^9$ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения.

Для оптимального использования источника были проведены работы по модернизации линейного ускорителя электронов. В результате модернизации ускорителя ток пучка электронов увеличен с 10 до 40 – 60 мкА при частоте повторения 50 Гц. В процессе работы проводились экспериментальные исследования характеристик источника. Разработана и

реализована методика, позволяющая оперативно и с хорошим воспроизведением устанавливать заданную энергию пучка в пределах 4 – 10 МэВ и осуществлять эту процедуру при условии многократных коротких прерываний работы ускорителя в соответствии с требованиями эксперимента. Для изучения возможности измерения энергетической зависимости сечений фотоядерных реакций на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 использовалась процедура измерения сечений с помощью метода квазимонохроматизации тормозного спектра фотонов, отработана методика и проведены измерения методом наведенной активности энергетической зависимости выхода реакций $(\gamma, \gamma')^m$ на некоторых изотопах кадмия и индия при энергии «моноэнергетических» фотонов 4 – 8.5 МэВ. Ведутся работы по автоматизации контроля режимов основных систем ускорителя ЛУЭ-8 и исследованию параметров дифрактометра тепловых нейтронов на импульсном источнике нейтронов на базе ЛУЭ ИЯИ РАН. Начаты работы по изучению спектра нейтронов фотонейтронного источника.

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 при энергиях нейтронов 0.04 – 3.0 МэВ для четно-четных изотопов области массовых чисел $56 \leq A \leq 246$ в рамках оптической модели со связью каналов с целью получения единого оптимального описания нейтронных данных. На данном этапе работ диапазон рассматриваемых энергий нейтронов был расширен в сторону увеличения. Создано новое программное обеспечение для таких расчетов.

Анализ данных позволил очертить круг возможных задач для экспериментальных исследований на фотонейтронном источнике ускорителя ЛУЭ-8. Проведены расчеты параметров экспериментальной установки.

Проведено моделирование эксперимента с целью оценки возможности работы на «квазимоноэнергетическом» пучке нейтронов. Проведены измерения спектров нейтронов, производимых в W и Be мишенях фотонейтронного источника ускорителя ЛУЭ-8.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Реферат	3
Введение	17
Основные научные исследования	36
1. Эксперимент АЛИСА (ЦЕРН)	36
1.1 детектор T0 и детектор ФИТ	36
1.2. Эмиссия нуклонов вперёд в периферических и ультрапериферических взаимодействиях ядер на БАК	55
1.3. ALICE Diffraction, AD детектор	61
1.4. Эксперимент с фиксированной мишенью AFTER на пучках LHC для физики адронов и столкновений тяжелых ионов	66
1.5. Эксперимент DSS. Исследования коллективных эффектов, ненуклонных степеней свободы в ядрах и поляризованных явлений при столкновении протонов и тяжелых ионов с ядрами.	70
1.6. Прикладные исследования	70
2. Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA61)	73
3. Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармштадт, Германия)	90
4. Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)	115
5. Эксперимент MPD/NICA	131
6 Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов	137
7 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики	141
8. Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях	149
9. Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров	159
10. Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8	165
11. Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы	169
Заключение	175
Публикации	185

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчёте используются следующие термины:

Адроны – сильно взаимодействующие частицы.

АЛИСА, ALICE (*A Large Ion Collision Experiment*) - один из международных мегапроектов на ЛНС, в основном ориентированный на изучение взаимодействий тяжелых ионов.

БАК (*LHC*, Большой адронный коллайдер) – самый высокоэнергетичный ускоритель в мире, введённый в строй в 2008 г. в ЦЕРНе.

Банч – сгусток частиц в пучке коллайдера.

Бин – шаг или полоса гистограммы, заполняемой в результате моделирования или набора данных,

Глюоны – переносчики сильного взаимодействия.

ГэВ – единица энергии, равная 10^9 электроновольт.

Кварки – фундаментальные бесструктурные частицы Стандартной модели, не наблюдающиеся в свободном виде, но входящие в состав адронов.

Коллайдер – тип ускорителя, где сталкиваются встречные пучки.

КХД – квантовая хромодинамика – теория, описывающая сильные взаимодействия при высоких энергиях.

Мезоны – адроны, состоящие из кварка и антикварка.

МэВ – единица энергии, равная 10^6 электроновольт.

Пьедестал – уровень шума детектора и сопряженной с ним электроники от которого отсчитывается амплитуда полезного сигнала

Псевдобыстрота – используемая в физике высоких энергий безразмерная физическая величина, характеризующая отклонение направления вылета частицы от оси пучка .

Пикосекунда – временной интервал равный 10^{-12} секунды.

«Раны» (Runs) – результаты серии измерений.

ТэВ – единица энергии, равная 10^{12} электроновольт.

Фитирование – аппроксимация экспериментальных данных определенной функцией.

Онлайн (online) – обработка событий во время измерений.

Оффлайн (offline) – обработка событий после окончания измерений.

СТР - Central Trigger Processor –Центральный триггерный процессор .

ЦЕРН – Европейская организация ядерных исследований в Женеве, Швейцария.

УПС – Ультрапериферические столкновения ядер происходящие без перекрытия их ядерных плотностей, за счет электромагнитного взаимодействия.

AD- (ALICE Diffractive) детектор

AliRoot - Программа для детального моделирования процессов рождения и регистрации частиц на установке АЛИСА, а также для анализа данных, полученных с этой установки.

BC- (Bunch Crossing)- синхросигнал ускорителя

DAQ – система сбора экспериментальных данных.

DCS (*Detector Control System*) – система медленного контроля детектора.

DQM (*Data Quality Monitoring*) – система контроля качества набранных данных.

FMD (Forward Multiplicity Detector) – Фронтальный детектор множественности

minimum bias events– совокупность событий столкновений ядер без отбора по каким-либо параметрам

MIP – (*Minimum Ionizing Particle*)-минимально ионизирующая релятивистских частица.

PYTHIA – генератор взаимодействий элементарных частиц.

RHIC – коллайдер релятивистских тяжелых ионов Национальной лаборатории в Брукхэйвене, США

T0 – детекторное устройство ALICE являющееся стартовым триггерным детектором.

TOF(time-of-flight) – методика идентификации частиц на основе измерения их времени пролета от мишени до детектирующего устройства

V0- детекторное устройство, передний триггерный детектор

FIT (Fast Interaction Trigger) - Фронтальный Интеллектуальный Триггер, детекторное устройство ФИТ

ZDC (Zero Degree Calorimeter) – калориметр частиц, вылетающих направлениях предельно близких к направлению пучка

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем отчёте представлены выполненные в 2017 г. работы, результаты которых являются очередным этапом долгосрочной программы экспериментальных исследований в рамках мегапроекта АЛИСА на пучках БАК. Рамки участия российских институтов в реализации научной программы Большого адронного коллайдера установлены «Протоколом об участии в реализации программы проведения экспериментов на большом адронном коллайдере (БАК)» (Распоряжение Правительства РФ от 18 декабря 2003 г. № 1871-р) к «Соглашению между Правительством Российской Федерации и Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН) о дальнейшем развитии научно-технического сотрудничества в области физики высоких энергий» от 30 октября 1993 г. (Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 1993 г. № 1040).

В настоящем отчёте представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований протон-протонных и ядро-ядерных столкновений на пучках БАК, полученные в мегаэксперименте АЛИСА при непосредственном активном участии российских институтов. Также представлены выполненные российскими институтами в 2017 г. работы по детекторным системам Т0 и ФИТ, которые относятся к зоне ответственности российских институтов ИЯИ, МИФИ, КИ. Выполнение этих работ является необходимым условием полноправного участия российских учёных в физической программе эксперимента АЛИСА и возможности участвовать в модернизации детекторных систем супердетектора АЛИСЕ 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, позволяя проводить диагностику пучка БАК и формирует триггерные сигналы LM уровня (нулевого уровня минус 1).

В 2017 году был проведен короткий пробный сеанс ускорения ядер ^{129}Xe на БАК, была обеспечена стабильная работа коллайдера при энергии столкновений $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.44$ ТэВ. Использование разработанной в ИЯИ РАН модели RELDIS позволило вычислить сечения электромагнитной диссоциации ядер ^{129}Xe для определения светимости в этом сеансе путем регистрации в ZDC нейтронов от электромагнитной диссоциации.

В течение сеанса 2017 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 системы детекторов ADA и ADC, созданных при участии сотрудников ИЯИ РАН, но и данных центральных детекторов ITS (вершинный детектор), TOF – T0 (время пролетная система), TPC (время проекционная камера) и др.

Показано, что эксперименты с фиксированной мишенью на пучках БАК имеют определённые преимущества по сравнению с экспериментами на коллайдере. При использовании протонного и ионного пучков БАК может быть исследована область энергии между максимальной энергией SPS ($\sqrt{s} \sim 29$ ГэВ) и стандартной энергией RHIC ($\sqrt{s} = 200$ ГэВ) в p-A и A-A столкновениях. Для протонного пучка с энергией 7 ТэВ энергия в нуклон-нуклонном центре масс составит $\sqrt{s_{NN}} = 114.6$ ГэВ, и для пучка свинца с энергией 2.75 ТэВ - $\sqrt{s_{NN}} = 71.8$ ГэВ. Уменьшая энергию налетающих частиц можно получать данные в диапазоне энергий 30-115 ГэВ. Основной целью энергетического скана является определение критической точки фазового перехода в кварк-глюонную плазму. Высокая светимость значительно увеличит статистическую точность экспериментальных данных, а также обеспечит лучший контроль над эффективностью и аксептансом. Эксперимент на фиксированной мишени расширит интервал кинематических параметров реакций. Появится возможность исследовать процессы в области больших значений Фейнмановской переменной x . Могут использоваться мишени из различных материалов и пучки разных налетающих частиц. В рамках проекта планируется исследование столкновений тяжелых ионов при больших быстротах, детальное изучение процессов Дрелл-Яна и рождения D-мезонов, рождения кваркониумов и подавление их рождения в зависимости от состояния материи. Эксперимент AFTER позволит также исследовать нуклонные и ядерные функции распределения партонов, извлекаемые из адронных процессов. Планируется изучение спиновых процессов, в том числе спиновой асимметрии.

Задача «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA61)».

Актуальность, цели и программа исследований рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте NA61/SHINE на ускорителе SPS в ЦЕРН.

Программа научно-исследовательских работ эксперимента NA61/SHINE [1, 2] включает несколько направлений:

- поиск критической точки фазового перехода в сильно взаимодействующей ядерной материи, которая образуется в релятивистских ядро-ядерных столкновениях и детальное исследование начала деконфайнмента, т.е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи;

- измерения сечений образования и выходов заряженных адронов, необходимых для экспериментов в области нейтринной физики;
- измерения сечений образования пионов и каонов в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей.

Поиск критической точки фазового перехода в сильновзаимодействующей материи в эксперименте NA61/SHINE ведется посредством сканирования фазовой диаграммы, что достигается проведением измерений выходов заряженных частиц в диапазоне энергий 13 – 150 АГэВ для разных размеров сталкивающихся систем. Программа экспериментов NA61/SHINE включает проведение измерений выходов заряженных частиц в $p+p$, $p+Pb$ и в центральных столкновениях ядер ${}^7\text{Be}+{}^9\text{Be}$, $\text{Ar}+\text{Sc}$, $\text{Xe}+\text{La}$ и $\text{Pb}+\text{Pb}$ при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150/158 ГэВ/с. В 2017 году получены новые экспериментальные данные по измерению выходов заряженных частиц в реакции $\text{Xe}+\text{La}$ при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150 ГэВ/с. Тем самым, завершена программа измерений по сканированию фазовой диаграммы.

В NA61/SHINE помимо исследований обычных распределений по множественности и поперечным импульсам вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, исследуются также пособытийные флуктуации так называемых сильно интенсивных величин. Последние представляют собой комбинации первых и вторых моментов распределений таких физических величин, как множественность, поперечные импульсы вторичных частиц и энергии не взаимодействовавших нуклонов-спектаторов. Особенностью сильно интенсивных величин является то, что они не зависят ни от объема, ни от флуктуации объема взаимодействующих ядер. Таким образом, резкое изменение величины таких флуктуаций может являться отличительной чертой новых физических явлений, ожидаемых вблизи критических областей. Предварительный анализ распределений по флуктуациям сильно интенсивных величин в реакциях $p+p$, $\text{Be}+\text{Be}$ и $\text{Ar}+\text{Sc}$ показал отсутствие указаний на существование каких-либо особенностей в этих распределениях, которые могли бы свидетельствовать об обнаружении критической точки фазового перехода. Анализ полученных новых экспериментальных данных для реакции $\text{Xe}+\text{La}$, а также данные, полученные в 2016г/ для реакции $\text{Pb}+\text{Pb}$ при импульсах ядер свинца 30, 40 и 150 ГэВ/с, позволят значительно расширить область поиска критической точки на фазовой диаграмме.

По предложению ИЯИ и НИЯУ МИФИ, научная программа исследований NA61/SHINE была расширена – теперь она включает еще и исследование коллективных потоков в ядро-ядерных столкновениях в том же диапазоне энергий. Анизотропные потоки, проявляющие себя в анизотропии испускания частиц в плоскости поперечной направлению пучка, являются одними из важных наблюдаемых, чувствительных к уравнению состояния

образованной материи. В 2017г. выполнен предварительный анализ экспериментальных данных, полученных в 2016 г., по исследованию прямых потоков пионов в столкновениях ядер свинца в зависимости от центральности столкновений при импульсе налетающих ядер свинца 30А ГэВ/с. Для оценки плоскости события и центральности взаимодействия использовался передний адронный калориметр. Показано, что с использованием новых данных NA61/SHINE по столкновениям Pb+Pb, полученным в ноябре 2016 и планируемыми в 2018 году открывается возможность расширить измерения прямых и эллиптических потоков как функцию центральности в диапазоне энергий пучка 13 – 158 ГэВ на нуклон в гораздо больших передних быстротах по сравнению с результатами RHIC, что позволит впервые детально изучить зависимость потоков протонов и пионов от центральности столкновений и от налетающей энергии ядер свинца.

Экспериментальное наблюдение эффектов, связанных с фазовым переходом первого рода между адронной и партонной или кварковой материей заканчивающимся критической точкой было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи в экстремальном состоянии. Актуальность данных фундаментальных исследований эксперимента NA61/SHINE подтверждается результатами работы февральского совещания NuPECC (the Nuclear Physics European Collaboration Committee), представленными в итоговых материалах долгосрочного плана (Long Range Plan 2017) [3].

В 2017г. коллаборацией начата разработка программы экспериментов на установке NA61/ на период до 2024г. Новая программа нацелена на исследование выходов частиц с открытым очарованием (open charm), D-мезонов. Последние могут рождаться только на самых начальных стадиях ядро-ядерных столкновений и их регистрация дает тем самым уникальную возможность исследовать впервые при данных энергиях, вблизи порога рождения, процессы их взаимодействия с кварк-глюонной плазмой, которая может образовываться на более поздней стадии. Также при совместном исследовании выходов D-мезонов и скрытого очарования (выход J/ψ мезонов) возможна проверка эффектов экранирования цвета (скрининга) при связывании очарованных кварков в нейтральных по цвету нейтральных J/ψ [19, 20, 21], поэтому данные исследования чрезвычайно интересны и актуальны. Особенно интересны такие исследования вблизи порога рождения D0-мезонов при энергиях SPS. Для этих экспериментов интенсивность пучков ядер свинца и скорость набора данных планируется поднять более чем на порядок, ао сравнению с интенсивностью пучка действующего эксперимента. Для этого потребуются модернизация практически всех детекторов установки. Группой ИЯИ РАН в 2017г. был разработан и подготовлен проект

модернизации переднего адронного калориметра для новых экспериментов NA61/SHINE после 2020г. Планируется, что все работы по модернизации адронного калориметра установки NA61, включая их монтаж, установку фотодетекторов, аналоговой и цифровой электроники будут проведены в течение 2018-2019гг силами ИЯИ РАН в ЦЕРН.

Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармштадт, Германия)».

Актуальность и цели исследований свойств ядерной материи в эксперименте CBM. Основные направления участия группы ИЯИ РАН в эксперименте CBM в 2017 г.

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи в области высокой барионной плотности [1]. На рис. 46 показаны возможные фазы ядерной материи и их границы в зависимости температуры от барионного химического потенциала.

Ядра в нормальном состоянии представляют собой холодную ядерную материю с чистой барионной плотностью, равной единице и состоят из протонов и нейтронов (т. е. нуклонов). При умеренных температурах и плотностях нуклоны возбуждаются в короткоживущие состояния (барионные резонансы), которые распадаются с испусканием мезонов. При более высоких температурах, также образуются пары барион-антибарион. Эту смесь барионов, антибарионов и мезонов, все сильно взаимодействующие частицы, обычно называют адронной материей или барионной материей, если преобладают барионы. При очень высоких температурах или плотностях адроны плавятся, а их составляющие, кварки и глюоны, образуют новую фазу – кварк-глюонную плазму. При очень низких чистых барионных плотностях, где число частиц и античастиц приблизительно одинаково, квантовая хромодинамика (КХД) на решетке предсказывает, что адроны диссоциируют в кварки и глюоны при температуре выше примерно 160 МэВ [2, 3]. Обратный процесс происходил во Вселенной в течение первых нескольких микросекунд после Большого Взрыва. В этой области фазовой диаграммы ожидается плавный переход, кроссовер, от партонной к адронной материи [4]. Расчеты показывают наличие критической точки при относительно больших значениях барионного химического потенциала [5]. Помимо этой критической конечной точки, для больших значений чистых барионных плотностей (и для более низких температур) можно ожидать фазовый переход от адронного к партонному состоянию ядерной материи с областью смешанной фазы сосуществования между ними. Было предложено существование новой фазы так называемой кварковой материи quarkyonic matter, расположенной за границей фазы

первого порядка в области больших барионных химических потенциалов и при умеренных температурах [6]. Предполагается, что холодная ядерная материя с большой чистой барионной плотностью, но низкой температурой, существует в центре нейтронных звезд, а при очень высоких плотностях коррелированные пары кварк-кварков образуют цветной сверхпроводник.

Таким образом, фазовая диаграмма КХД демонстрирует богатую структуру при конечных значениях барионных химических потенциалов, таких как критическая точка, предсказанный фазовый переход первого порядка между адронной и партонной или, кваркониевой материей, киральный фазовый переход. Экспериментальное открытие этих особенностей фазовой диаграммы КХД было бы большим прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи. В равной степени важной является количественная экспериментальная информация о свойствах адронов в плотной ядерной материи, которая могут пролить свет на восстановление киральной симметрии и происхождение масс адронов.

В лаборатории горячая и плотная ядерная материя образуется в широком диапазоне температур и плотности при столкновении атомных ядер при высоких энергиях. Цель экспериментов в RHIC и LHC - исследовать свойства ядерной материи при очень высоких температурах и почти нулевых чистых барионных плотностях. Несколько экспериментальных программ посвящены исследованию фазовой диаграммы КХД при высоких чистых барионных плотностях. STAR коллаборация в RHIC сканирует энергией пучка для поиска критической конечной точки фазового перехода [7]. Для той же цели измерения проводятся на CERN-SPS с усовершенствованным детектором NA49 (NA61) и с использованием ионных пучков легких и средних размеров [8]. В Объединенном институте ядерных Исследования (ОИЯИ) в Дубне создается коллайдер NICA, на котором планируются эксперименты с целью поиска и исследования смешанной фазы сосуществования ядерной материи [9].

Однако, из-за небольшой светимости или детекторных ограничениях, эти эксперименты ограничены исследованием частиц, которые рождаются с большим выходом. Напротив, эксперимент CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в Дармштадте, предназначен для точного измерения многомерных наблюдаемых, включая частицы с очень низким сечением образования с использованием высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов, обеспечиваемых ускорителями ФАИР. В различных модельных расчетах показано, что уже при энергиях пучка порядка 10 AGeV достигаются семикратное увеличение чистой барионной плотности для центральных Au + Au столкновений.

Диагностические пробы для исследования плотной фазы, такие как барионы с большой странностью, дилептонные пары и очарованные частицы будут впервые измерены CBM

эксперименте в диапазоне энергий пучка до 11 АГэВ. Поэтому эксперимент CBM имеет уникальный потенциал для открытий на SIS100. Для получения высокостатистических данных даже для частиц с наименьшими сечениями образования, эксперимент CBM предназначен для работы со скоростью реакции от 100 кГц до 1 МГц. Для измерений чармония - где может генерироваться триггер на лептонных парах высоких энергий - предусмотрены скорости реакции до 10 МГц. Это превышает возможности других существующих и запланированные экспериментов с тяжелыми ионами на порядок, как показано на правой панели рис.47.

С учетом уникальных возможностей измерений при очень высоких интенсивностях пучков тяжелых ионов и высоких скоростях набора данных физическая, программа измерений на установке CBM будет направлена на исследование уравнения состояния барионного вещества при плотностях сравнимых с плотностью нейтронных звезд, исследование свойств адронов в среде с целью поиска явлений, связанных с частичным восстановлением киральной симметрии, исследование фазовых переходов от адронной материи к кваркониевой или партонной материи при высоких чистых барионных плотностях. Планируются также эксперименты по поиску и исследованию гиперядер, странных дибарионов и массивных странных объектов, исследовании механизмов рождения чармированных частиц и свойств очарованных частиц в плотной ядерной материи [13-15].

Практически весь набор наблюдаемых величин, включая пособытийные флуктуации, и выход даже таких редких частиц как J/Ψ , предполагается изучать в зависимости от центральности столкновений, которая характеризует плотность энергии, достигаемой в этих реакциях. Для определения этих глобальных характеристик событий – центральности, а также угла плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях на установке CBM будет использоваться передний адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectile Spectator Detector.

Задача «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)». Актуальность и цели исследований свойств ядерной материи в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте ХАДЕС.

Физическая программа работ на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. При нулевой температуре и барионном химическом потенциале физический КХД-вакуум обладает двумя основными характеристиками: конфайнментом и спонтанно нарушенной киральной симметрией. Нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. В столкновениях тяжелых ионов при

высоких энергиях устанавливаются экстремальные температуры и плотности, при которых ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Однако, уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке ХАДЕС.

Исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер, также является одним из важных направлений на ХАДЕСе. 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 также единственным экспериментом в ГСИ, который будет набирать экспериментальные данные на модернизированном ускорителе SIS18 в рамках объявленной программы ФАИР-фаза-0. В 2017 году в ГСИ утверждена программа дальнейших экспериментов на ХАДЕСе [1] и выделено пучковое время на 2018 г. (88 смен) для эксперимента Ag+Ag на ускорителе SIS18 при энергии налетающих ядер серебра 1.65 АГэВ и 87 смен выделено для проведения измерений на пучке пионов в 2019 г. Одобрена программа экспериментов на ХАДЕСе по исследованию протон-протонных столкновений и протон-ядерных столкновений после 2020 г. 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.

Задача «Физика атомного ядра, динамика ядерных и фотоядерных реакций, физика радионуклидов и тяжёлых ионов».

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.

Задача «Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики».

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 ($\chi^2/N \sim 1$) [1–2].

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 $n + d \rightarrow n + n + p$ в кинематике нейтрон-нейтронного квазисвободного рассеяния (КСР). Оказалось, что экспериментальные сечения этой реакции [3, 4] превышают теоретические оценки на $\sim 18\%$. При этом теория хорошо описывает сечения np -рассеяния, измеренные в той же реакции и в той же кинематике КСР [4]. Данную кризисную ситуацию можно также проиллюстрировать сравнением экспериментальных и теоретических данных для трехнуклонного развала в системах $n + d \rightarrow n + n + p$ и $p + d \rightarrow p + p + n$ в так называемой «Space Star» кинематике [5]. 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 [6]. 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 $A_n(\Theta_n) \neq A_p(\Theta_p)$ в реакции $np \rightarrow np$; 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 [7] назвали нуклон-нуклонную длину рассеяния «мощным увеличительным стеклом для изучения NN взаимодействия».

Протон-протонная длина рассеяния находится из экспериментов по свободному pp -рассеянию ($a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ Фм); ее погрешность связана главным образом с модельно-зависимой процедурой исключения электромагнитной компоненты pp -взаимодействия. Нейтрон-нейтронная длина рассеяния определяется в основном в реакциях $n + d \rightarrow p + n + n$ и $\pi^- + d \rightarrow \gamma + n + n$ при исследовании взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) двух нейтронов, имеющих очень малую относительную энергию [8–11]. 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 [12] 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 трёхчастичных сил.

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 ${}^6\text{He}$, 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 ${}^{11}\text{Li}$ было впервые обнаружено в [6], однако детали ядерной структуры и взаимодействия кор-гало до сих пор полностью не выяснены. Кроме упомянутых ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$ интерес может представлять и исследование других гало-ядер, например, ${}^8\text{He}$, в котором система кор-гало может существовать как ${}^6\text{He} + 2n$, ${}^4\text{He} + 2n + 2n$ или даже ${}^4\text{He} + 4n$.

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 ${}^6\text{He}$ или ${}^{11}\text{Li}$ быстро удалить кор, то наблюдаемый характер импульсного распределения «оставшейся» nn -пары не должен измениться, т.к. эта пара является в таком эксперименте «спектатором», который в адиабатическом приближении вылетает из зоны реакции без существенных искажений того состояния, который имел первоначально. Можно ожидать, что измеренные nn -корреляции, в частности энергии nn -квазисвязанного состояния, окажутся совсем не те, которые присущи свободной nn -системе.

Предложено исследование nn -корреляций в реакциях подхвата кора из ядер ${}^6\text{He}$ или ${}^{11}\text{Li}$:





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

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

Задача «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений 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.

Задача «Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8».

Сокращение парка больших и дорогостоящих ядерно-физических установок, таких как ядерные реакторы и нейтронные генераторы, диктует необходимость создания новых, современных, универсальных, компактных, мобильных и, в то же время, достаточно экономичных ядерно-физических установок для широкого круга современных задач. В связи с этим в качестве более экономичной замены, представляет интерес создание фотонейтронных источников на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 – 10 МэВ.

В ИЯИ РАН создан W-Be-фотонейтронный источник нейтронов ИН-ЛУЭ на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5. Источник обеспечивает поток тепловых нейтронов порядка $10^8 - 10^9$ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения.

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

В последнее десятилетие интерес к получению нейтронных данных значительно вырос. Это связано, в основном, с потребностью данных при разработке ядерных реакторов нового поколения. В связи со значительным сокращением количества установок во всех странах, занимающихся получением нейтронных экспериментальных данных в диапазоне энергий до 3 МэВ, база данных для анализа, проводимого авторами, практически не увеличилась за последние десятилетия. Однако существующие ускорители в университетах США, Японии, Кореи, Китая имеют большие программы по этой теме на годы вперед. Значительно обновился список (и возможности) детекторов, используемых в нейтронных измерениях.

Поэтому как получение нейтронных данных, так и их анализ и систематизация остаются актуальными. Авторами были сделаны оценки и предварительные измерения для решения вопроса о возможности получения необходимых нейтронных данных на фотонейтронном источнике ускорителя ЛУЭ-8. Также авторами были продолжены работы по описанию в едином подходе существующих нейтронных данных и поиску проявления магических и околomagических чисел в нейтронных сечениях.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. ЭКСПЕРИМЕНТ ALICE.

Научный руководитель к.ф.-м.н. Каравичева Т.Л.

1.1 ДЕТЕКТОР T0 И ДЕТЕКТОР ФИТ

Проведение экспериментальных исследований столкновений ядер сверхвысоких энергий в эксперименте АЛИСА (ЦЕРН) с участием триггерного и стартов.

Важную роль в триггерной системе установки АЛИСА играет детектор T0, предназначенный для формирования триггерных сигналов нулевого уровня (LM), которые используются для мониторингирования и определения светимости, диагностики пучка. Детектор T0 обеспечивает приход триггерных сигналов в центральный триггерный процессор (СТР) не позднее 450 нс после столкновения. Столь короткое время прихода триггерных сигналов с детектора T0 позволяет использовать триггерные решения СТР в качестве пре-триггера для детектора переходного излучения (TRD). Важную роль в идентификации заряженных частиц, являющейся одним из ключевых преимуществ эксперимента ALICE, играют детекторы TOF и T0, предназначенные для идентификации пионов, каонов и протонов в промежуточном интервале поперечного импульса (от 0.5 до 3-4 GeV/c). Время старта (момент столкновения пучков) для измерений по время-пролетному методу для детектора TOF дает детектор T0, состоящий из набора черенковских счётчиков T0C и T0A, расположенных по обе стороны от точки взаимодействия в областях $-3.28 < \eta < -2.97$ и $4.61 < \eta < 4.92$, соответственно.

Высокая надежность, стабильность и отсутствие чувствительности к фоновым событиям (взаимодействию пучка с остаточным газом внутри ионопровода, гало пучка) сделали детектор T0 опорным детектором для настройки триггерных сигналов для всех триггерных детекторов и позволила изучать корреляции триггерных сигналов с детектором T0. Для каждого набора событий эти данные публикуются в электронном журнале АЛИСА (Logbook)

Анализ работы детектора T0 в 2017 году показал, что основные его параметры, необходимые для выполнения его основных функций, продолжают соответствовать техническим требованиям эксперимента ALICE. Вместе с тем для обеспечения стабильной работы детектора T0 требуется регулярное техническое обслуживание, проведение ежегодных пусконаладочных работ и непрерывный мониторинг параметров детектора T0 в режиме «on-line» с соответствующим контролем после реконструкции событий.

Работы по техническому обслуживанию и экспертному сопровождению детектора T0.

Во время зимней 2016-2017 гг. технической остановки БАК (EYETS-2017) была

проведена модернизация системы считывания и управления детектором, которая позволила автоматически определять задержки для распределения синхросигналов BC (Bunch Crossing) в триггерную электронику. Это позволило сократить время настройки детектора при сезонных изменениях в задержках прихода синхросигнала.

В августе 2017 года были выполнены работы по замене следующих блоков:

- источника питания CAEN 3 В для VME крейта
- источника питания CAEN 5 В для VME крейта
- CPDM (Clock and Pulse Distribution module)
- DRM (Data Readout Module)

Проведен ремонт запуска лазерной системы калибровки и системы амплитудных измерений. По результатам этих работ удалось полностью восстановить проектные параметры детектора T0.

Анализ реконструированных данных 2016 года показал необходимость ввести дополнительные гистограммы, позволяющие контролировать вклад каждого модуля детектора T0 в формирование триггерных сигналов.

Каждый модуль детектора имеет управляемую задержку, которая позволяет во время настройки детектора установить сигнал с каждого модуля в середину временного триггерного окна (рис.1).

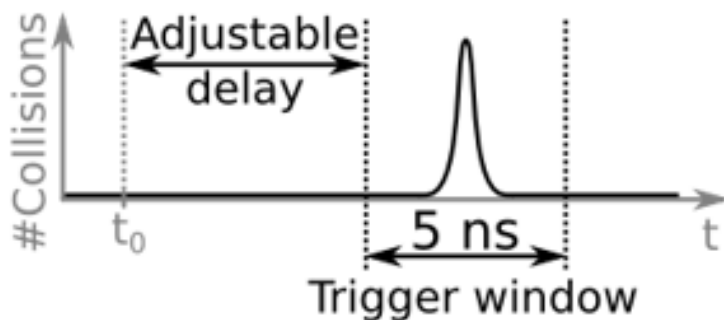


Рисунок 1. Диаграмма правильного расположения сигнала с модуля детектора T0 внутри временного триггерного окна (строба).

Данные 2016 года показали, что эффективность триггера уменьшается на ~2.2 %, если один из модулей детектора T0 не участвует в формировании триггера. В 2017 году дополнительные гистограммы были внесены в DQM (Data Quality Monitoring) для контроля временных сигналов, участвующих в формировании триггерных сигналов.

На рисунке 2 показан пример распределения временных сигналов для 24 модулей детектора T0 относительно среднего времени регистрации сигнала. Среднее время

регистрации сигнала для каждого модуля соответствует попаданию этого сигнала в середину временного триггерного stroba.

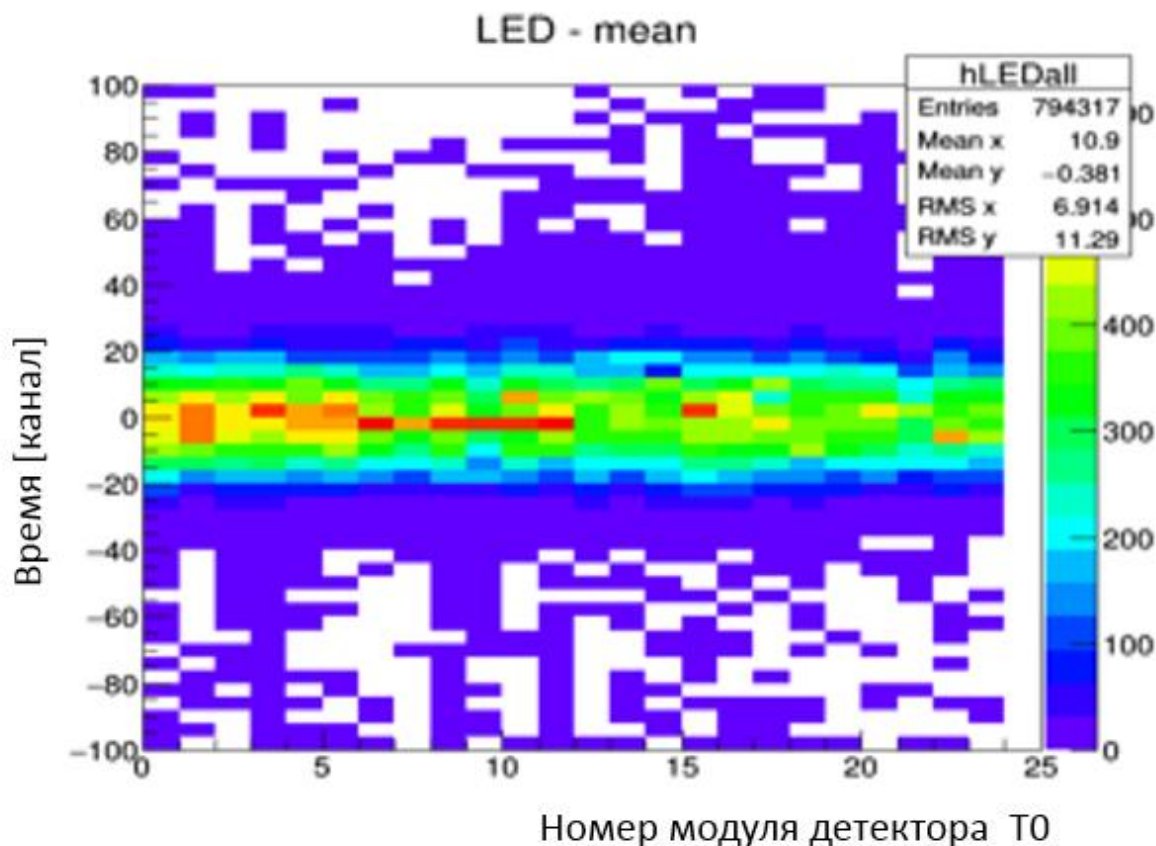


Рисунок 2. Пример распределения временных сигналов с каждого из 24 модулей детектора T0 относительно среднего положения временного сигнала.

Модернизация, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора T0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ, МИФИ.

Участие детектора T0 в физических измерениях.

В 2017 году проводились сеансы физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и ядер ксенона. T0 детектор принимал участие во всех измерительных сеансах, проводимых экспериментом ALICE. Эффективность участия детектора T0 в этом наборе физических данных составила 98% по времени набора данных и 95 % по участию детектора в ранах. Распределение времени набора физических данных по различным детекторам в pp-столкновениях при энергии 13 ТэВ показано на рисунке 3. Количество ранов, в которых принимали участие различные детекторы, показано на рисунке 2.

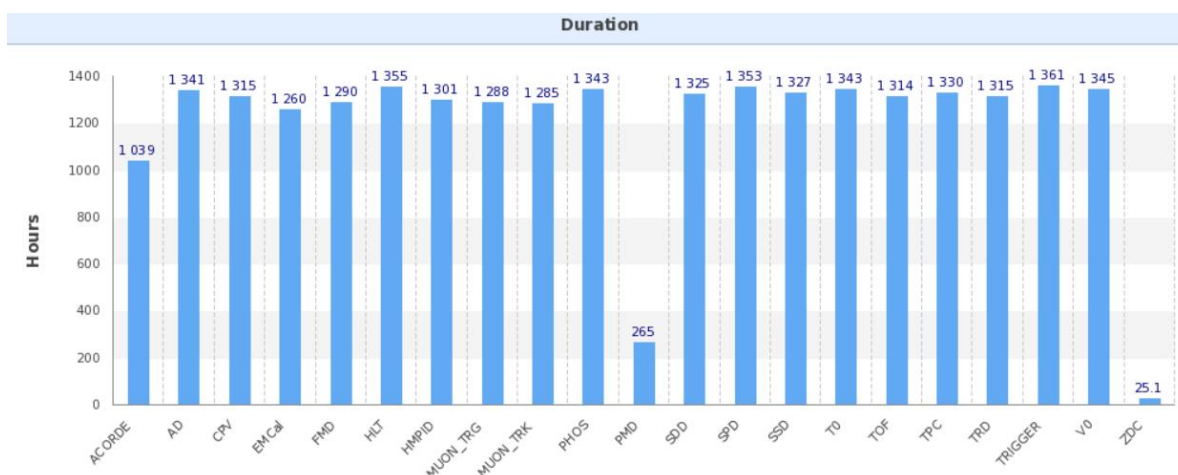


Рисунок 3. Время набора физических данных для pp столкновений при энергии 13 ТэВ по детекторам



Рисунок 4. Количество ранов в 2017 году, в которых принимали участие определённые детекторные устройства супердетектора АЛИСА. 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 совместно с University of Jyvaskyla (Финляндия) в рамках коллаборации ALICE-T0 приняли участие в круглосуточных дежурствах в сменах и обеспечивали непрерывное, круглосуточное экспертное сопровождение детектора T0 и прототипа детектора ФИТ, установленного в шахте АЛИСА, в ходе сеансов по набору физических данных. В таблице 1.3.1 приведено распределение количества дежурств, выполненных сотрудниками коллаборации ALICE-T0 в 2017 году с указанием количества смен. 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).

Таблица 1. Распределение по институтам количества дежурств (on-call) по детектору T0 в 2017 году.

System: T0
Type: Oncall

Due: 127
Credits booked: 126.5
Credits concluded: 102.5

Institutions

Institution	Done ▾	Booked	Progress Bar
RU - Moscow INR	68.5	71.5	
RU - Moscow MEPHI	20.5	34	
FI - Helsinki - Jyvaskyla Cluster	13.5	21	

В 2017 г. сотрудниками ИЯИ РАН и МИФИ была обеспечена стабильная работа детектора T0.

Определение момента столкновения пучков для время-пролетной системы с использованием детектора T0. На установке АЛИСА идентификация частиц в промежуточном интервале поперечного импульса (от 0.5 GeV/c до 3-4 GeV/c) выполняется с использованием времяпролетной системы (T0F +T0). Времяпролетный детектор (TOF), который состоит из сборки многозачеренковских резистивных плоско-параллельных камер (MRPC), занимающая большую площадь (150 м²) и перекрывает все азимутальные углы и область псевдобыстрот $|\eta| < 0,9$. Детектор T0 состоит из набора черенковских счётчиков T0C и T0A, расположенных по обе стороны от точки взаимодействия в областях $-3,28 < \eta < -2,97$ и $4,61 < \eta < 4,92$ соответственно. Важной компонентой идентификации частиц является точное определение момента столкновения пучков, которое может определяться детектором T0 (t_{T0ev}), самим детектором TOF(t_{T0Fev}), или считаться равным нулю(t_{fillv}) если в событии отсутствуют данные с обоих детекторов. В 2016-2017 годах проведен анализ методов определения момента столкновения пучков с использованием детекторов T0 и TOF Результаты опубликованы в статье «Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC» в журнале Eur. Phys. J. Plus 132 (2017) 99. Эффективность определения момента столкновения пучков детекторами T0, TOF и комбинированным методом для протон-протонных взаимодействий с энергией в центре масс 7 ТэВ как функция множественности события представлена на рис. 5.

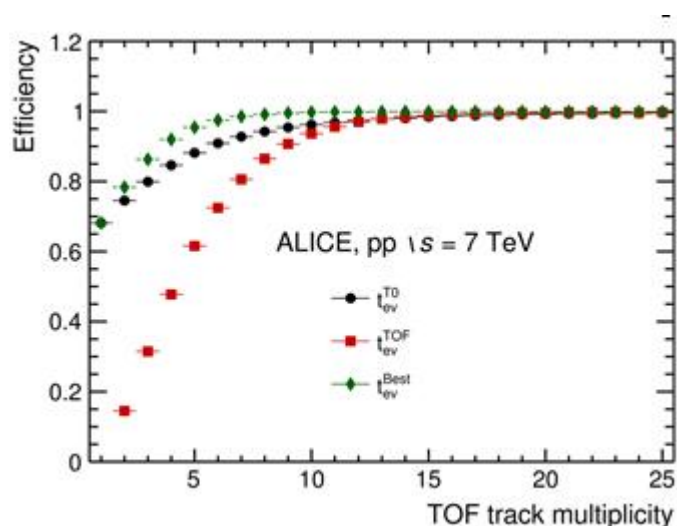


Рисунок 5. Эффективность определения момента столкновения пучков детектором T_0 (черные точки), детектором TOF (красные квадраты) и комбинированным методом (зеленые ромбики) для p-p взаимодействий с энергией в центре масс 7 ТэВ в зависимости от количества треков детектора TOF.

Проведенные исследования показали максимальную эффективность использования детектора T_0 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.

Важным 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. Была разработана и включена в систему автоматической калибровки супердетектора АЛИСЕ программа, учитывающая зависимость временных сигналов детектора T_0 от смещения синхронизирующего временного сигнала ускорителя.

В настоящий момент разрешение определения момента столкновений пучков не превышает 47 пс для протонных столкновений и не зависит от значения магнитного поля и частоты взаимодействий.

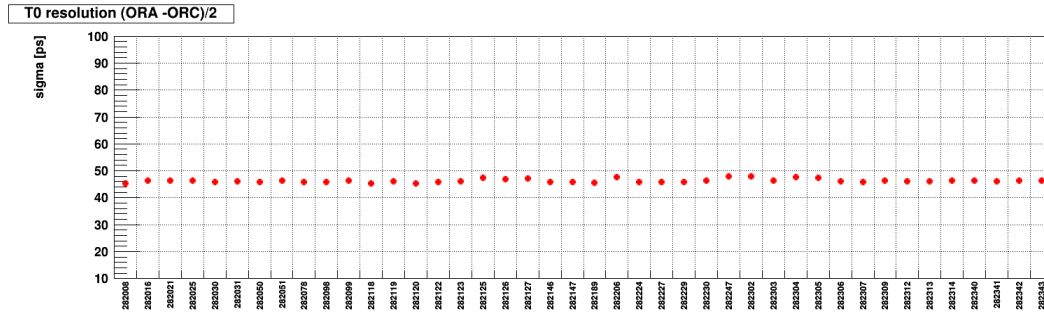


Рисунок 6. Тренд разрешения определения момента столкновения пучков протонов с энергией 5.02 ТэВ для периода с магнитным полем 0.5 Т.

На рис.6 показан тренд разрешения определения момента столкновения пучков протонов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}=5.02$. Эти тренды публикуются на странице контроля качества данных в конце каждого цикла реконструкции.

Важным условием анализа является сравнение результатов моделирования по методу Монте-Карло с экспериментальными данными при использовании различных генераторов событий. Была проведена работа по настройке параметров моделирования детектора T0 для генераторов событий DPMJET и EPOS_LHC. На рис. 7 показана эффективность триггера OTVX как функции множественности события (слева) и Z координаты точки взаимодействия (справа) для p-Pb столкновений при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 8.02$ TeV. Видно, что данные от генератора событий EPOS_LHC прекрасно совпадают с экспериментальными для взаимодействий любой центральности с вершиной в интервале ± 10 см.

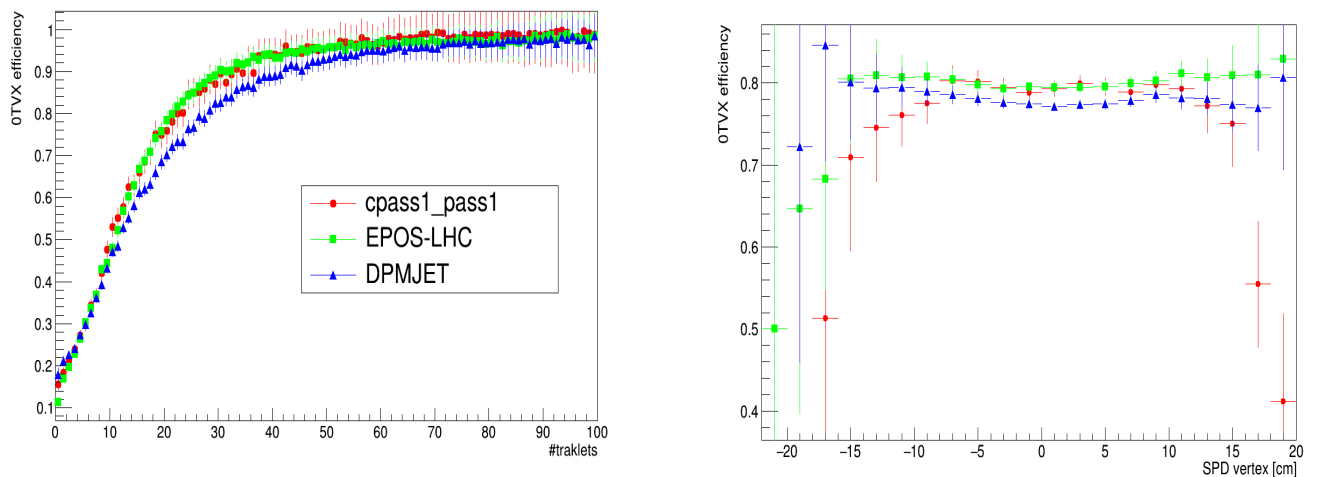


Рисунок 7. Эффективность триггера OTVX в зависимости от множественности события (слева) и Z координаты точки взаимодействия (справа) для p-Pb столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 8.02$ TeV. Красные точки соответствуют экспериментальным данным, зеленые квадраты и

синие треугольники — данным, полученным с помощью генераторов EPOS_LHC (зеленые квадраты) и DPMJET (синие треугольники).

Уменьшение амплитуды сигналов с модулей детектора T0 также влияет на разрешение определения момента столкновений пучков.

Для контроля старения используемых фотоумножителей (ФЭУ) был проведен сравнительный анализ значений амплитуд модулей детектора в 2016 и 2017 годах. На рис.8 представлен график отношений амплитуд 24 каналов детектора T0 для данных текущего и прошлого года. На графике видно, что за год амплитуды ФЭУ не изменились. Это демонстрирует отсутствие видимого старения ФЭУ в ходе эксплуатации детектора.

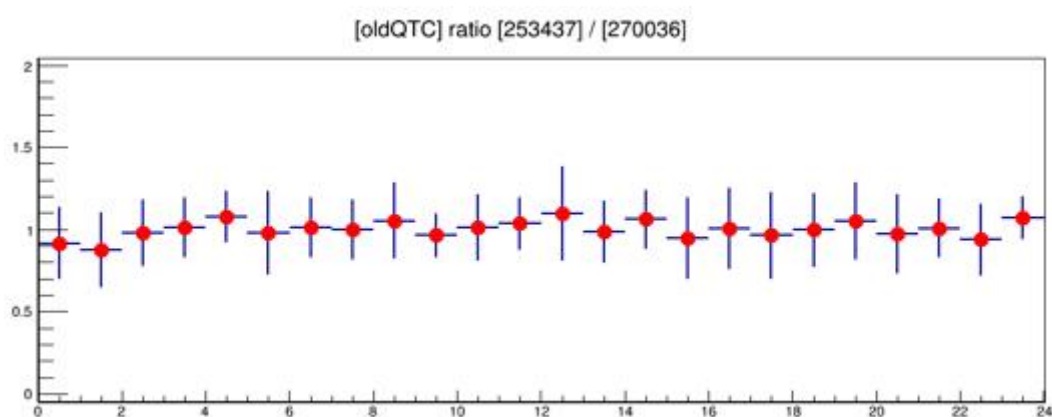


Рисунок 8. График отношения амплитуд ФЭУ для данных текущего 2017 и прошлого года.

Проводится непрерывное мониторингирование результатов реконструкции данных, проверка разрешения и центрирования вокруг нуля времени взаимодействия, эффективность OTVX триггера. Тренды для каждого цикла реконструкции публикуются на сайте контроля качества данных <http://aliquat0.web.cern.ch/aliquat0/> для всех экспериментальных данных и соответствующих Монте-Карло симуляций. Результаты докладываются каждую неделю на совещаниях рабочей группы. На рис 9 и 10 показаны тренды момента столкновения и его разрешения для протон-протонных взаимодействий с энергией 13 ТэВ для всех рангов LHC17g периода измерений. В течении всего 2017 года время момента столкновений было центрировано вокруг нуля в интервале 10 пс и разрешение не превышало 45 пс.

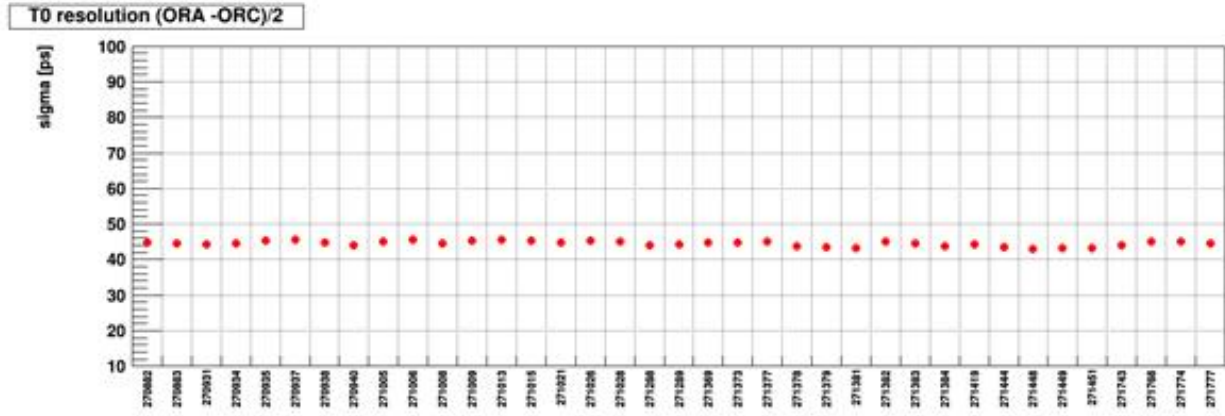


Рисунок 9. Тренд разрешения определения времени взаимодействия для периода LHC17g протон-протонных взаимодействий с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 13$ ТэВ

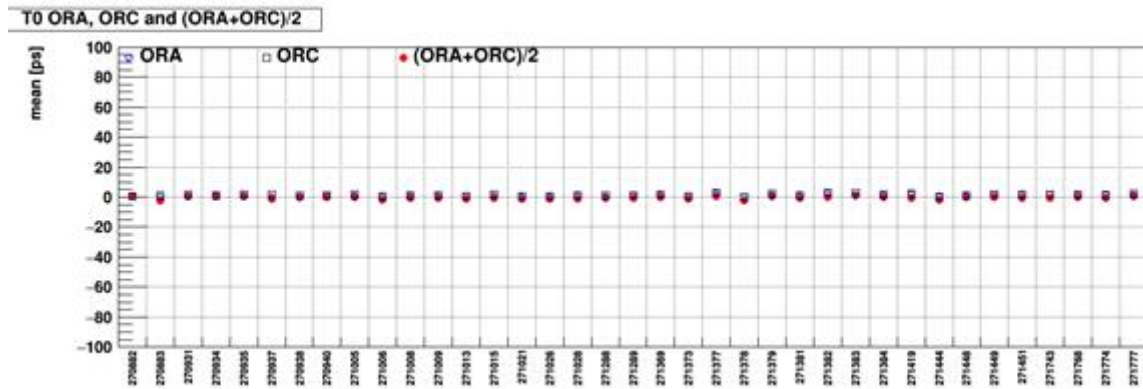


Рисунок 10. Тренд определения момента столкновения пучков для периода LHC17g протон-протонных взаимодействий с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 13$ ТэВ.

Была проведена настройка параметров калибровки и реконструкции данных детектора T0 для определения момента взаимодействия ядер ксенона. Разрешение составило 26 пс как показано на рис 11.

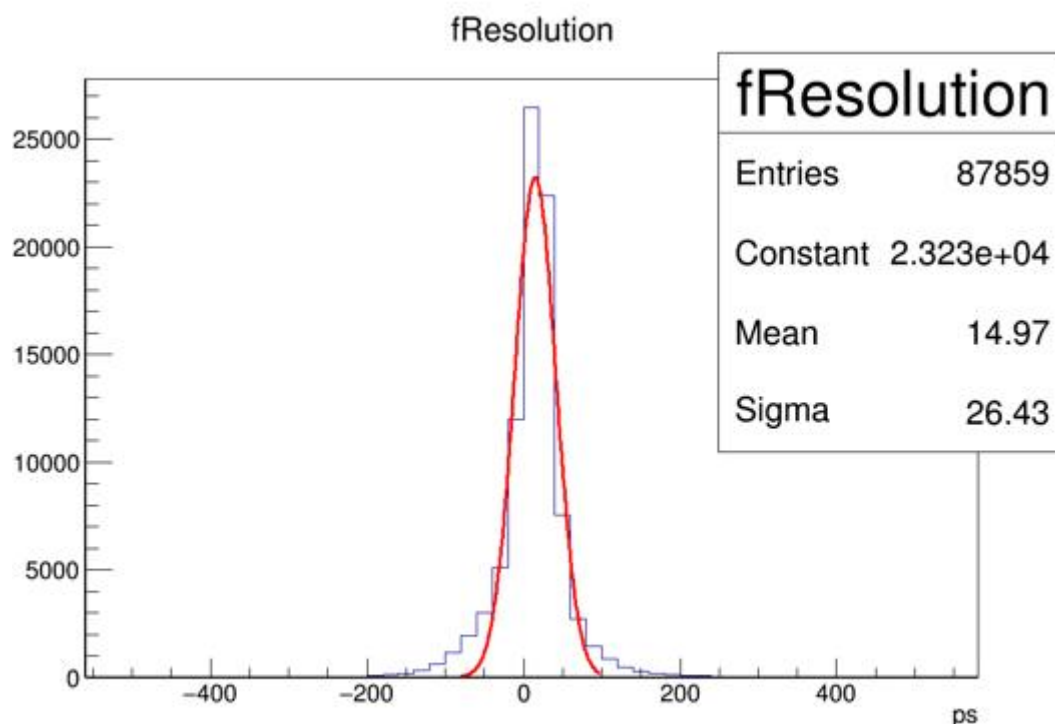


Рисунок 11. Разрешение определения времени момента столкновения ядер ксенона.

Измерение и мониторинг светимости с использованием детектора T0.

Для экспериментального определения светимости и вычислений абсолютных сечений физических процессов используют опорные сечения, измеренные ранее. Однако для энергий, при которых проводится эксперимент АЛИСА, измеренных сечений нет, поэтому возникает необходимость использования триггерных сечений. Триггерные сечения вычисляются при помощи метода Ван дер Меера, где интенсивность счета триггерных сигналов с различных детекторов измеряется как функция относительного смещения пучков друг относительно друга (рис.1.5.1). Светимость в эксперименте АЛИСА измеряется передними детекторами: V0, T0, AD и ZDC. Во время фазы запуска БАК, для того чтобы оценить качество пучка, V0 и T0 используются для оценки светимости и фоновых событий. Начиная с 2012 года основным люминометром эксперимента АЛИСА является детектор T0. В качестве основного сигнала для оценки светимости использовался триггерный сигнал 0TVX (сигнал генерируется, если вершина столкновения находится в пределах ± 20 см). Знание видимого (триггерного) сечения позволяет в режиме реального времени проводить мониторинг светимости.

В июле 2017 года, для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV, было проведено сканирование по методу Ван дер Меера. В настоящее время ведется обработка собранных данных, которая позволит произвести анализ и рассчитать видимые (триггерные) сечения для детектора T0.

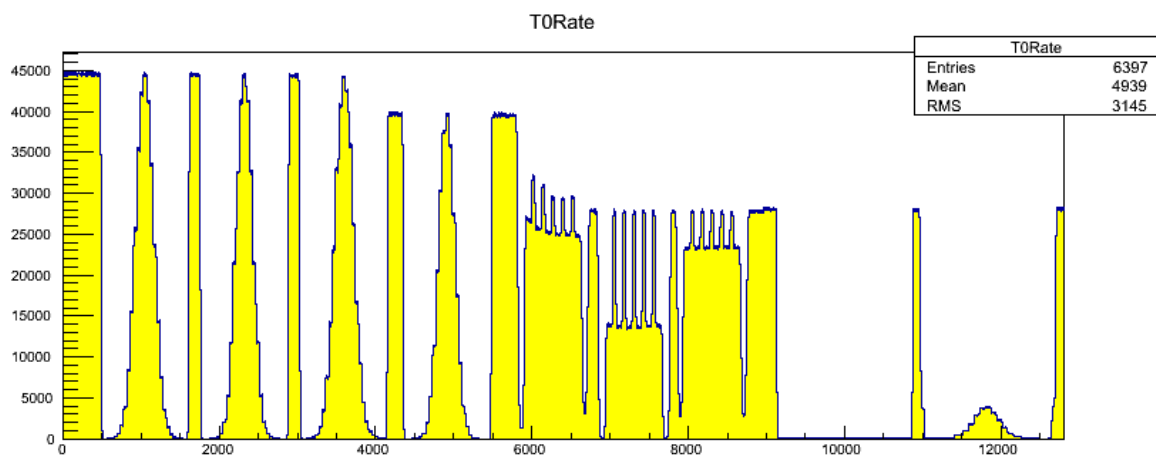


Рисунок.12. Интенсивность счета триггерного сигнала 0TVX как функция относительного смещения пучков друг относительно друга.

Во время сканирования методом Ван дер Мера проводятся две пары измерений, в каждой из которых один из пучков фиксируется, а другой смещается в одной из плоскостей (X или Y). Во время последнего скана наблюдалось резкое уменьшение интенсивности пучка в 8 из 20 банчей, что привело к снижению частоты счета триггера.

Постоянно ведутся измерения эффективности работы детектора T0 относительно детектора V0, см. рис. 13.

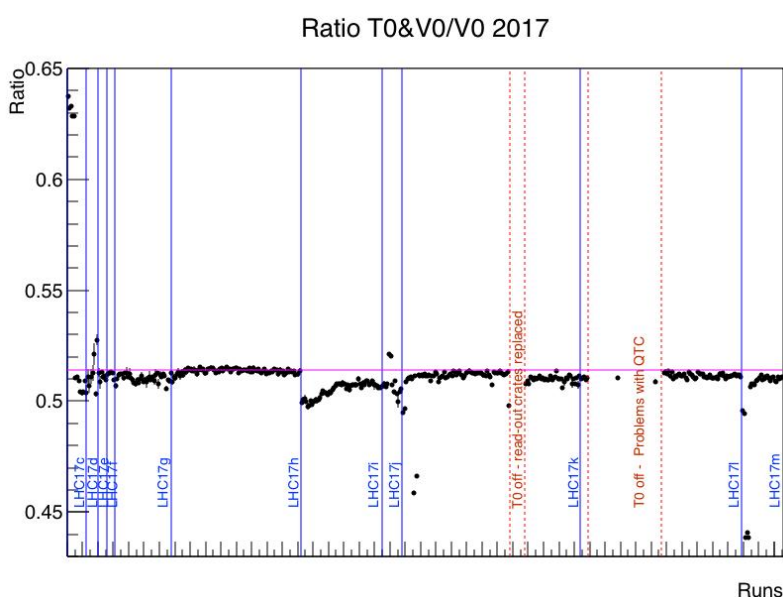


Рисунок 13. Эффективность работы переднего детектора T0 относительно детектора V0 в 2017 году.

Детектор T0 стабильно работал на протяжении всего 2017 года, на протяжении которого велись сеансы с p-p столкновениями при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV. В периоды LHC17c, LHC17e, LHC17h, LHC17i, LHC17k, LHC17l, LHC17m столкновения проводились при отрицательном, а LHC17f и LHC17j при положительном, магнитном поле 0.5 T, в периоде

LHC17g было отрицательное магнитное поле 0.2 T, а в LHC17d магниты были отключены. Случаи, когда отношение изменялось, изучены и связаны с особенностями структуры пучка, либо неисправностью некоторых систем детектора. Так в период LHC17с был высокий уровень pile-up; падение в начале периода LHC17i связано с проблемой в модуле LED на PMT A-7; кроме того детектор был отключен в связи заменой read-out crate (12-14 августа, период LHC17k) и модулей QTC (LHC17l).

На рис.14 показан копия экрана LHC интерфейса . На экране зеленым цветом отмечен основной люминометр супердетектора АЛИСА, таблицы и мониторинг измерений светимости.

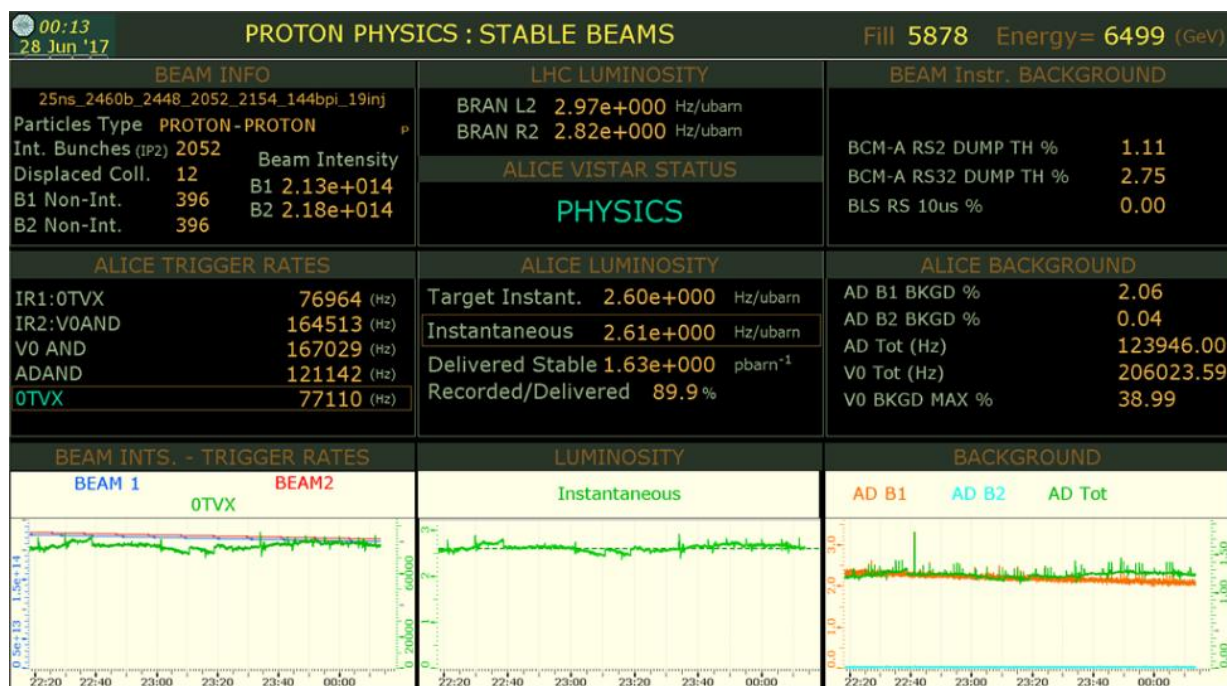


Рисунок 14. Измерение и мониторинг светимости на установке АЛИСА

В ноябре 2017 года было проведено сканирование по методу Ван дер Мера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 5.02$ TeV. В настоящее время ведется обработка данных, собранных во время обоих сеансов, которая позволит произвести анализ и рассчитать видимые (триггерные) сечения для детектора T0. Также ведется анализ данных, полученных во время сеансов сканирования по методу Ван дер Мера для p-Pb и Pb-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8.16$ TeV в ноябре и декабре 2016 года, соответственно.

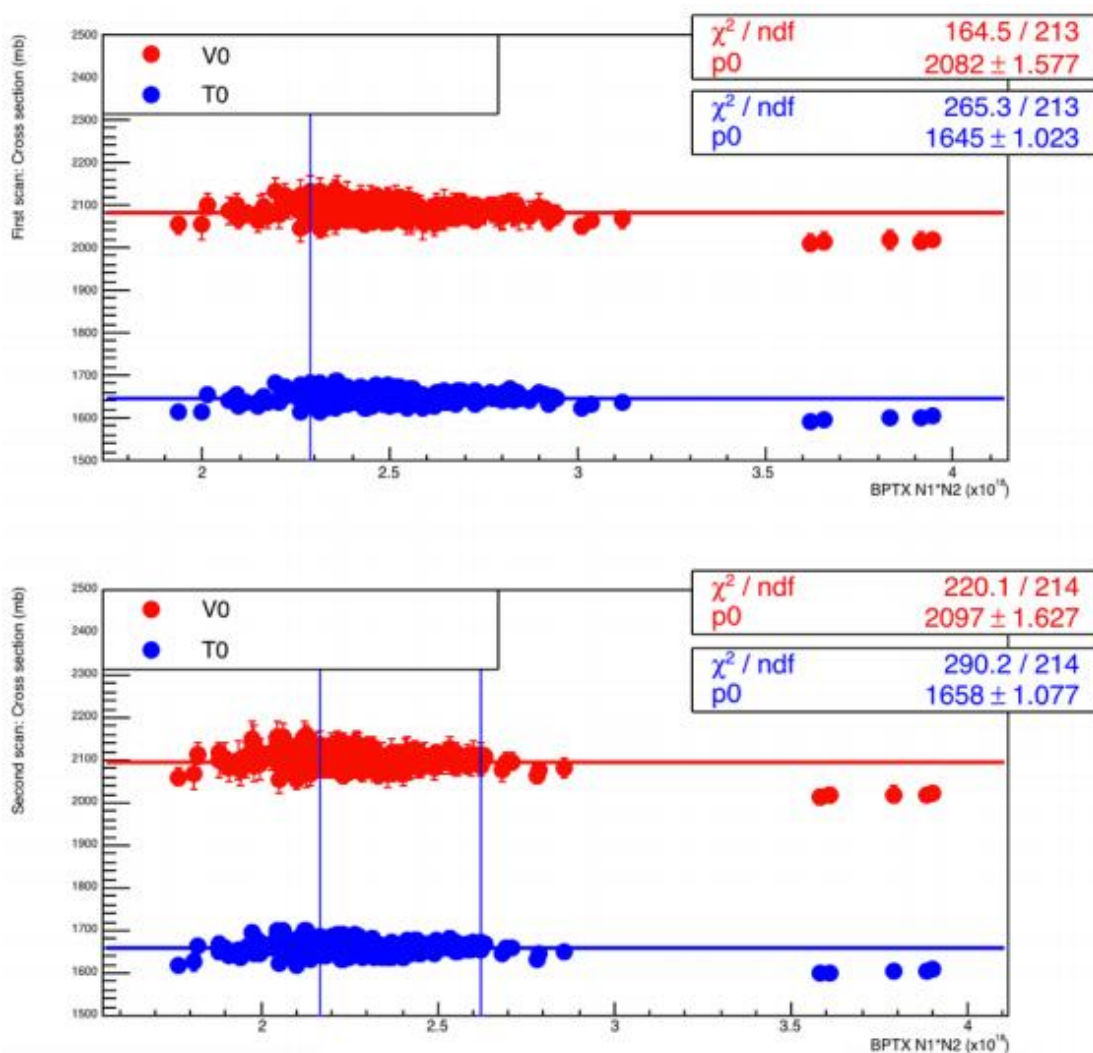


Рисунок 15. Видимое сечение детектора T0 для первого (сверху) и второго (снизу) сканирования методом Ван дер Мера, как функция от произведения интенсивностей (умноженных на 1018 для нормировки) двух пересекающихся банчей для p-Pb столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8.16$ TeV.

В таблице 2 приведены величины триггерных сечений для p-p, p-Pb, Pb-p и Pb-Pb столкновений при различных энергиях за период с 2011 по 2016 годы. Для сканирований, проведенных в июле и ноябре 2012 года, декабре 2015 года и 2016 году, приведены предварительные результаты, так как анализ данных еще не завершен.

Таблица 2. Триггерные сечения детекторов T0, V0 и AD, полученные во время сеансов сканирования методом ван дер Меера в 2011-2017 г.г.

Дата	Тип пучка	$\sqrt{s}$, ТэВ	Детектор	Триггерное сечение	Статьи
12.2011	Pb-Pb	2.76	V0	4.10 b	https://arxiv.org/pdf/1305.7044v1.pdf
17.07.2012	p-p	8	T0	25.24 ± 0.01 mb	Предварительно
			V0	55.17 ± 0.03 mb	

24.11.2012	p-p	8	T0	24,9547 ± 0,2096 mb	Предварительно
			V0	55,7409 ± 0,4601 mb	
29.01.2013	p-Pb	5.02	T0	1.59±0.06 b	https://arxiv.org/pdf/1405.1849.pdf
			V0	2.09±0.07 b	
07.02.2013	Pb-p	5.02	T0	1.59±0.05 b	
			V0	2.12±0.07 b	
26.08.2015	p-p	13	T0	30.1±0.6 mb	https://cds.cern.ch/record/2160174
			V0	57.8±1.2 mb	
19-20.11.2015	p-p	5	T0	21.6±0.4 mb	https://cds.cern.ch/record/2202638
			V0	51.2±1.2 mb	
3-4.12.2015	Pb-Pb	5.02	V0	4.609 b	Предварительно
17.05.2016	p-p	13	T0	28.83 mb	Предварительно
			V0	56.02 mb	
			AD	50.76 mb	
23.11.2016	p-Pb	8.16	T0	1.65 b	Предварительно
			V0	2.09 b	
02.12.2016	Pb-p	8.16	T0	1.65 b	Предварительно
			V0	2.09 b	
27.07.2017	p-p	13			В обработке
12.11.2017	p-p	5.02			В обработке

Расчет эллиптического потока заряженных частиц методом плоскости событий.

Одним из важнейших параметров для анализа состояния ядерной материи в момент столкновения тяжелых ядер при высоких энергиях, является эллиптический поток. Эллиптический поток представляет собой вторую гармонику в разложении Фурье азимутального распределения частиц. Эта гармоника позволяет исследовать динамику азимутального коллективного поведения частиц в зоне перекрытия, которая образуется при столкновении пучков. Из-за геометрии зоны перекрытия, вторая гармоника носит название эллиптического потока. Существует несколько методик для расчета потоков. В данном анализе для расчета потока используется метод плоскости событий.

В методе плоскости событий вводится понятие Q-вектора n-гармоники потока для каждого события.

$$Q\text{-вектор } n\text{-гармоники: } \vec{Q}_n = \left(\sum w_i \cos(n\phi_i), \sum w_i \sin(n\phi_i) \right) = Q_n (\cos(n\Psi_n), \sin(n\Psi_n)),$$

где ϕ_i – азимутальный угол i-частицы, w_i – вес. Для эллиптического потока $n=2$. Расчет Q-вектора проводится для каждого субдетектора установки АЛИСА индивидуально. Особо стоит отметить, что при вычислении Q-вектора, необходимо задать вес w в виде модуля

вектора азимутального направления для каждой частицы, в виду специфики каждого субдетектора. Для трековых субдетекторов, в частности ТРС, вес принят равным 1. Для субдетекторов, в частности Т0 и V0, где множественность измеряется через амплитуды сигнала, который вырабатывается при попадании частиц в элементарную ячейку субдетектора, в качестве веса принимается амплитуда. Из-за ограниченного аксептанса и специфики каждого субдетектора, необходимо проводить калибровку Q-вектора и коррекцию эллиптического потока через разрешение плоскости события. Для вычисления разрешения плоскости события на конкретном субдетекторе, используется особый метод, под названием “метод трех подсобытий”. Данный метод заключается в использовании корреляций между Q-векторами конкретного детектора и еще двух вспомогательных детекторов. Все три субдетектора при этом должны покрывать разные диапазоны по аксептансу. Усредненный по всем событиям Q-вектор позволяет оценить поток. Ключевыми параметрами, влияющими на Q-вектор, является геометрия зоны перекрытия пучков, или центральность взаимодействия.

В связи с будущей модернизацией детектора Т0, возникла необходимость в создании отдельного программного обеспечения (ПО) для оценки эллиптического потока на новом детекторе ФИТ. Для проверки корректности работы ПО, выполнен повторный анализ данных сеансов Pb-Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$. Положительный результат данной проверки, позволил перейти к применению данного ПО на новых данных. В ходе анализа, параметр центральности определялся по субдетектору V0.

В течение 2017 года методом плоскости событий проводился анализ эллиптического потока и его параметров по данным, собранным в ходе сеансов Pb-Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$. Основная задача при вычислении эллиптического потока заключалась в определении плоскости событий, амплитудной калибровки каналов детектора Т0 и коррекции Q-вектора потока (рис. 16 и рис. 17).

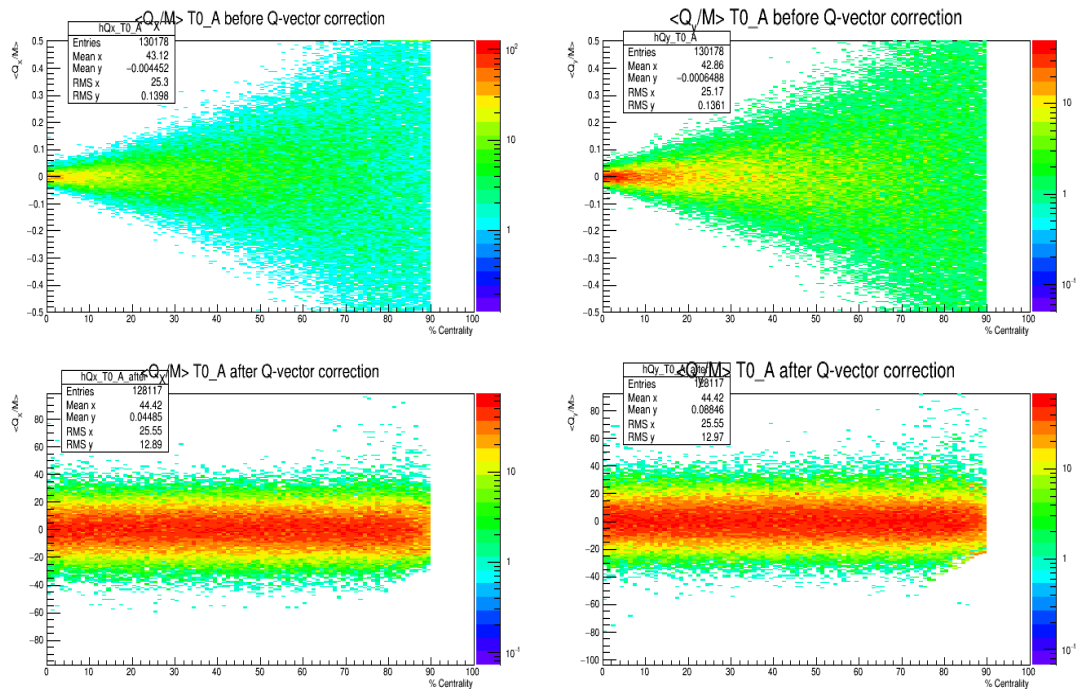


Рисунок 16. Измерения Q-вектора на T0-A, до и после корректировки

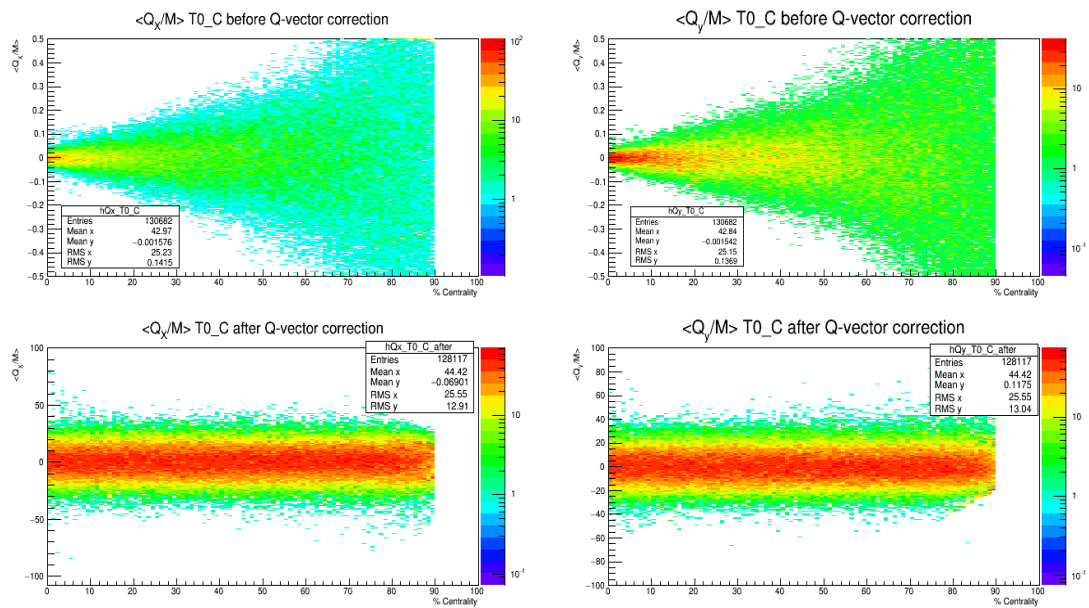


Рисунок 17. Измерения Q-вектора на T0-C, до и после корректировки

На рис. 18 представлены результаты по определению разрешения плоскости реакции основных детекторов АЛИСА, которые используются для ее определения.

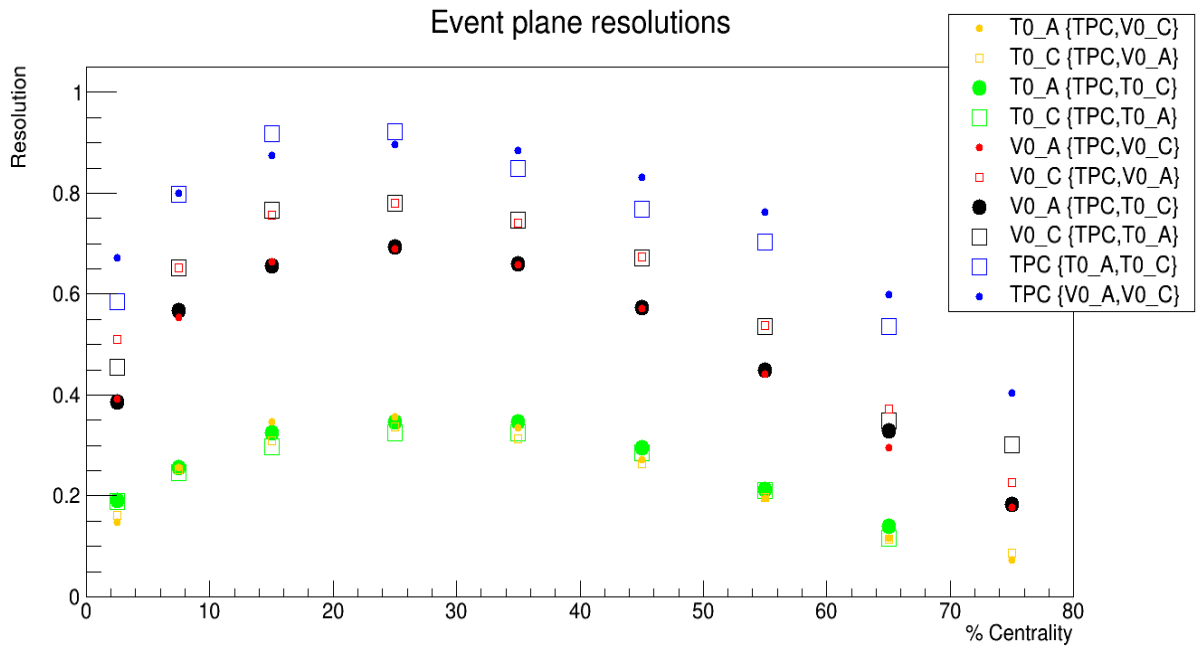


Рисунок 18. Разрешение направления плоскости событий для детекторов T0, V0, TPC в зависимости от центральности взаимодействия. В фигурных скобках указаны детекторы, которые используются для определения разрешения.

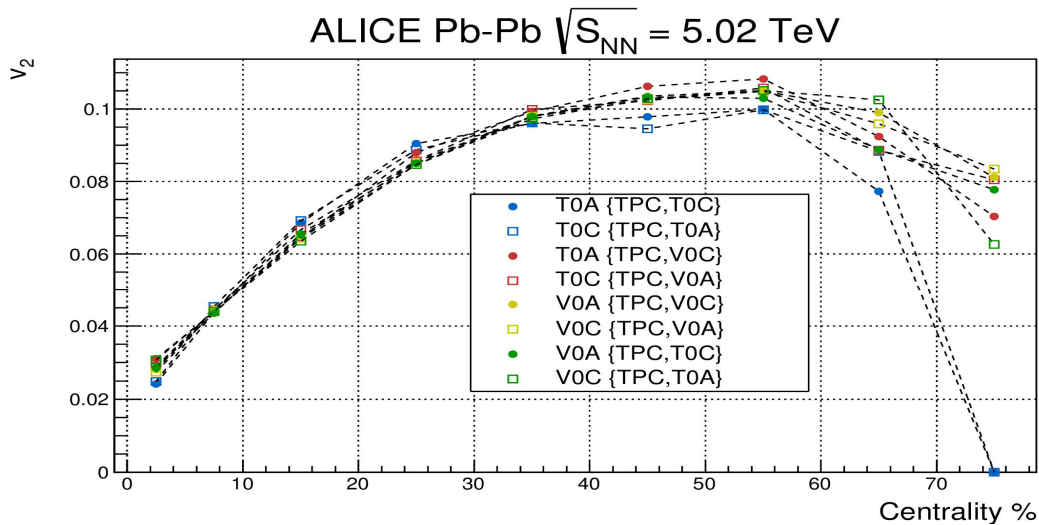


Рисунок 19. Эллиптический поток V_2 в зависимости от центральности взаимодействия.

Конечный результат по эллиптическому потоку (V_2) с использованием различным детекторов установки АЛИСА, представлен на рис. 1.6.4 в зависимости от центральности взаимодействия. Значение потока в диапазоне 70-80% по центральности, равные нулю, связаны с разрешением плоскости событий в данном диапазоне.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что разработанное ПО можно использовать при модернизации детектора T0 в детектор ФИТ.

Модернизация лазерной системы калибровки для детектора Т0 и детектора ФИТ.

Модернизация лазерной системы калибровки детектора Т0 предназначена для настройки и калибровки 208 временных каналов детекторов ФИТ с временным разрешением порядка 50 пс. Основой лазерной системы калибровки является импульсный лазер типа PDL-800-0B фирмы Advanced Photonics Systems с длительностью светового импульса менее 40 пс на длине волны 400 нм (рис.20), что соответствует спектральному диапазону чувствительности используемого в качестве детектора ФЭУ. Импульсный лазер подключается к оптоволоконной системе, состоящей из оптического аттенюатора и системы оптических делителей, с помощью которых световые импульсы подаются на все элементы детектора одновременно.

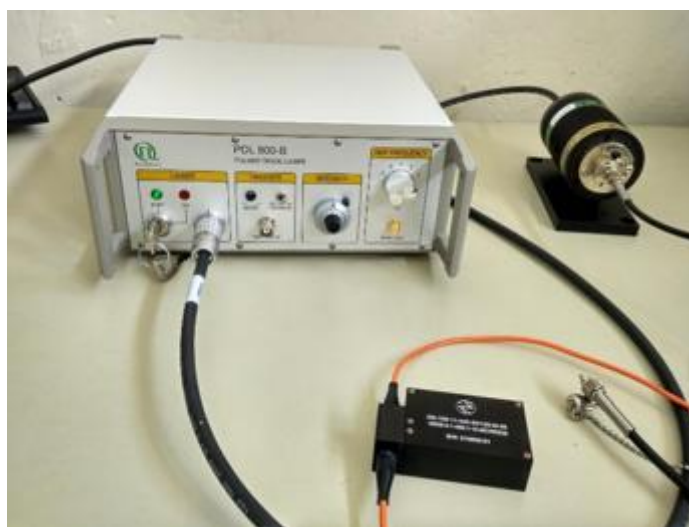


Рисунок 20. Импульсный лазер типа PDL 800-B40G фирмы Advanced Photonics Systems и аттенюатор.

В июне 2017 года в ЦЕРНе были проведены испытания лазерной системы и получены следующие результаты:

1. Энергия в импульсе лазера при токе накачки, равном 70% от максимальной, составляет в пересчете на чувствительность детектора ФИТ 6.2×10^5 мип . с учетом потерь 0.7 дБ в аттенюаторе.

2. Потери в стандартном компенсированного волокне на длине волны 440нм составляют $1.7 \text{ дБ} / 40 \text{ м} = 0.042 \text{ дБ/м}$.

3. Потери в радиационно-стойком волокне на длине волны 440нм составляют примерно 0.02 – 0.03 дБ/м, что соответствует паспортной характеристике волокна. Более точное измерение возможно на отрезке волокна длиной не менее 100 м.

4. Дополнительные потери в оптическом делителе на длине волны 440нм составляют примерно 1.2 дБ / ступень. Коэффициент передачи делителя составляет -4.2 дБ/ступень. Таким образом, общее ослабление оптической системы при использовании стандартных оптических кабелей длиной 40 м и радиационно-стойких кабелей длиной 5 м при делении на 256 каналов составят $1.7 \text{ дБ} + 4.2 \text{ дБ} \times 8 + 0.15 \text{ дБ} = 35.45 \text{ дБ}$, а с учетом дополнительных потерь в коннекторах – 36 дБ, т.е. 4000 раз.

Также был произведен эксперимент с освещением лазерным импульсом сцинтиллятора детектора ФИТ (V0) и измерением амплитуды импульса фотоумножителя. При ослаблении аттенюатора 30 Дб амплитуда импульса составила примерно 6 мип в единицах измерения ФИТ(V0). Данный результат показывает возможность использования режима подвода лазерного импульса к сцинтиллятору для проверки функционирования детектора наряду с непосредственным освещением фотокатода ФЭУ.

Изготовление и тестирование элементов детектора ФИТ.

Научная программа ЦЕРН предусматривает значительное усовершенствование БАК в 2018-2020 гг., что позволит увеличить его светимость более, чем в 10 раз. Это позволит на порядок увеличить скорость набора экспериментальных данных и, следовательно, сделает возможными исследования редких процессов, недоступных при более низкой светимости. Увеличение на порядок скорости набора экспериментальных данных требует существенного усовершенствования детекторных систем супердетектора АЛИСА, так как существующие детекторные системы не способны эффективно работать в новых условиях. В рамках программы модернизации супердетектора АЛИСА в ЛРЯФ и КОРЭ ведутся работы по поиску новых технических решений детекторных систем для экспериментальных исследований свойств кварк-глюонной материи, т.е. ядерной материи, характеризующейся экстремально высокой плотностью энергии, совершившей фазовый переход в состояние свободных кварков и глюонов.

На рис.21 представлены результаты разработок по созданию детектора (рис.21-а,21-в), прототипы электронных модулей (рис.21-с,21-д) и результаты измерений временного разрешения детекторов FIT и T0 (рис.21-е) в шахте эксперимента АЛИСА.

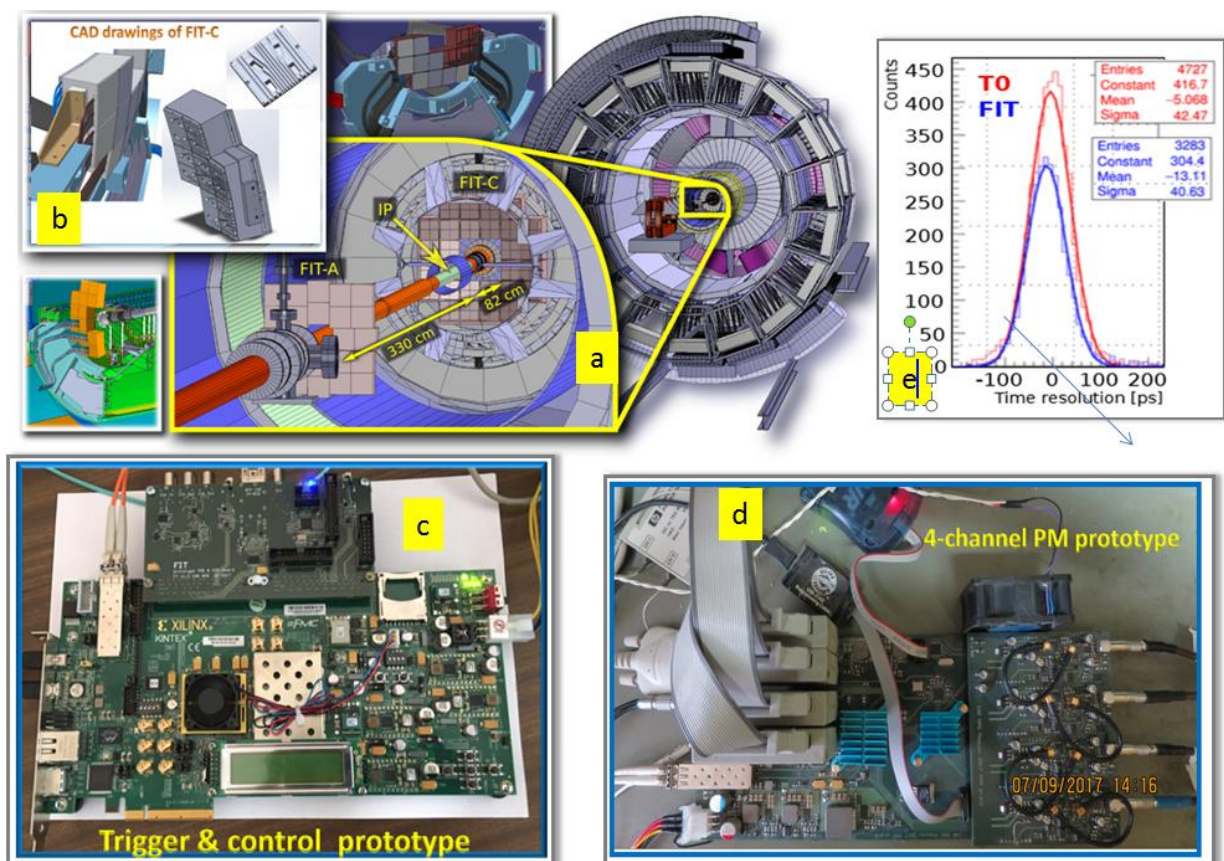


Рисунок 21. Элементы детектора ФИТ.

- a) расположение детектора ФИТ внутри супердетектора ALICE,
- b) элементы механической конструкции,
- c) прототип триггерного и управляющего модуля электроники,
- d) прототип электронного модуля обработки событий,
- t) временное разрешение ФИТ детектора и детектора T0.

1.2. ЭМИССИЯ НУКЛОНОВ ВПЕРЁД В ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ И УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЯДЕР НА БАК

Эксперимент ALICE является единственным экспериментом на БАК, в котором возможна регистрация не только нейтронов, но и протонов, вылетающих вперёд в результате периферических и ультрапериферических взаимодействий ядер. Указанное преимущество обеспечивается работой протонных Zero Degree Calorimeters (ZDC) наряду с нейтронными ZDC в этом эксперименте. Группой ИЯИ РАН было предложено изучить эмиссию нейтронов и протонов вперёд в столкновениях ядер свинца на БАК для оценки объема спектаторной материи, остающейся связанной в тяжелых спектаторных фрагментах и для измерения эмиссии протонов наряду с нейтронами в электромагнитной диссоциации ядер (ЭМД). Кроме получения физических результатов, решение последней задачи имеет большое практическое значение для решения инженерных задач функционирования БАК, так как позволяет оценить

выходы ядер, образующихся в ЭМД и имеющих близкое к ядрам пучка отношение заряда к массе. Такие ядра создают определённые трудности для эффективной работы системы коллиматоров в сеансах ядро-ядро, так как траектории их транспортировки в магнитном поле коллайдера могут проходить внутри коллиматоров. В результате этого определённые вторичные ядра, например ^{206}Pb , могут оказывать дополнительную локальную тепловую и радиационную нагрузку на конструкционные элементы БАК, в частности, на сверхпроводящие магниты.

Эмиссия нейтронов и протонов ядрами свинца в результате электромагнитной диссоциации

В 2017 году группой ИЯИ РАН выполнен предварительный анализ экспериментальных данных девяти сеансов столкновений ядер свинца ^{208}Pb , проходивших в 2010, 2011 и 2015 годах на установке ALICE на БАК. Были получены распределения и корреляции энергий в передних нейтронных и протонных калориметрах. В случае достоверного измерения числа протонов и нейтронов, испускаемых ядрами ^{208}Pb , такой анализ позволит оценить вероятности образования определенных остаточных ядер, таких как изотопы таллия ^{204}Tl , ^{205}Tl и ^{206}Tl и изотопы свинца ^{205}Pb , ^{206}Pb и ^{207}Pb , которые, по причине сходного к ядрам пучка отношения заряда к массе, могут транспортироваться магнитным полем БАК на большие расстояния от точки взаимодействия и проходить сквозь систему коллиматоров БАК.

Проведен анализ событий, отобранных триггером C1ZED-B, который требует наличие сигнала в нейтронном калориметре хотя бы с одной стороны (A или C) от точки столкновений. Отбирались события электромагнитной диссоциации ядер свинца по критерию отсутствия сигнала в электромагнитных калориметрах ZEM. Видимое сечение электромагнитной диссоциации было измерено с помощью метода Ван дер Меера и оказалось равным 414.3 барн. На основе этого значения можно определять сечения других процессов. На Рис 22 показаны измеренные в сеансах 2015 года распределения энергии в нейтронных калориметрах.

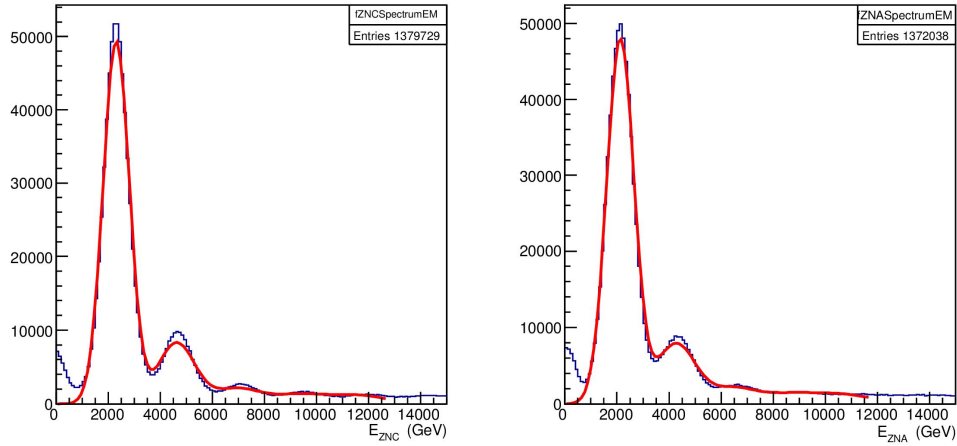


Рисунок 22. Распределения энергии в передних нейтронных калориметрах на стороне С (слева) и на стороне А (справа) в эксперименте ALICE на БАК при столкновении пучков ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ. Экспериментальные данные представлены гистограммой, сплошная линия представляет собой сумму пяти гауссианов как результат фитирования этих данных.

Дополнительно используя сигнал с протонных калориметров, можно получить оценки сечений образования изотопов таллия. ^{204}Tl , ^{205}Tl , ^{206}Tl . На Рис. 23 представлены распределения энергий в нейтронных калориметрах при наличии однопротонного сигнала. Предстоит оценить поправки, связанные с эффективностью регистрации протонов в протонных ZDC.

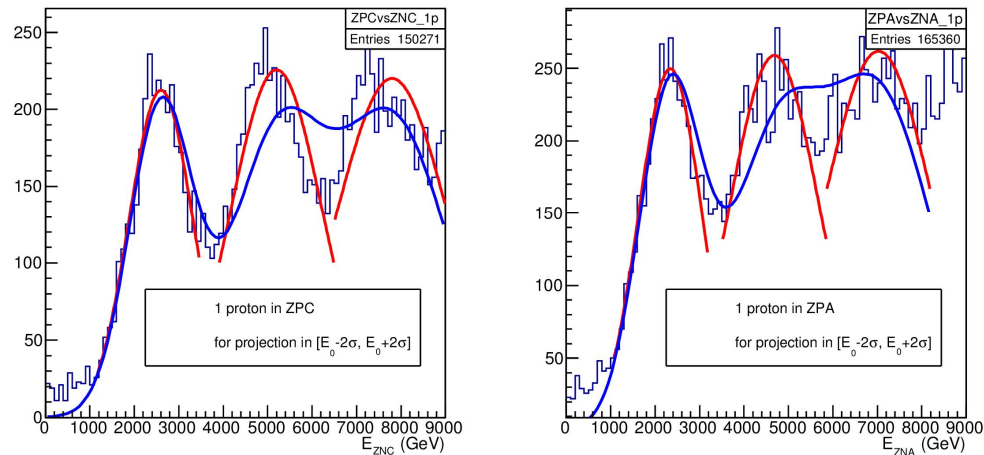


Рисунок 23. Распределения энергии в передних нейтронных калориметрах на стороне С (слева) и на стороне А (справа) при условии наличия сигнала в протонном калориметре на той же стороне, соответствующего одному протону в эксперименте ALICE на БАК при столкновении пучков ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ. Синяя линия представляет результат фитирования отдельных пиков гауссианами, красная дает их сумму.

Получены корреляции энергий в передних нейтронных и протонных калориметрах (ZDCs) в электромагнитных событиях, см. Рис. 24.

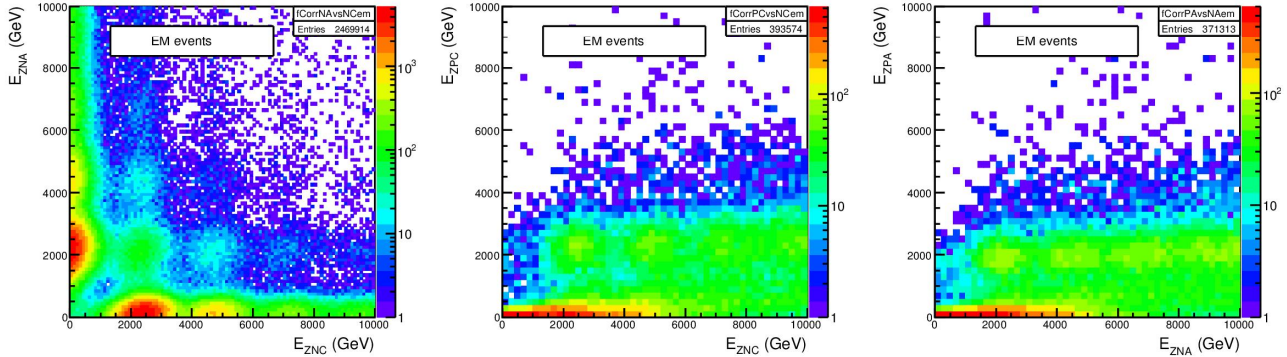


Рисунок 24. Слева: корреляция между энергиями, поглощёнными в переднем нейтронном калориметре ZNA (сторона A) и переднем нейтронном калориметре ZNC (сторона C). В центре: корреляция между энергиями в протонном и нейтронном калориметре на стороне C. Справа: корреляция между энергиями в протонном и нейтронном калориметре на стороне A. Измерения проведены в эксперименте ALICE на БАК при столкновении ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ.

Изучение свойств спектаторной материи в столкновениях ядер свинца на Большом адронном коллайдере (БАК).

Выполнена предварительная обработка экспериментальных данных сеансов столкновений ядер свинца ^{208}Pb , проходивших в 2015 году на установке ALICE. Получены распределения и корреляции энергий в передних нейтронных и протонных калориметрах (ZDCs). Впервые в эксперименте ALICE были получены зависимости энергии, поглощенной в переднем протонном калориметре ZP от сигнала в переднем электромагнитном калориметре ZEM для адронных взаимодействий ядер, см. Рис. 25 в качестве примера такой зависимости. Как видно из этого рисунка, количество нейтронов, вылетающих вперёд не превышает 65. В дальнейшем предстоит оценить поправки, связанные с эффективностью регистрации протонов в протонных ZDC. Вместе с аналогичной зависимостью для нейтронного ZDC это позволит извлечь зависимость отношения выходов нейтронов и протонов вперёд от величины прицельного параметра события. Ожидается, что при больших прицельных параметрах, соответствующих периферическим столкновениям ядер, n/p-отношение будет выше соответствующей величины 1.54 в первоначальных ядрах. Это будет являться

доказательством того, что значительная часть спектаторной материи в периферических столкновениях остается в связанном состоянии в виде тяжелых фрагментов, а определённая доля свободных спектаторных нейтронов появляется в результате преимущественного испарения нейтронов из таких фрагментов.

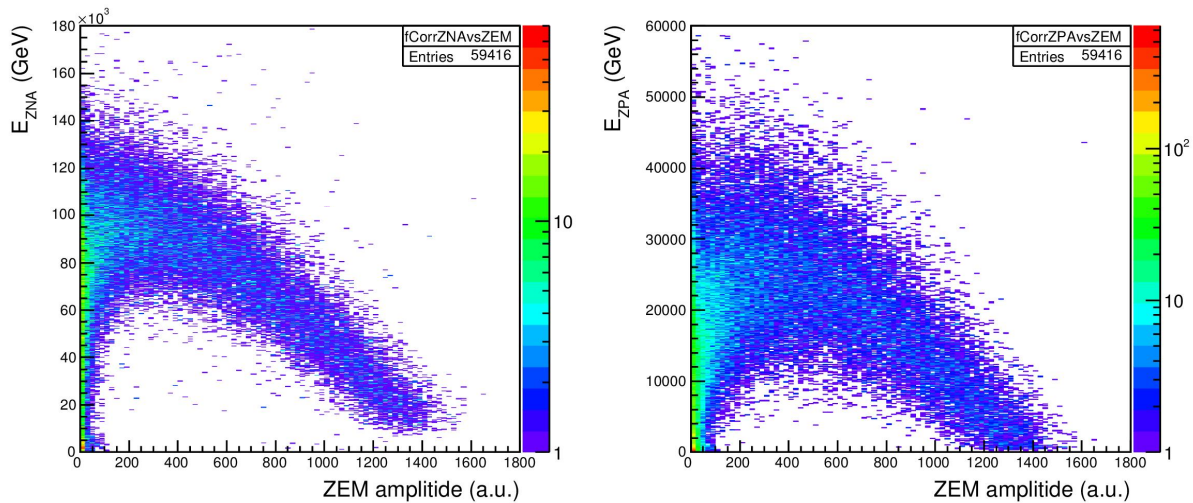


Рисунок 25. Энергия, поглощенная в передних нейтронном калориметре ZNA (слева) и протонном калориметре ZPA (справа), в зависимости от сигнала в переднем электромагнитном калориметре ZEM на стороне A в эксперименте ALICE на БАК при столкновении ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ. В данных сеанса 2015 года отбирались события адронных взаимодействий ядер по критерию наличия сигнала в электромагнитных калориметре ZEM.

Сечения взаимодействия ядер ксенона на БАК.

С помощью модели RELDIS, разработанной в предыдущие годы в ИЯИ РАН, вычислены полные сечения электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер ^{129}Xe на БАК при энергии соударения на нуклон-нуклонную пару $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ ТэВ. Полное сечение одиночной электромагнитной диссоциации при этой энергии составило 50.6 барн, взаимной диссоциации — 0.69 барн. Вычисления ЭМД для этого ядра связаны с рядом неопределённостей, поскольку отсутствует возможность непосредственной проверки надежности модели фотоядерных реакций RELDIS для ^{129}Xe в области энергий эквивалентных фотонов до 140 МэВ, которая дает определяющий вклад в сечение ЭМД. Потому в вычислениях RELDIS использовались фотоядерные данные для соседнего изотопа ^{127}I .

Выполнен предварительный анализ данных, собранных в сеансе столкновений ядер ^{129}Xe

на БАК при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ ТэВ, аналогичный анализу для столкновений ядер свинца ^{208}Pb . На Рис. 26 представлены распределения энергий в передних нейтронных и протонных калориметрах в электромагнитных событиях.

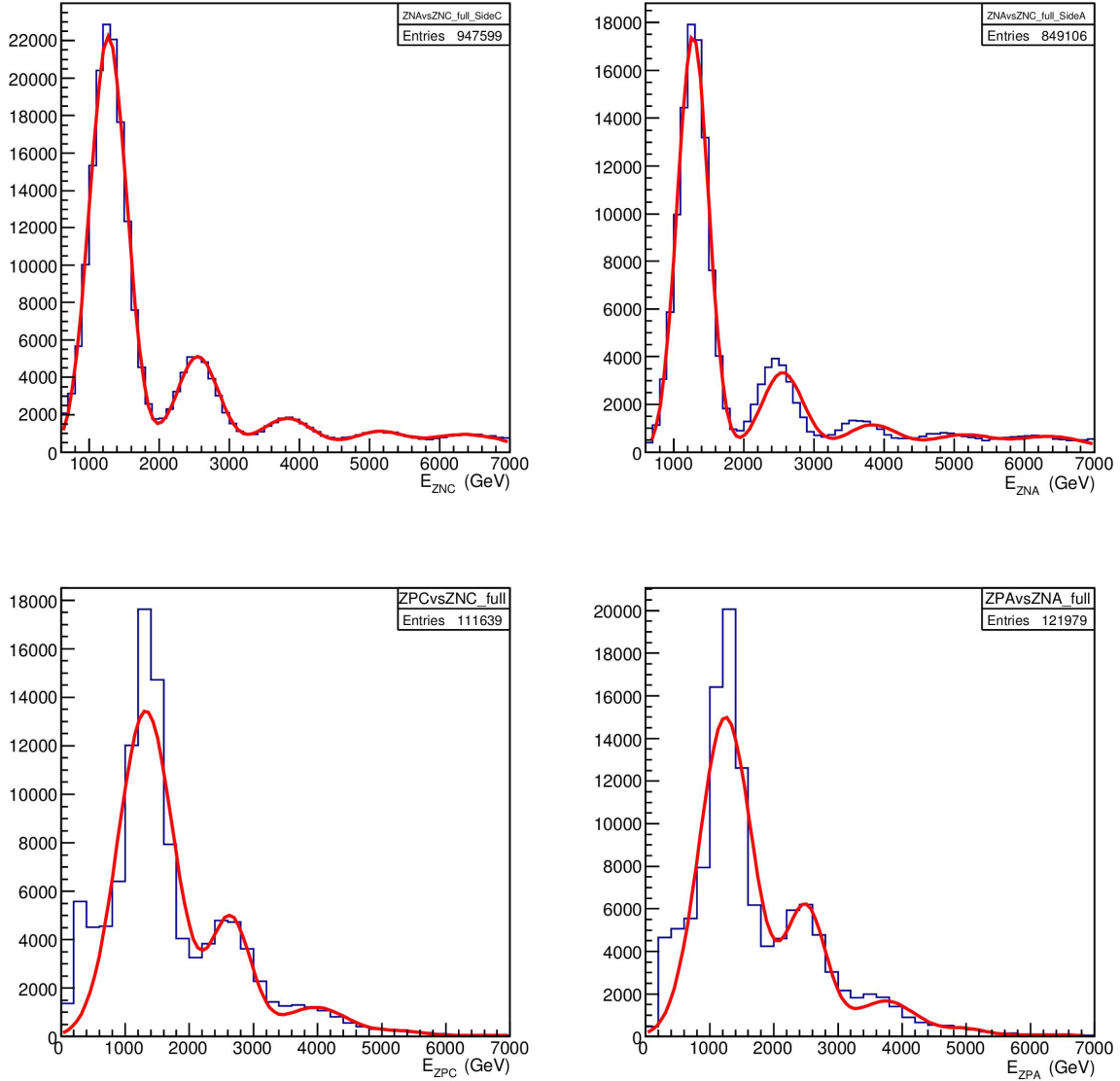


Рисунок 26. Распределения энергии в передних нейтронных (вверху) и протонных (внизу) калориметрах на стороне С (слева) и на стороне А (справа) в эксперименте ALICE на БАК при столкновении пучков ядер ксенона при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ ТэВ. Экспериментальные данные представлены гистограммой, сплошная линия представляет собой сумму гауссианов как результат фитирования этих данных.

1.3. ALICE DIFFRACTION, AD ДЕТЕКТОР

Исследование дифракционных процессов занимает особое место в научных программах экспериментов на Большом адронном коллайдере. До сих пор не существует теоретических методов, которые позволили бы предсказать поведение дифракционных сечений из первых принципов. Поэтому важнейшим источником информации об этих процессах является именно эксперимент. Несмотря на то, что в составе установки ALICE нет детекторов типа Roman Pot, как в эксперименте TOTEM, по некоторым параметрам возможности ALICE в отношении изучения дифракционных событий превосходят возможности TOTEM. В частности, благодаря низкой величине минимального поперечного импульса ($p_T=0.1$ ГэВ/ c^2), начиная с которого возможна идентификация частиц центральными детекторами ALICE, и особым параметрам магнитной оптики установки ALICE возможно исследование центральной дифракции вплоть до масс, недостижимых в других экспериментах.

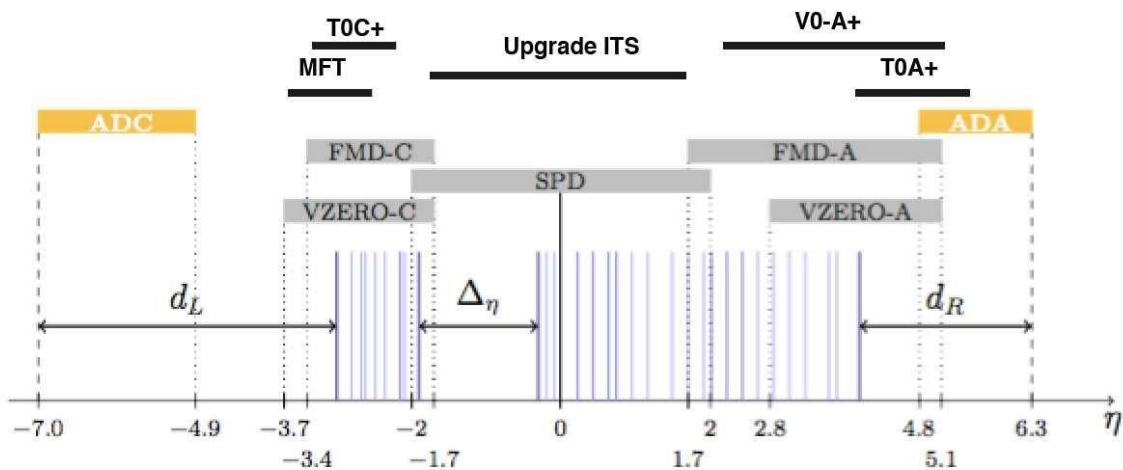


Рисунок 27. Диапазоны псевдобыстрот, покрываемые различными детекторными системами установки ALICE

В ходе сеанса 2017 года проведены новые измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.с.м.. Проводится обработка полученных экспериментальных данных по одиночной, двойной и центральной дифракции, которая включает анализ данных не только с системы детекторов ADA и ADC, созданных при участии сотрудников ИЯИ РАН, но и данных центральных детекторов ITS (вершинный детектор), TOF – T0 (время пролетная система), TPC (время проекционная камера) и др.

AD детектор состоит из двух частей (A и C) расположенных по две стороны от точки взаимодействия эксперимента ALICE. Каждая часть представляет собой

двухслойный годоскоп из сцинтилляторов размером 22х22х2,5 см³, установленных возле вакуумной трубы на расстоянии 18 м (сторона А) и 20 м (сторона С) 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 А и $-7.0 < \eta < -4.9$ со стороны С, что позволяет исследовать дифракционные процессы при малых поперечных импульсах. Детектор AD также используется в эксперименте ALICE как монитор светимости пучка и для сепарации фоновых событий. По сравнению с другими детекторами ALICE детекторы ADA и ADC работают в диапазоне максимальных псевдобыстрот (Рис. 3.1), что позволяет проводить исследования по поиску новой физики.

В пробном сеансе при столкновении ядер ксенона показана возможность определения центральности соударений с помощью детекторов ADA и ADC, подобно тому, как в течение всего времени работы ALICE центральность определялась по величине множественности детектором V0. Распределение множественности для детекторов ADA и ADC показано на Рис. 28.

Временное разрешение составляет 350 - 380 пикосекунд, что значительно лучше временного разрешения детектора V0. На рисунке также показано двумерное распределение времени срабатывания ADA и ADC, что позволяет отделить реальные события от столкновения ускоренных ядер с атомами остаточного газа.

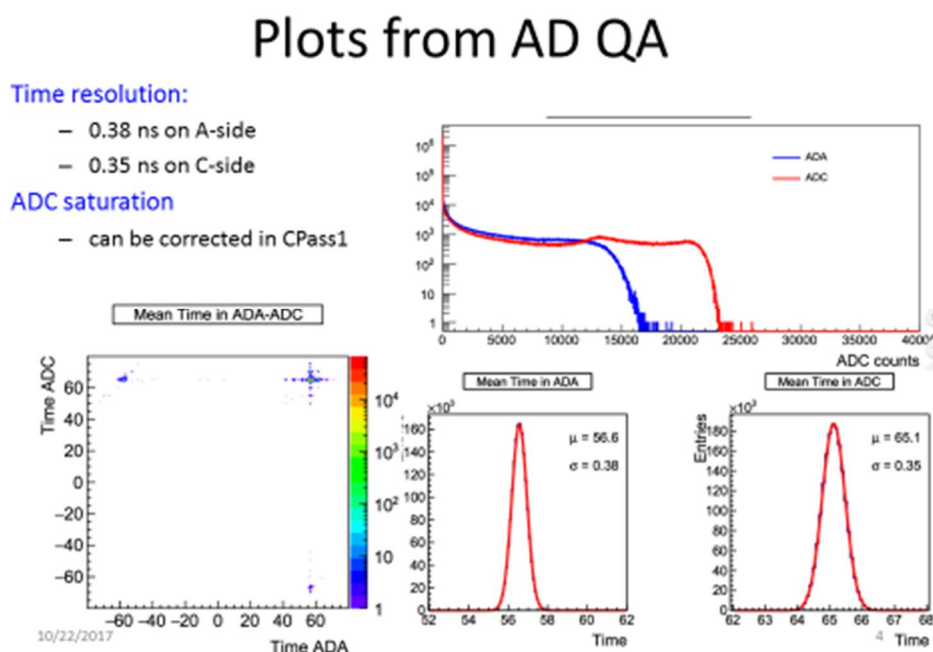


Рисунок 28. Временные распределения, распределения по множественности детекторов ADA и ADC и корреляция времени срабатывания детекторов ADA и ADC для столкновения ядер ксенона.

Для увеличения эффективности работы детекторов ADA и ADC планируется использовать новые и более технологичные фотоумножители фирмы Hamamatsu. Для определения режимов работы, надежности и эффективности был проведен тест временной стабильности ФЭУ в лабораторных условиях. Был собран стенд, полностью подобным реальной установке детекторов ADA и ADC в составе ALICE. Были созданы специальные запускающие программы (скрипты), позволяющие в автоматическом режиме проверять все предельные параметры (напряжение, ток работы светодиода) и , таким образом, за достаточно короткий период провести тестовые испытания ФЭУ, как старого типа H6153-70, так и нового типа H6533.

В рамках программы модернизации детекторных систем установки ALICE продолжены работы по исследованию возможности использования модуля TRB3 (разработка GSI, Германия) для передних сцинтилляционных детекторов AD.

Для создания программно-аппаратного комплекса детектора AD, построенного на основе TRB3 readout board и отладочной платы KC705 на базе XC7K325T-2FFG900C FPGA подготовлено необходимое оборудование. На рис.29 эта часть установки обозначена PC1. Важной частью работы будет написание программного кода (Firmware) для осуществления сопряжения структуры TRB3 и существующей реализацией GBT протокола сбора данных установки АЛИСЕ (O^2) через оптические/сетевые интерфейсы EthN.

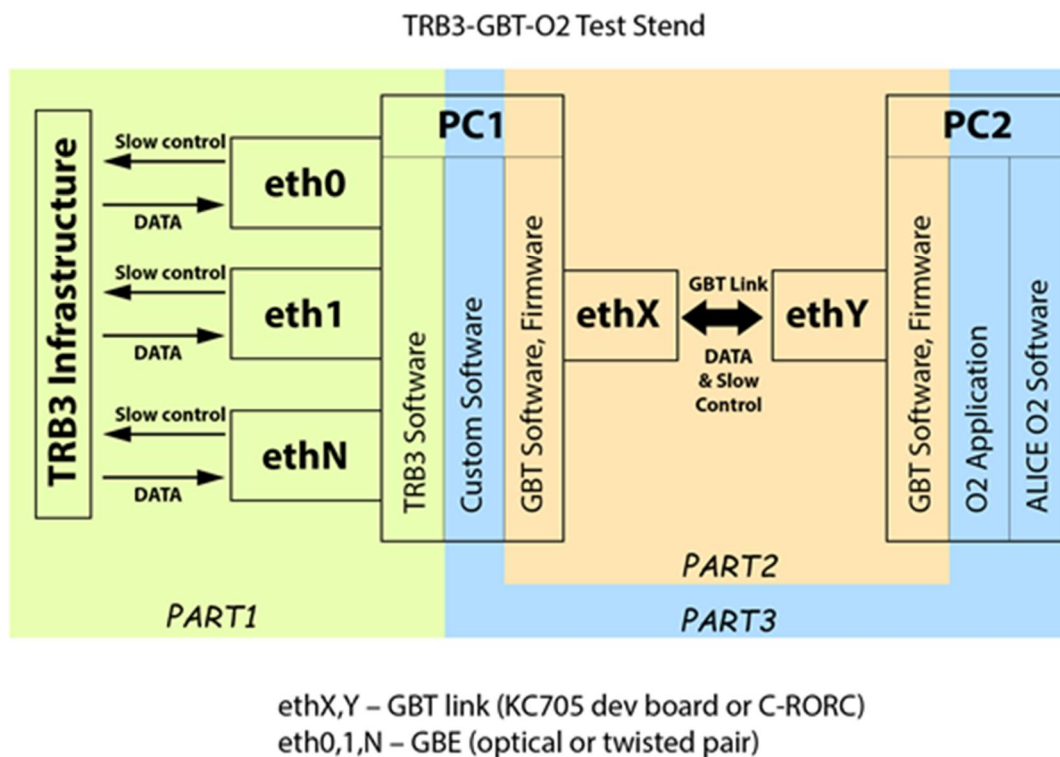


Рисунок 29. Структура и этапы создания тестового стенда TRB3- O^2

Собран стенд для выполнения работ по связи TRB3 с проектом O2 ALICE (on-line-off-line). Фотография стенда представлена на рис 3.4. Для продолжения проведения работ по испытанию FEE и различных существующих дополнительных блоков (addons) для TRB3 readout board были проведены работы по настройке программного обеспечения. Для online анализа поступающих с TRB3 данных и последующего отображения их в графическом виде, установлено и настроено программное обеспечение: GO4, DABC stream. Также созданы запускающие программы (скрипты) создающие переменные в рабочем окружении ОС Linux, для корректной работы вышеуказанных программ.

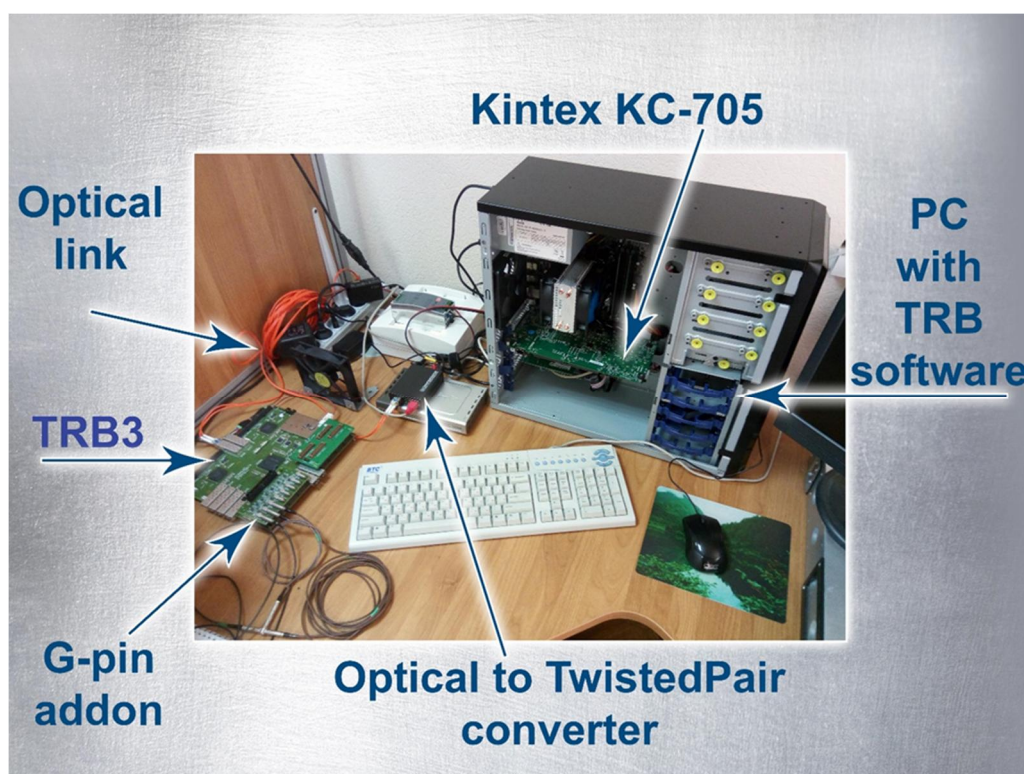


Рисунок 30. Тестовый стенд TRB3-O2

Наиболее существенный вклад в систематическую ошибку измерения дифракционных сечений вносят процессы с образованием резонанса Ропера и других радиальных возбуждений протона. Основными каналами распада этих резонансов являются $N^* \rightarrow p+\pi^0$ и $N^* \rightarrow n+\pi^+$, причём протон и нейтрон могут быть зарегистрированы детектором ZDC, а заряженный пион или продукты распада нейтрального пиона – детектором AD. Таким образом, оказывается возможным определить вклад данных процессов в дифракционные сечения и оценить систематическую ошибку их измерения.

В 2017 году выполнено Монте-Карло моделирование процессов одиночной и двойной

дифракции с рождением резонанса Ропера с использованием генератора событий Pythia6 и программного пакета AliRoot, а также определена эффективность регистрации таких событий детекторами ZDC и AD.

Таблица 3. Эффективность регистрации резонанса Ропера N*(1440) детекторами AD и ZDN.

Тип процесса	!AD	!AD	AD	AD	сторона детектора
	!ZDN	ZDN	!ZDN	ZDN	
SDR	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	С
	55.18%	44.70%	0.09%	0.03%	А
SDL	54.63%	43.58%	0.67%	1.12%	С
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	А
DD	18.61%	14.25%	9.76%	7.28%	С
	7.43%	5.75%	21.02%	15.90%	А

Таблица 4. Эффективность регистрации резонанса Ропера N*(1440) детекторами AD и ZDP.

Тип процесса	!AD	!AD	AD	AD	сторона детектора
	!ZDP	ZDP	!ZDP	ZDP	
SDR	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	С
	94.18%	5.70%	0.12%	0.00%	А
SDL	92.45%	5.75%	1.79%	0.01%	С
	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	А
DD	30.88%	1.98%	15.94%	1.10%	С
	12.39%	0.79%	34.67%	2.25%	А

Колонки в таблицах 3 и 4 соответствуют различным комбинациям срабатывания/вето детекторов. Например, AD !ZDP обозначает, что в данной колонке считаются события, в которых через AD прошла как минимум одна заряженная частица, в то время как в ZDP не попал ни один протон. Числа в ячейках соответствуют числу событий с рождением резонанса Ропера, в которых на соответствующей стороне сработала определенная комбинация детекторов. Каждая отдельная таблица соответствует типу события, в котором был рожден резонанс: одиночная дифракция на стороне А, на стороне С либо двойная дифракция.

1.4. ЭКСПЕРИМЕНТ С ФИКСИРОВАННОЙ МИШЕНЬЮ AFTER НА ПУЧКАХ LHC ДЛЯ ФИЗИКИ АДРОНОВ И СТОЛКНОВЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Проведена работа по подготовке эксперимента с фиксированной мишенью AFTER на пучках БАК.. Используя пучки БАК на фиксированной мишени, можно получить данные в диапазоне энергий 30-100 ГэВ. Новые эксперименты в этом энергетическом интервале и в новой кинематической области очень важны для изучения свойств адронов и глюонов, для исследования механизмов рождения кварконигов и понимания условий возникновения кварк-глюонной плазмы (QGP). Исследование эффектов холодной ядерной материи (CNM) и понимание свойств ядерной материи требуют систематических и статистически достоверных измерений в этой области энергий.

Эксперименты с фиксированной мишенью на пучках БАК имеют преимущества по сравнению с экспериментами на коллайдере. Высокая светимость значительно увеличит статистическую точность экспериментальных данных, а также обеспечит лучший контроль над эффективностью и акцептансом. При использовании протонного и ионного пучков БАК может быть исследована область энергии между максимальной энергией SPS ($\sqrt{s} \sim 29$ ГэВ) и стандартной энергией RHIC ($\sqrt{s} = 200$ ГэВ) в p-A и A-A столкновениях. Для протонного пучка с энергией 7 ТэВ энергия в нуклон-нуклонном центре масс составит $\sqrt{s_{NN}} = 114.6$ ГэВ, и для пучка свинца с энергией 2.75 ТэВ $\sqrt{s_{NN}} = 71.8$ ГэВ.

Существуют различные возможности использовать пучки БАК высокой энергии для взаимодействия с фиксированной мишенью. Эксперимент с мишенью в форме тонкого кольца или диска, помещенного в гало пучка, предложенный ЛРЯФ ИЯИ, может быть проведен на существующих на БАК установках (например, ALICE или LHCb). Мишень может помещаться в рабочее положение с помощью специального устройства после проведения пучка. Исследована техническая возможность установки такой мишени, изготовлен прототип устройства для установки и перемещения мишени. Проводится исследование возможного места расположения такой мишени на модернизированной установке АЛИСА. В эксперименте будет использоваться только гало пучка, а мишень будет являться еще и дополнительным коллиматором. Этот эксперимент с фиксированной мишенью в форме тонкого кольца может являться первой стадией более сложного эксперимента AFTER (A Fixed Target Experiment), требующего создания новой установки.

Другой возможностью является использование изогнутого отклоняющего кристалла, помещенного в гало пучка. Несколько протонов (или ионов свинца) в банче могут быть каналированы по оси кристалла. Эта техника выведения пучка эффективна и позволяет получать чистые и хорошо сфокусированные пучки. Замечательной особенностью этой

техники является то, что она не влияет на установки БАК, т.к. использует только гало пучка. Аналогичная этой техника постоянно и успешно исследуется для возможности улучшения существующей на БАК системы коллимации (лабораторией UA9).

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

В рамках проекта AFTER планируется исследование столкновений протонов и тяжелых ионов при больших быстротах, детальное изучение процессов рождения кваркониев и подавление их рождения в зависимости от фазового перехода материи в кварк-глюонную фазу. Эксперимент AFTER позволит также исследовать нуклонные и ядерные функции распределения кварков и глюонов, извлекаемые из адронных процессов, при больших значениях Фейнмановской переменной x_F . В настоящее время эти данные известны с очень большой степенью неопределенности. Планируется изучение спиновых процессов, в том числе измерение спиновой асимметрии. В настоящее время все ускорители с энергией $E_p > 100$ ГэВ имеют программу исследований с фиксированной мишенью (Tevatron, HERA, SPS, RHIC).

Эксперимент AFTER имеет обширную физическую программу, позволяет использовать различные пучки и мишени большой толщины, в том числе поляризованные. Физическая программа включает исследование рождения кваркониев, измерение процесса Дрелла-Яна, исследование рождения D-мезонов, измерение потоков, спиновую физику, энергетическое сканирование для поиска критической точки возможного перехода в кварк-глюонную плазму (КГП). Данные по рождению кваркониев с высокой статистикой в этих областях даст возможность понять механизм рождения, изучить вклад и важность процесса регенерации кваркониев, т.к. вероятность рекомбинации уменьшается с уменьшением энергии столкновения. Будет возможно не только изучать рождение J/ψ , $\psi(2S)$ и $\Upsilon(nS)$ мезоны, но также и соответствующие χ_c состояния, измерение которых требует высокой статистики и большого аксептанса детектора и хорошего контроля эффективности. Изучение процесса Дрелла-Яна важно само по себе, а кроме того еще и как фоновый процесс при изучении кваркониев. Рождение D-мезонов является важной составляющей в рождении и диссоциации чармония.

Исследование спиновых процессов в эксперименте AFTER на поляризованных мишенях, в частности измерение поперечной спиновой асимметрии даст информацию об орбитальном угловом моменте движения партонов в нуклоне. Эти измерения могут дать дополнительную

информацию о вкладе орбитального углового момента кварков и глюонов в спин протона.

Функции распределения глюонов (PDF) при высоких и ультравысоких x_F в протоне и нейтроне могут быть определены из экспериментальных данных, полученных в эксперименте с фиксированной мишенью в условиях высокой светимости пучков. В настоящее время эти распределения получены с большой неопределенностью для протонов, но отсутствуют экспериментальные данные для глюонных распределений в нейтроне. В эксперименте AFTER глюонные распределения в нейтроне могут быть получены из измерений на дейтронах. Данные могут быть получены при анализе рождения тяжелых кваркониев, изолированных фотонов, а также струй с большим поперечным импульсом. Исследования могут быть проведены на фиксированных мишенях с различным атомным весом, что позволит изучать также массовую зависимость эффектов экранирования (shadowing) и эффекты ядерной среды. Используя пучки БАК с уменьшенной энергией на фиксированной мишени, можно получить данные в диапазоне энергий 30-100 ГэВ. Поиск эффектов фазового перехода и определение критической точки является основной целью энергетического скана. Более того, это дает возможность исследовать рождение чармония, J/ψ , $\psi(2S)$, χ , на нескольких ядерных мишенях. Проект AFTER совместно с Институтом CNRS в Орсе, Франция, готовится для представления в программный комитет ЦЕРНа. Планируется проведение первых тестовых измерений на БАК после 2021 г.

Технические возможности установки фиксированной мишени в форме тонкого кольца, помещенного в гало пучка, обсуждаются в ИЯИ РАН, ОИЯИ (Дубна), в рабочей группе эксперимента AFTER, а также на LHC в группе фиксированной мишени в объединении Physics Beyond Collider. Направлена заявка в РФФИ по совместному проекту РФФИ – CNRS (Франция): «Исследование взаимодействия тяжелых ионов и протонов с ядрами на пучках LHC с фиксированной мишенью в эксперименте ALICE (Проект AFTER@ALICE: Эксперимент с фиксированной мишенью на установке ALICE)» (НЦНИ_a).

Проведен расчет светимости для различных твердотельных мишеней толщиной 500 микрометров, результаты которого представлены в таблице 5. Интегральная светимость для Pb пучка на мишени из W при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ ГэВ составит 0.3/нанобарн для измерений в течение месяца.

Таблица 5. Расчет светимости для различных твердотельных мишеней в эксперименте AFTER

LHC beam	Target species	Density ρ [g cm ⁻³]	M [g mol ⁻¹]	Thickness ℓ [μ m]	θ_{target} [cm ⁻²]	beam flux [s ⁻¹]	$\mathcal{L}$ [cm ⁻² s ⁻¹]
p	C	2.25	12	500	$5.6 \cdot 10^{21}$	5×10^8	$2.8 \cdot 10^{30}$
p	Ti	4.43	48	500	$2.8 \cdot 10^{21}$	5×10^8	$1.4 \cdot 10^{30}$
p	W	19.25	184	500	$3.1 \cdot 10^{21}$	5×10^8	$1.6 \cdot 10^{30}$
Pb	C	2.25	12	500	$5.6 \cdot 10^{21}$	10^5	$5.6 \cdot 10^{26}$
Pb	Ti	4.43	48	500	$2.8 \cdot 10^{21}$	10^5	$2.8 \cdot 10^{26}$
Pb	W	19.25	184	500	$3.1 \cdot 10^{21}$	10^5	$3.2 \cdot 10^{26}$

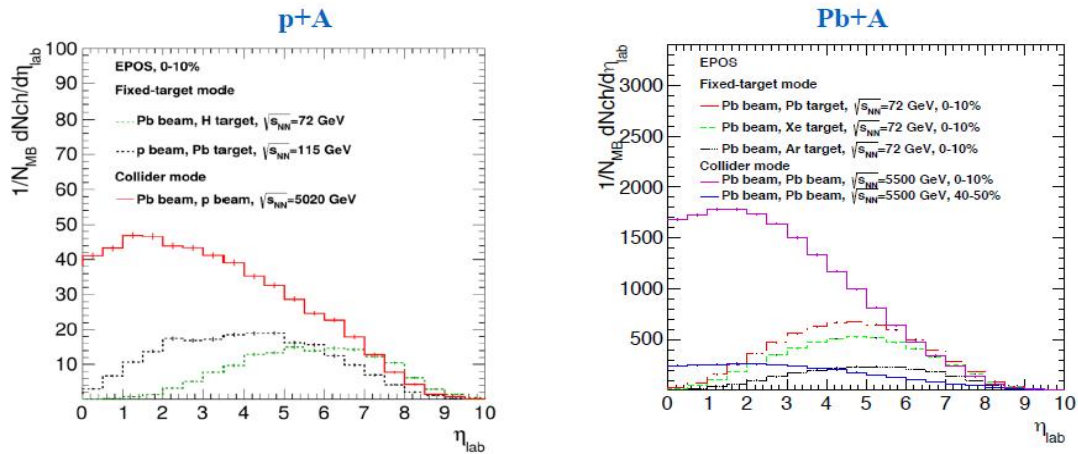


Рисунок 31. Расчет множественности заряженных частиц, полученных в экспериментах с фиксированной мишенью с пучками протонов и ядер свинца в сравнении с множественностью при столкновении в режиме сталкивающихся пучков на коллайдере. Слева - p+Pb при энергии 115 ГэВ и Pb+H при энергии 72 ГэВ (фиксированная мишень) в сравнении с p+Pb при энергии 5.02 ТэВ (сталкивающиеся пучки). Справа - Pb+Pb, Pb+Xe, Pb+Ar при энергии 72 ГэВ (фиксированная мишень) в сравнении с Pb+Pb при энергии 5.5 ТэВ (сталкивающиеся пучки).

Рассчитаны также множественности заряженных частиц для протонного пучка и пучка свинца, рис. 31. Показано, что при быстротях $\eta_{lab} < 6$ множественность, полученная на фиксированных мишенях, меньше, чем полученная на коллайдере. Такие процессы могут быть измерены на установке ALICE. Ожидается также большой выход чармония в эксперименте с фиксированной мишенью.

1.5. ЭКСПЕРИМЕНТ DSS. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ, НЕНУКЛОННЫХ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ В ЯДРАХ И ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ПРОТОНОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ЯДРАМИ.

Проведена калибровка сцинтилляционных детекторов пробного телескопа для измерений на пучке Нуклотрона ОИЯИ по поиску тонкой структуры в сечении рождения пионов на энергии 300 - 400 МэВ на нуклон, где ранее были получены указания на наличие резонансно подобной зависимости от энергии столкновения. Измерения интенсивности пучка с помощью установленной на Нуклотроне системой Bergoz с небольшим шагом 1-2 МэВ показало согласие с ранними измерениями с использованием мониторных счетчиков. Новые физические измерения запланированы на 2018 г., когда будут ускорены дейтроны.

1.6. ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образование вторичных ядер на БАК в результате электромагнитной диссоциации ядер пучка.

Выполнено моделирование образования вторичных ядер в результате электромагнитных взаимодействий ядер свинца ^{208}Pb на БАК. Модель RELDIS (Relativistic Electromagnetic DIssociation), разработанная в ИЯИ РАН в сотрудничестве с другими институтами, описывает одиночную и взаимную электромагнитную диссоциацию ядер в ультрапериферических столкновениях, включая многофотонные процессы. На рис.32 представлены результаты вычислений одиночной электромагнитной диссоциации ядер ^{208}Pb с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ.

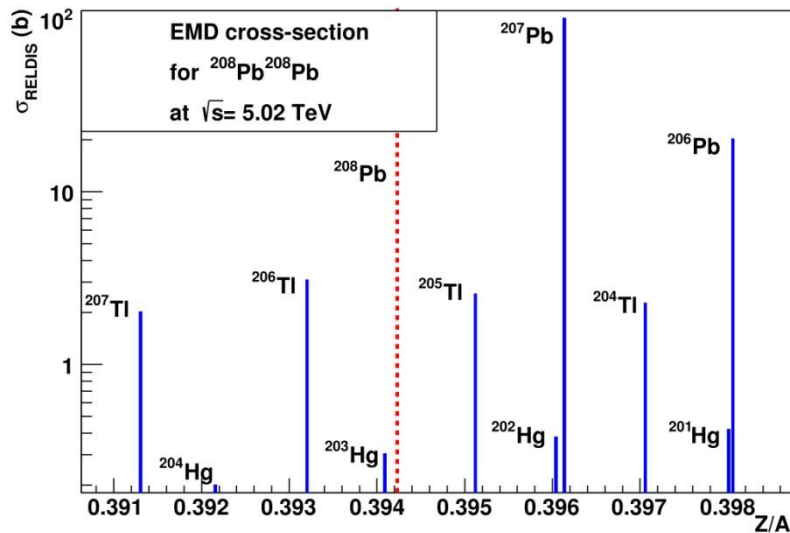


Рисунок 32. Сечения образования вторичных ядер с определенным отношением заряда к массе, предсказываемые моделью RELDIS [3] для столкновений ^{208}Pb на БАК с энергией $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ ТэВ}$. Пунктирной линией обозначено значение Z/A , соответствующее начальному пучку ^{208}Pb .

Полученные результаты позволяют определить наиболее критичные для работы БАК вторичные ядра с наиболее близкими к ядрам пучка отношениями заряда к массе и относительно большими сечениями их образования. К таковым следует отнести прежде всего ^{206}Tl , ^{205}Tl и ^{203}Hg . Такие вторичные ядра движутся в магнитном поле БАК вблизи ядер пучка и могут проникать через системы коллиматоров коллайдера и нагревать сверхпроводящие магниты. В следующем 2018 году планируется завершить анализ данных эксперимента ALICE, собранных с калориметров нулевого угла. Это позволит определить количество нуклонов, испущенных в результате ЭД, и, соответственно, состав вторичных ядер. Экспериментальные данные будут сопоставлены с предсказаниями модели RELDIS.

Сравнение поперечных профилей пучков различных ядер для их применения в тяжелоионной терапии онкологических заболеваний.

Известно, что относительная биологическая эффективность (ОБЭ) ускоренных ядер меняется в процессе их распространения в тканях пациента. Такие изменения вызваны не только увеличением линейной передачи энергии (ЛПЭ) частиц пучка с ростом глубины проникновения в направлении пика Брэгга, но и ядерными реакциями, индуцированными ядрами пучка, и приводящими к образованию различных вторичных частиц. Изменения ОБЭ вдоль оси пучка изучены достаточно хорошо, однако её эволюции в поперечном направлении,

перпендикулярном оси пучка, не уделялось должного внимания в научной литературе. Чтобы заполнить этот пробел, было выполнено моделирование методом Монте-Карло на основе библиотеки Geant4 терапевтических полей протонов и ядер ^4He , ^{12}C и ^{16}O диаметром 20 мм. Для описания биологического воздействия ионов использовалась модифицированная микродозиметрическая кинетическая модель. В работе исследованы распределения средней взвешенной с дозой ЛПЭ, ОБЭ и биологической дозы по глубине и радиусу. Найдено, что поле ^4He имеет малое поперечное уширение по сравнению с полем протонов, и оно характеризуется умеренным поперечным изменением ОБЭ, что делает возможным использование фиксированных значений ОБЭ в каждом поперечном профиле поперечного сечения поля на заданной глубине. Снижение неопределенностей ОБЭ на границе поля ^4He может дать преимущества в случае расположения особо чувствительного к радиации органа вблизи (в боковом направлении) к области, на которую направлено облучение. Обнаружено, что боковые распределения ОБЭ, рассчитанные для полей ^{12}C и ^{16}O , демонстрируют быстрые изменения в радиальном направлении из-за изменений дозы и состава вторичных фрагментов в полутени поля облучения. Тем не менее, поля излучения всех четырех ионов на радиусах превышающих 20 мм могут быть охарактеризованы общим значением RBE, определяемым радиочувствительностью ткани. Полученные результаты могут помочь, в частности, в оценке поперечной неоднородности полей излучения ионов, используемых в экспериментальных исследованиях *in vitro*.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ В АДРОН-ЯДЕРНЫХ И ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НА УСКОРИТЕЛЕ SPS В ЦЕРН (ЭКСПЕРИМЕНТ NA61)

Научный руководитель к.ф.-м.н. Губер Ф.Ф.

Экспериментальная установка NA61/SHINE.

Экспериментальная установка NA61/SHINE [4] (рис. 1.1) располагается на канале транспортировки пучка H², который может формировать и транспортировать вторичные пучки протонов и пионов на мишень установки NA61 в диапазоне импульсов от 13 ГэВ/с до максимального импульса ускорителя 400 ГэВ/с, а также пучки фрагментов ядер. Канал может транспортировать также первичные пучки ядер Ar, Xe и Pb, ускоренные на SPS.

Эксперимент NA61/SHINE является единственным оставшимся экспериментом на SPS в ЦЕРН, который имеет утвержденную в ЦЕРН программу по исследованиям ядро-ядерных взаимодействий при импульсах 13-150 ГэВ/с на нуклон. Эта установка была существенно модернизирована по сравнению с установкой предыдущего эксперимента NA49 [5]. На вставке рис. 33 показано расположение пучковых детекторов, расположенных в области мишени, которые используются для формирования триггера, стартового сигнала для время-пролетной системы и контроля положения пучка на мишени.

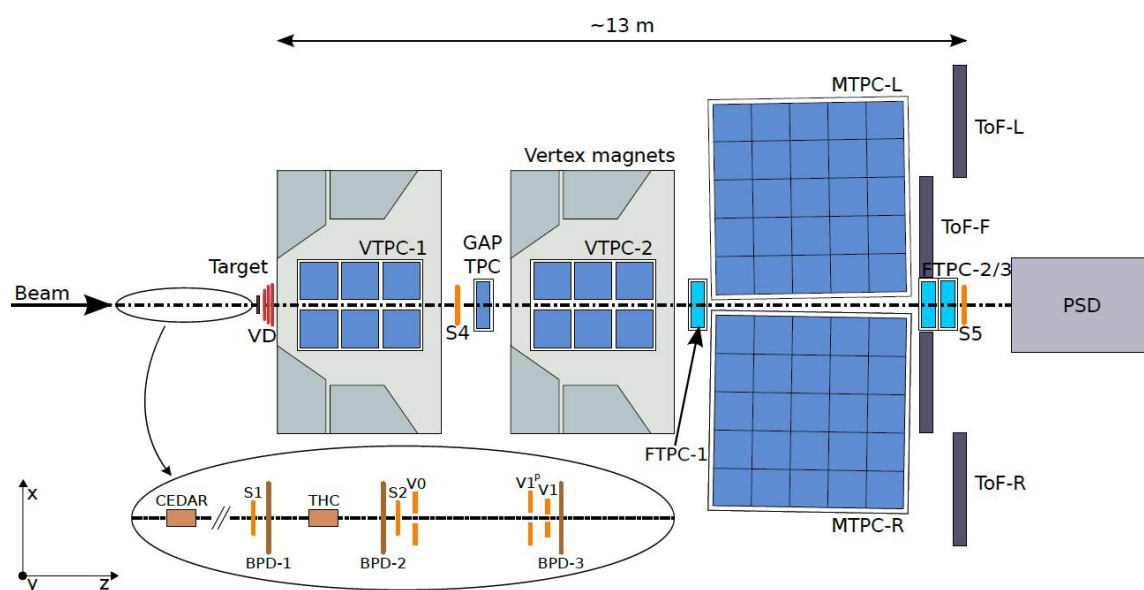


Рисунок 33. Схема экспериментальной установки NA61/SHINE с новым вершинным детектором VD [16] (вид сверху, см. текст).

Основные детекторные системы установки NA61/SHINE использующиеся для идентификации и измерения импульсов вторичных заряженных частиц— время-проекционные камеры, магниты и время-пролетные годоскопы TOF-L и TOF-R, ранее использовались в

NA49 и подробно описаны в работе [5]. В процессе модернизации экспериментальной установки было добавлено несколько детекторных систем, в частности, создан новый передний сцинтилляционный время-пролетный годоскоп – TOF-F, изготовлены два специальных радиационно прозрачных двухконтурных гелиевых ионопровода, которые были установлены по оси пучка внутри VTPC-1 и VTPC-2 установки NA61/SHINE, что позволило примерно в 10 раз уменьшить загрузку трековых детекторов экспериментальной установки от дельта-электронов, возникающих при взаимодействии ядер пучка с воздухом и существенно расширить аксептанс установки. В NA61/SHINE была модернизирована электроника считывания с время-проекционных камер, что позволило увеличить скорость считывания до 70 - 80 событий в секунду, что почти на порядок превышает скорость считывания в эксперименте NA49. Недавно был создан вершинный детектор (VD, рис.1.1) с ограниченным аксептансом SAVD [6]. Он впервые был использован в эксперименте в декабре 2016 года. Этот детектор позволяет очень точно (~ 5 мкм) реконструировать вторичные вершины редких распадов мезонов, обладающих открытым чармом (open charm).

Для отбора событий по центральности взаимодействия на триггерном уровне и для определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер в эксперименте NA61/SHINE, группой ИЯИ была разработана концепция нового перелного адронного калориметра. Все работы по его моделированию, изготовлению модулей калориметра, разработке и изготовлению электроники, систем контроля калориметра были полностью выполнены силами ИЯИ РАН [7-9]. Этот калориметр измеряет энергию спектаторов с хорошим энергетическим разрешением и используется в эксперименте для отбора событий по центральности взаимодействия на триггерном уровне. Кроме того, поперечная сегментация калориметра позволяет использовать его для определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер. С 2011г. этот адронный калориметр был использован в экспериментах Be+Be, Ar+Sc, Pb+Pb, p+A. В 2017г. этот калориметр использовался в эксперименте Xe+La и в p+A экспериментах.

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

- достаточно большой аксептанс $\sim 50\%$;
- высокое разрешение по импульсу $\sigma(p)/p^2 \approx 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$ (при $B=9 \text{ Т} \cdot \text{м}$);
- разрешение по времени пролета для ToF-L/R: $\sigma(t) \approx 60 \text{ ps}$; для ToF-F: $\sigma(t) \approx 110 \text{ ps}$;
- хорошую идентификацию по ионизационным потерям:
 $\sigma(dE/dx)/\langle dE/dx \rangle \approx 0.04$; $\sigma(m_{\text{inv}}) \approx 5 \text{ MeV}$;
- высокую эффективность детектирования заряженных частиц: $> 95\%$;

- скорость считывания событий ~ 70 событий/сек.

Передний адронный калориметр фрагментов установки NA61/SHINE

Передний адронный калориметр используется в проводимых экспериментах NA61 для определения центральности ядро-ядерных взаимодействий на триггерном уровне, и используется при анализе экспериментальных данных для разбиения событий по определенным классам центральности и пособытийного определения ориентации плоскости реакции с хорошей точностью, что необходимо для проведения исследований анизотропии азимутальных потоков частиц, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях.

Схема калориметра показана на рис. 34, слева. Калориметр состоит из 44 модулей и имеет поперечные размеры 120×120 см². Центральная часть калориметра состоит из 16 маленьких модулей с поперечным размером 10×10 см². Внешняя часть калориметра состоит из 28 больших модулей с поперечными размерами 20×20 см². Такая поперечная сегментация уменьшает загрузку отдельных центральных модулей и является наиболее оптимальной для обеспечения отбора событий по центральности взаимодействий и для реконструкции плоскости реакции. Полная продольная длина каждого модуля составляет 5.7 ядерных длин.

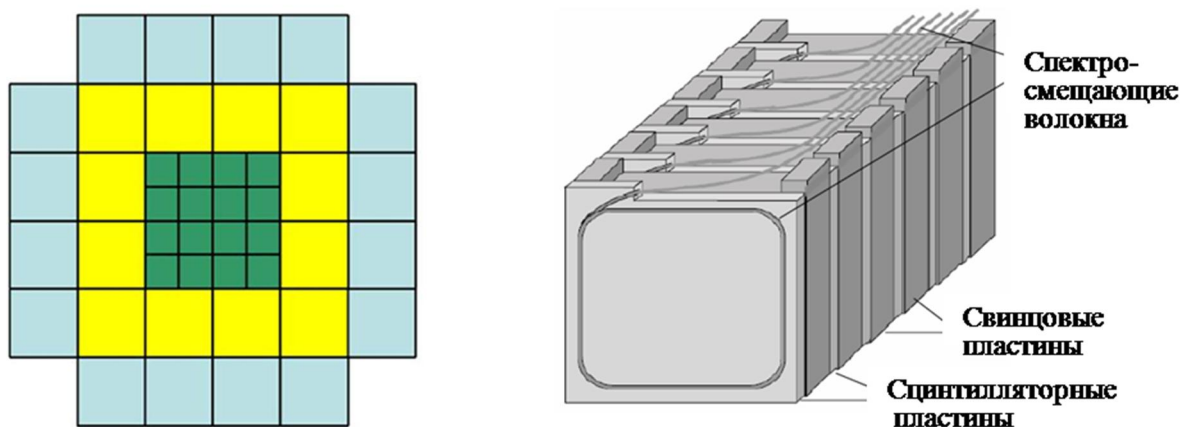


Рисунок 34. Схема переднего адронного калориметра эксперимента NA61/SHINE (слева) и схема конструкции отдельного модуля (справа).

Центральные и внешние модули имеют одинаковую сегментированную продольную структуру. Каждый модуль собран из 60 чередующихся слоев свинца и сцинтилляционных пластин, рис.34, справа. Толщина каждой свинцовой пластины составляет 16 мм, а толщина сцинтилляционной пластины - 4 мм. При таком соотношении толщин свинца и сцинтиллятора (4:1) выполняется условие так называемой компенсации [12, 13], при котором вклад электромагнитной компоненты адронного ливня равен вкладу адронной компоненты ливня. Свет от прохождения заряженных частиц через сцинтилляционные пластины собирается,

передается и группируется переизлучающими оптоволоками на 10 фотодетекторов, установленных в конце каждого модуля. Таким образом обеспечивается продольная сегментация модуля на 10 секций, что обеспечивает равномерную эффективность собирания света по длине модуля.

Фотография переднего адронного калориметра, используемого в экспериментах NA61 в 2017г. представлена на рис. 35.

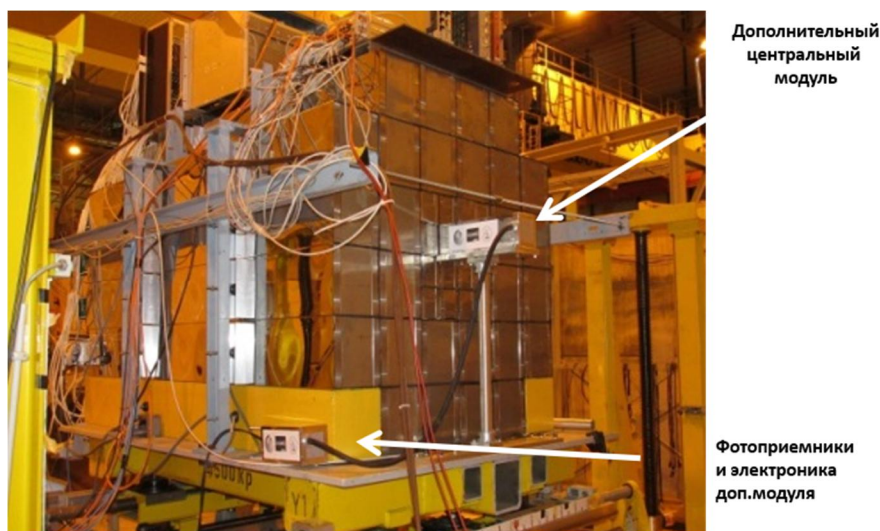


Рисунок 35. Фотография переднего адронного калориметра установки NA61, используемого в экспериментах 2017г.

На переднем плане виден небольшой дополнительный модуль калориметра, который имеет поперечные размеры $10 \times 10 \text{ см}^2$ и такую же структуру, как и основные модули калориметра. Но, в отличие от модулей основного калориметра, длина короткого модуля составляет всего около 1.2 ядерных длин. Использование этого дополнительного модуля позволяет существенно уменьшить утечки энергии адронного ливня через заднюю поверхность калориметра при энергиях налетающих ядер больше 60 ГэВ на нуклон и, тем самым, улучшить отклик калориметра при этих энергиях.

Для считывания света в каждом модуле используются 10 лавинных фотодетекторов. На период разработки и создания данного калориметра (2006 – 2011г.г.) существовал единственный доступный тип фотодиода - MAPD-3A, производства Zecotek Photonics Inc (Сингапур), который удовлетворял требованиям, предъявляемым к фотодетекторам калориметра. Данный тип фотодиодов имеет высокую плотность пикселей, порядка 15000 на квадратный миллиметр, или порядка 135000 пикселей для фотодиода с чувствительной областью $3 \times 3 \text{ мм}^2$. Однако, фотодиоды MAPD-3A время восстановления пикселей достигает десятков микросекунд и для обеспечения необходимого динамического диапазона при

переходе к экспериментам с тяжелыми ядрами возникла необходимость их замены на более быстрые фотодетекторы.

В 2016г. фотодиоды в 16 центральных модулях были заменены группой на новые MPPC S12572-010C/P производства Hamamatsu. Размер пикселей этих фотодиодов составляет 10×10 мкм² и они имеют время восстановления порядка 10 наносекунд. Это позволило увеличить динамический диапазон за счет того, что пиксели успевают перезаряжаться несколько раз в течение импульса света от спектросмещающего оптоволоконка длиной порядка 50-60 нс. Отклик модуля в зависимости от интенсивности пучка был проверен на пучке протонов с энергией 150 ГэВ и интенсивностью до 160 кГц. Результаты теста представлены на рис. 1.4 слева. На рис. 36, справа, показана аналогичная зависимость для пучка ионов свинца. Видно, что выбранные MPPC обеспечивают возможность стабильной работы при интенсивностях пучка ионов свинца вплоть до 100 kHz.

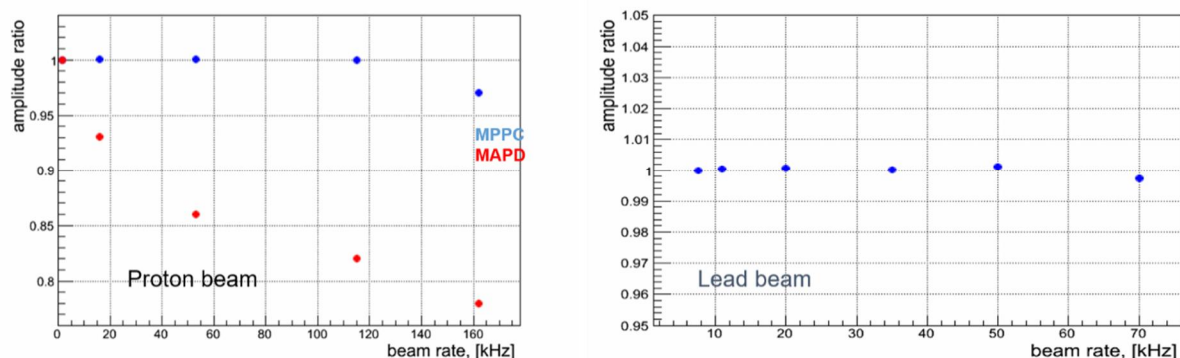


Рисунок 36. Слева - зависимость относительной амплитуды сигнала с фотодиода от интенсивности протонного пучка. Красные точки – для фотодиода MAPD-3A, синие точки – для фотодиода S12572-010C/P. Справа - зависимость относительной амплитуды сигнала с фотодиода от интенсивности пучка ионов свинца.

Вся аналоговая и считывающая электроника, а также система температурной стабилизации и управления калориметром была разработана и изготовлена в ИЯИ РАН.

Модернизация считывающей электроники адронного калориметра в 2017г.

Предыдущий опыт эксплуатации системы сбора данных показал, что в случае сбоев в системе обеспечения питания модуля АЦП и FPGA наблюдаются проблемы в считанных временных диаграммах модулей калориметра. Исследование причины возникновения сбоев в работе FPGA показало, что проблема вызвана чрезмерной нагрузкой по току шины питания +6В, которое подается по контакту штырькового разъема. Со временем контакт окисляется и теряет проводимость. Из-за этого переключение питания модуля или долгая работа под нагрузкой вызывает случайные сбои в системе двуполярного питания АЦП и FPGA. Для решения данной проблемы в 2017 году силами группы ИЯИ РАН была проведена работа по

замене контактов на более надежные разъемы MOLEX, широко применяющиеся в системах питания персональных компьютеров, жестких дисков и оптических приводов. Разъем MOLEX имеет цилиндрический тип контакта с надежной рабочей поверхностью. Все 45 модулей адронного калориметра были переоборудованы, а соответствующие кабели питания системы считывающей электроники были также модернизированы и снабжены новыми разъемами. В результате тестов, прошедших на калибровочном сеансе в июне 2017 г. и физических сеансах на пучках протонов и ионов ксенона сеансах 2017г. ни одного сбоя в системе считывания замечено не было. Один из модулей с переоборудованным типом разъема показан на рис.37.

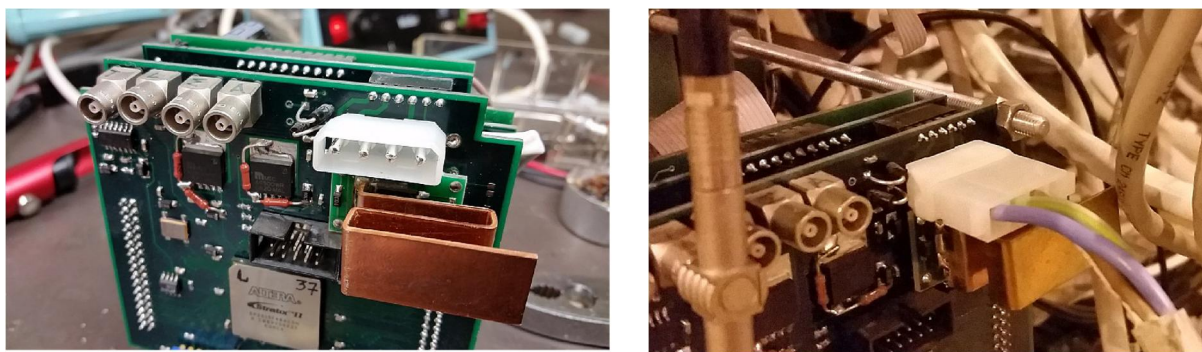


Рисунок 37. Внешний вид модуля считывающей электроники АЦП и FPGA, оборудованный разъемом MOLEX (слева) и фото модуля, установленного на калориметре (справа).

Калибровка переднего адронного калориметра в 2017г.

В июне 2017 г. группой ИЯИ РАН был проведен тестовый сеанс на пучках протонов и мюонов ускорителя SPS (ЦЕРН) для калибровки модулей калориметра, оценки энергетического разрешения и линейности отклика переднего адронного калориметра и подготовки его к летнему физическому сеансу $p+Pb$ и осеннему физическому сеансу $Xe+La$. В эксперименте NA61/SHINE в 2017 г. выходы заряженных частиц измеряются в реакции $Xe+La$ в диапазоне энергий от 13 до 150 ГэВ/нуклон, что требует от калориметра очень точной калибровки и хорошего динамического диапазона регистрируемых сигналов с его секций. Для увеличения динамического диапазона было принято решение снизить усиление фотодиодов 16 центральных модулей калориметра с тем, чтобы обеспечить регистрацию адронных ливней без угрозы переполнения системы оцифровки АЦП. Основываясь на предыдущем опыте работы при измерениях реакции $Pb+Pb$ при импульсах налетающих ядер свинца 13, 30 и 150 ГэВ/с было решено выполнить калибровку всех модулей на тестовых пучках при номинальных напряжениях на фотодиодах, а 16 центральных модулей откалибровать также и при напряжениях на 0.8В ниже номинала. Внешние модули калибровались на номинальных

напряжениях питания для того, чтобы иметь полный диапазон чувствительности калориметра к отдельным адронам и легким фрагментам, которые отклоняются магнитным полем эксперимента NA61/SHINE на большие углы относительно оси пучка.

Каждый модуль калориметра калибровался на пучке мюонов с импульсом 80 GeV/c, и в каждой секции измерялась выделенная энергия от мюонов. На втором этапе калибровки исследовался отклик всего калориметра при облучении протонами с импульсом 80 GeV/c каждого модуля калориметра. После того, как энергетическая калибровка была закончена, был проведен анализ отклика калориметра на пучках протонов в диапазоне импульсов от 20 ГэВ/с до 158 ГэВ/с.

Полученные результаты исследования отклика калориметра - линейности и энергетического разрешения всего калориметра показаны на рис. 38. Фитирование энергетического разрешения проводилось по формуле:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2}$$

где a , b и c - стохастический, постоянный и шумовой члены, соответственно.

Видно, что стохастический член находится составляет порядка 65%, что является типичным значением для сегментированных адронных калориметров данного типа.

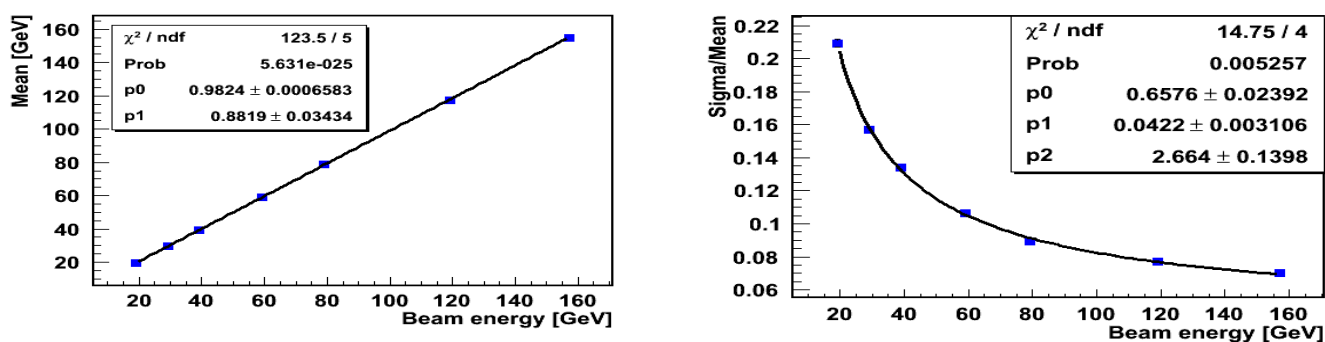


Рисунок 38. Слева – линейность, справа - энергетического разрешения всего калориметра.

Экспертное обслуживание и мониторинг работы переднего адронного калориметра на физических сеансах NA61 2017 года.

В физическую программу эксперимента NA61/SHINE в 2017г. входили эксперименты с исследованием реакций $p+Pb$ с импульсом протонов 30 ГэВ/с, и $Xe+La$ с энергиями ионов ксенона 13, 19, 30, 40, 75 и 150 ГэВ/нуклон. Также была проведена серия измерений выходов

пионов и каонов реакциях взаимодействия протонов и пионов с импульсами в диапазоне от 30 до 120 ГэВ/с с ядрами бериллия, углерода и алюминия, которые необходимы для нейтринных экспериментов в Фермилабе.

В течение сеанса для каждой энергии налетающих ядер ксенона необходимо было настраивать триггер отбора событий по центральности взаимодействия. Для этого была использована система выработки триггерного сигнала, основанная на сигналах от нескольких сцинтилляционных пучковых счетчиках, а также специального сигнала, вырабатываемого аналоговой электроникой системы считывания PSD. Для этого использовались выходы аналоговых сумматоров центральных модулей калориметра PSD. Для формирования триггерного решения по центральности использовались суммы сигналов всех 16-ти малых модулей калориметра и центрального короткого модуля. Сигнал с короткого модуля суммировался с большим весом, чем остальные модули, поскольку усиление его фотодиодов было уменьшено примерно в 3 раза. Это обусловлено тем, что ионы ксенона выделяют огромное количество энергии (порядка 30%) именно в двух первых секциях короткого модуля. Далее, подстраивая порог дискриминатора, можно было выбирать нужные события по центральности. Для определения величины порога было проведено сканирование по его величине и зависимость относительной разности счета триггера со взаимодействием при наличии мишени и без нее. Доля этой разности по отношению к расчетной вероятности взаимодействия в мишени и дает искомую оценку отбора по центральности.

Пример двумерного распределения для сеанса Xe+La (75ГэВ/с) приведен на рис. 1.7, где по оси X показана энергия, измеренная калориметром, а по оси Y - количество зарегистрированных треков с хорошо восстановленной вершиной во время-проекционных камерах (TPC).

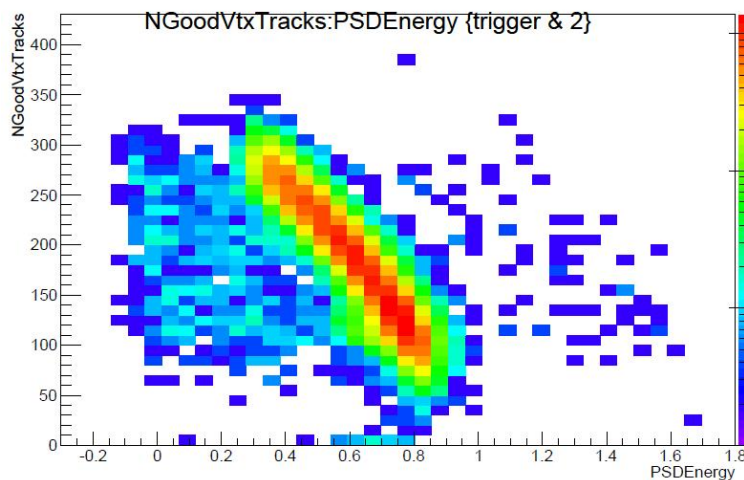


Рисунок 39. Двумерное распределение количества восстановленных треков в зависимости от энергии в калориметре (нормализованного к энергии пучка) для сеанса Xe+La (75 ГэВ/с).

Видно, что события располагаются на линии, которая при фитировании пересекает ось X в районе 1, что говорит о хорошей калибровке калориметра.

Для того, чтобы следить за работой всех систем детекторных систем во время экспериментов NA61/SHINE, была разработана общая система контроля набора данных и система мониторинга систем сбора данных и систем контроля параметров всех детекторов. Для отслеживания правильности работы системы считывания калориметра в 2017г. в ИЯИ РАН была создана и успешно эксплуатируется программа быстрой реконструкции ("на лету") события в калориметре и отображения данных на экране общей системы мониторинга, установленном в комнате операторов эксперимента NA61/SHINE.

На рис. 40 показаны примеры результатов работы программ мониторинга работа калориметра для сеанса Xe+La при итпущесе ионов Xe 150 ГэВ/с. На рис. 41 представлена общая картина события в детекторах NA61/SHINE, как она видна на большом экране мониторинга в комнате операторов. Здесь показана проекция вида сверху на секции и модули адронного калориметра. Яркостью цвета показана энергия, выделившаяся в разных секциях калориметра.

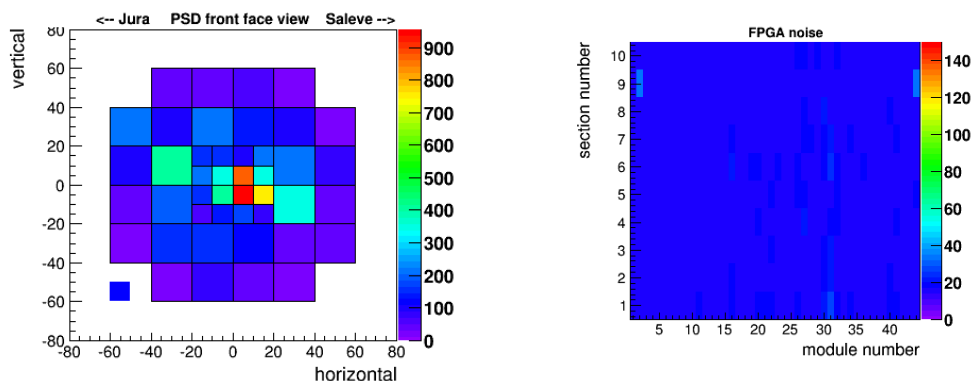


Рисунок 40. Система мониторинга работы калориметра. Для одного события Xe+La (150 ГэВ/с): слева - энергосодержание в модулях (сумма по секциям), справа - спектр для проверки искажений временных диаграмм АЦП и FPGA секций калориметра.

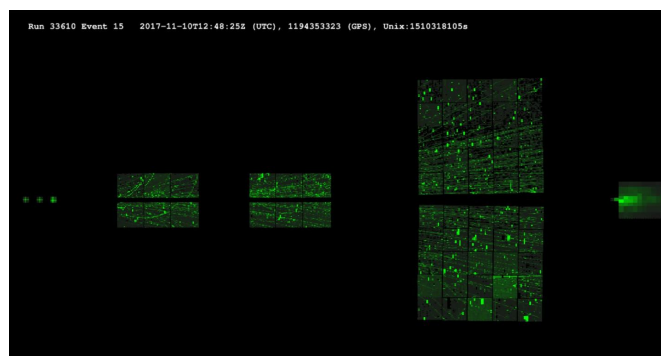


Рисунок 41. Общий вид одного события Xe+La (150ГэВ/нуклон) в системе мониторинга работы систем NA61/SHINE. Слева направо: трековые камеры (BPD1, BPD2, BPD3), вершинные время-проекционные камеры (VTPC-1, VTPC2), главные время-проекционные камеры (MTPC-L, MTPC-R), передний адронный калориметр (PSD).

Статус анализа анизотропии коллективных потоков по экспериментальным данным, полученных в эксперименте.

В 2017г. группой ИЯИ совместно с МИФИ были разработаны новые процедуры определения центральности в Pb+Pb столкновениях используя корреляцию между энергосодержанием в центральных модулях PSD и множественностью в TPC. С помощью Монте-Карло версии модели Глаубера были определены геометрические параметры для каждого класса по центральности, что позволяет сравнить новые данные полученные в анализе Pb+Pb столкновений с моделями и данными других экспериментов.

Для Pb+Pb данных, полученных в 2016г., исследовались эффекты неидеального акцептанта и эффективности детекторов на измеренные величины коллективных потоков, различные методы определения разрешения угла плоскости реакции. Написан интерфейс для

QnCorrections фреймворк (ALICE, CBM), который позволяет скорректировать измерения коллективных потоков на эффекты неидеального акцептанта и эффективности детектора.

Анизотропия коллективных потоков, проявляющая себя в анизотропии испускания частиц в плоскости, поперечной направлению пучка, являются одним из важных наблюдаемых чувствительных к уравнению состояния сильновзаимодействующей ядерной материи, образующейся при столкновении ядер. Первые экспериментальные данные для исследования коллективных потоков в столкновениях ядер свинца были получены при импульсе налетающих ядер свинца 30, 40 и 150 АГэВ/с в 2016 г. В 2018г. планируется провести измерения при импульсах пучка ядер свинца 75 и 150 АГэВ/с. Эти данные позволят впервые детально изучить зависимость прямых потоков протонов и пионов от центральности столкновений. На рис. 42 показаны предварительные результаты анализа для прямого потока заряженных пионов, вычисленных для 400k выбранных Pb+Pb столкновений при 30А ГэВ/с и использованием PSD для определения плоскости события.

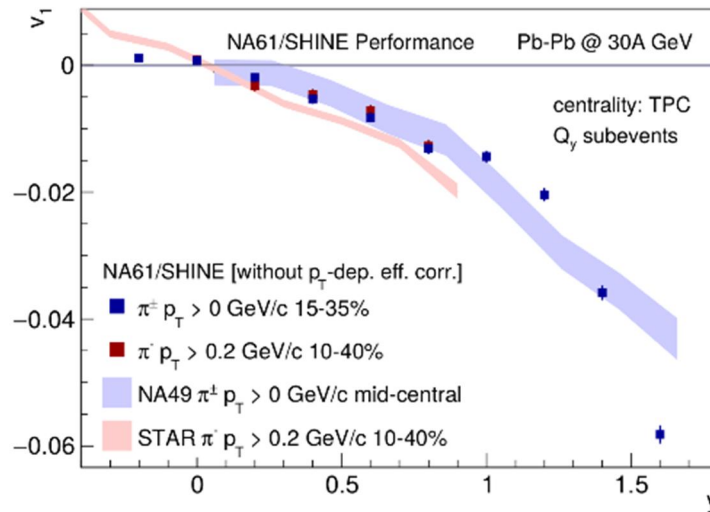


Рисунок 42. Зависимость прямого потока заряженных пионов для 15-35% (синий) и 10-40% (красный) классов центральности в сравнении с другим экспериментами.

Видно, что с использованием новых данных NA61/SHINE по столкновениям Pb+Pb, полученным в ноябре 2016 и планируемым в 2018 году открывается возможность расширить измерения потоков как функцию центральности в диапазоне энергий пучка 13 – 158 ГэВ на нуклон в область больших передних быстрот по сравнению с результатами RHIC (например, результаты STAR [78]) и позволит впервые детально изучить зависимость прямых потоков протонов и пионов от центральности столкновений и от налетающей энергии ядер свинца.

Разработка проекта модернизация переднего адронного калориметра PSD для экспериментов на установке NA61/SHINE в период после 2020 года.

В настоящее время коллаборацией NA61/SHINE готовится новая физическая программа экспериментов на период после 2020 года, которая включает в себя исследования рождения частиц с открытым чармом (D-мезонов) в столкновениях Pb + Pb в зависимости от энергии налетающих ядер свинца в диапазоне энергий до 150 АГэВ, исследования рождения, исследования рождения фрагментов в ядерных столкновениях, необходимые для интерпретации данных, полученных в эксперименте AMS. Будет расширена программа измерений сечений в адрон-ядерных взаимодействиях для нейтринной физики. Для проведения всех этих экспериментов интенсивность пучка и скорость набора данных должны быть увеличены на порядок. Для этого потребуется создание новых и модернизация практически всех существующих детекторных систем NA61.

В NA61/SHINE коллаборации уже ведутся работы по модернизации ряда детекторных систем установки. В частности, создается новый большой вершинный детектор, модернизируется электроника детекторов TPC, ведутся работы по тестированию нового время-пролетного детектора на основе резистивных камер, разрабатывается проект модернизации переднего адронного калориметра.

В 2017г. ИЯИ РАН начал разработку проекта по модернизации переднего адронного калориметра. Существующий калориметр не имеет отверстия для пучка в центре. Благодаря этому, выделенная в нем энергия является монотонной функцией центральности столкновений тяжелых ионов, и его можно использовать для определения центральности столкновений без привлечения информации с других детекторов. Однако, при повышении средней интенсивности пучка ионов свинца до 5×10^4 ионов в секунду, использование такого калориметра без отверстия в центре для пропускания ионов пучка приведет к чрезмерной суммарной дозе облучения сцинтилляционных пластин в центральных модулях калориметра. Это видно из расчетов по FLUKA (расчеты выполнены в кооперации с А.Зенгер из ГСИ), рис 1.11, слева. Здесь показано распределение по суммарной дозе облучения вдоль калориметра для интенсивности пучка 5×10^4 ионов свинца в секунду с энергией 13 и 150 АГэВ. Можно видеть, что накопленная в течение одного месяца радиационная доза облучения значительно превышает 10^3 Gy для центральных модулей существующего PSD. Известно, что при таких дозах облучения прозрачность сцинтилляционных пластин значительно ухудшится, что приведет, в итоге, к деградации отклика адронного калориметра. Кроме того, суммарная плотность потока нейтронов в плоскости расположения фотодетекторов в конце центральных модулей составит порядка 10^{12} н/см², рис. 43, справа.

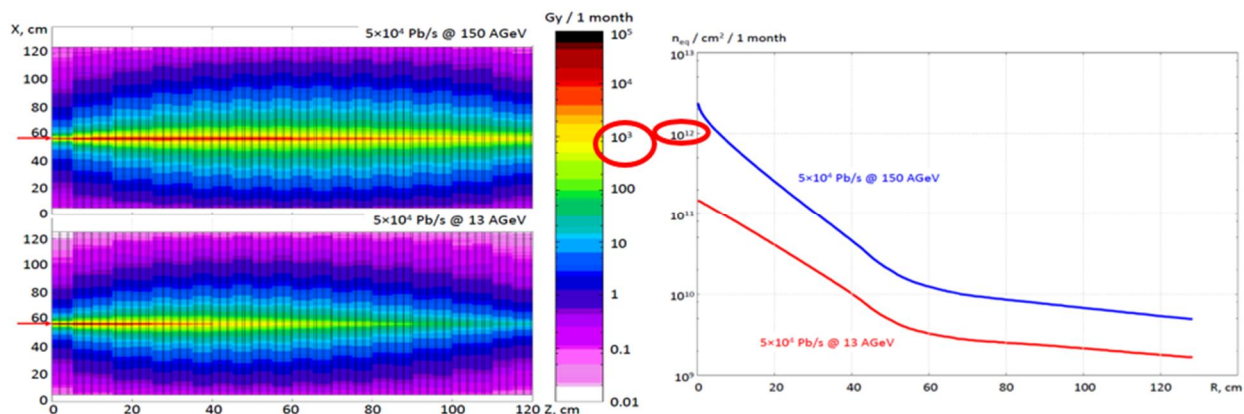


Рисунок 43. Распределение дозы радиации вдоль PSD для пучка ионов Pb 150 AGeV и 13 AGeV(слева) и плотность потока нейтронов как функция расстояния от оси пучка в плоскости расположения фотодетекторов PSD на задней поверхности калориметра для тех же энергий пучка (справа).

Это приведет к ухудшению параметров (увеличение темного тока, снижение коэффициента усиления и т.д.) фотодетекторов MPPC, расположенных на задней поверхности калориметра. В сеансе 2017г., при кратковременном увеличении интенсивности пучка ионов ксенона уже наблюдались периодические отказы в работе микроконтроллеров системы слежения за параметрами калориметра (slowControl), а также микроконтроллеров систем контроля температуры (tempControl) при энергии пучка ядер ксенона 150 ГэВ/нуклон. На сеансах с пучками протонов летом и осенью 2017г. отказов микроконтроллеров не наблюдалось. Это позволяет сделать вывод, что нейтронный фон вблизи расположения аналоговой и считывающей электроники калориметра (в задней части модулей калориметра), где установлены микроконтроллеры, оказывается высоким и приводит к потере работоспособности сложной электроники на пучках тяжелых ионов с большой энергией, особенно на высоких интенсивностях таких ионов. Таким образом, проблемы, касающиеся радиационной стойкости, приведут к ухудшению энергетического разрешения и надежности работы калориметра в сеансах измерений.

Еще одна проблема имеющегося PSD заключается в том, что в настоящее время только 16 центральных модулей с поперечным сечением $10 \times 10 \text{ см}^2$ используют быстрые фотодетекторы Hamamatsu MPPC, в то время как более старые фотодиоды MAPD-3A с медленным временем восстановления пикселя используются в остальных 28 больших модулях с поперечным сечением $20 \times 20 \text{ см}^2$. Такие медленные фотодиоды и считывающая электроника не подходят для работы калориметра при более высокой интенсивности пучка в эксперименте NA61 в период после 2020 года. В процессе модернизации калориметра будет необходимо заменить фотодиоды MAPD-3A в больших модулях на более быстрые MPPC.

И, наконец, увеличение интенсивности пучка свинца более чем на один порядок приведет к превышению допустимого радиационного уровня в зоне расположения калориметра на установке NA61, поскольку текущий PSD работает фактически как ловушка пучка. Поэтому необходима дополнительная бетонная защита вокруг PSD, что для настоящего калориметра невозможно, поскольку положение PSD в процессе физических сеансов меняется в зависимости от энергии пучка, и для этого используется подвижная платформа с большими поперечными размерами.

Для решения упомянутых выше проблем вместо существующего PSD предлагается использовать два калориметра PSD1 и PSD2 (рис.44). PSD1 -это модернизированный существующий PSD, в котором 16 центральных модулей предлагается заменить четырьмя новыми центральными модулями с поперечными размерами 20×20 см². Один из боковых торцов этих модулей имеет усеченную форму что позволит иметь отверстие в центре PSD1 размером 60 мм. В качестве таких модулей предполагается использовать модули калориметра, изготовленные для эксперимента CBM на ускорительном комплексе ФАИР. Эти модули имеют в конце, перед плоскостью фотодиодов, полиэтиленовые блоки борированного полиэтилена толщиной 8 см, что позволит уменьшить плотность нейтронного потока, попадающего на MPPC.

PSD2 представляет собой дополнительный небольшой калориметр, размещенный на расстоянии 2 м позади PSD1 (рис.44) и состоящий из 9 модулей с поперечными размерами 20×20 см². Все модули PSD2 имеют длину $5,6 \lambda_{\text{int}}$ (ту же длину взаимодействия, что и модули PSD1), за исключением центрального модуля длиной $7,8 \lambda_{\text{int}}$. В каждом из этих модулей также установлены блоки из борированного полиэтилена.

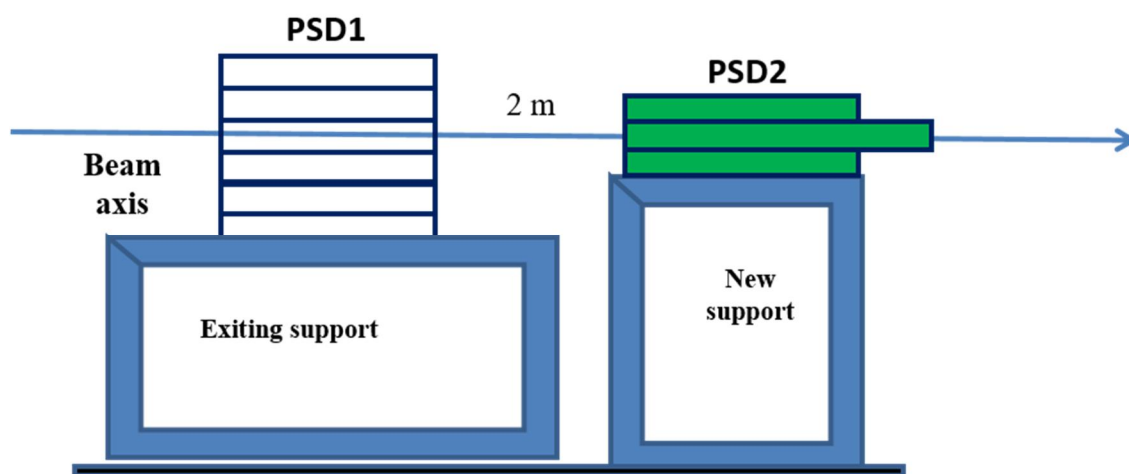


Рисунок 44. Схематический вид спереди калориметров PSD1 и PSD2 и 3D-вид калориметра PSD2 (вверху) и расположение калориметров на пучке (внизу).

Расчеты радиационной дозы, промоделированное с помощью программы FLUKA, для калориметров PSD1 и PSD2 для Pb+Pb столкновений при энергии ионов свинца 150 AGeV, показали, что для PSD1 доза облучения и плотность нейтронного потока находятся на приемлемом уровне даже в центральных модулях. Как и ожидалось, доза радиации в центральном модуле калориметра PSD2 достаточно велика, что приведет к потере прозрачности сцинтилляционных пластин. Но благодаря тому, что в PSD2 будут измеряться в основном тяжелые фрагменты, ослабление света может быть компенсировано увеличением напряжения смещения MPPC. Максимальная плотность потока нейтронов для MPPC в PSD2 достигает 10^{11} нейтронов/см².

Во время тестового сеанса в июне 2017 г. группа ИЯИ РАН провела исследование отклика модуля калориметра PSD на установке NA61 в ЦЕРНе с использованием в качестве фотодетекторов микропиксельных лавинных фотодиодов, предварительно облученных нейтронами [14]. Облучение нескольких партий фотодиодов (по 5 фотодиодов в каждой партии) различными суммарными потоками нейтронов было выполнено на пучке циклотрона ядерного исследовательского института (Rez, Чехия). Всего было облучено 4 партии по 5 фотодиодов Hamamatsu S12572-010P суммарными потоками нейтронов 4×10^{10} , 4×10^{11} , 1×10^{12} и 3×10^{12} нейтронов/см², соответственно.

Измерения энергетического разрешения одного модуля калориметра с этими фотодиодами были проведены группой ИЯИ на пучке протонов на адронном калориметре установки NA61 в диапазоне энергий протонов 20 – 80 ГэВ. Необлученные MPPC в первых пяти секциях одного модуля адронного калориметра были заменены на облученные фотодиоды с ячейкой 10 мкм (S12572-010P) производства Hamamatsu. MPPC работали при перенапряжениях около 2 В и при постоянной температуре 20 °С. Полученное энергетическое разрешение для первых пяти секций модуля показано на рис. 45 для облученных фотодиодов с различными суммарными потоками нейтронов в сравнении с необлученными фотодиодами. При этом, отбирались только события, в которых адронный ливень начинался уже в первой секции калориметра. Видно, что при энергии протонов 80 ГэВ практически нет разницы в разрешении пяти-секционного калориметра с необлученными и облученными диодами с суммарным потоком нейтронов вплоть до 4×10^{11} нейтронов/см². Для фотодиодов, облученных более высокими потоками нейтронов, наблюдается заметное ухудшение энергетического разрешения.

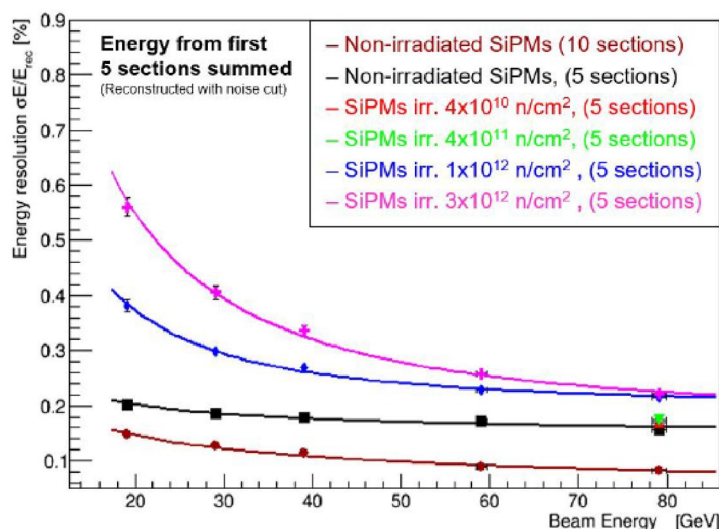


Рисунок 45. Зависимость энергетического разрешения модуля адронного калориметра установки NA61 с учетом выделенной энергии адронного ливня только в первых пяти секциях модуля [13].

В 2018 г. предполагается установить во всех 10 секциях одного модуля калориметра фотодиоды, облученные суммарными потоками нейтронов порядка 2×10^{11} нейтронов/см², т.е. потоками, которые ожидаются после модернизации калориметра NA61.

Согласно проведенному моделированию, новая конфигурация двух калориметров уменьшит утечку адронного ливня до 4% при исследовании реакции Pb+Pb при 150 AGeV. Для действующего калориметра утечка ливня при этой энергии составляет 11%.

Было проведено моделирование влияния утечки адронного ливня и энергетического разрешения PSD на точность определении центральности столкновений и показано, что для новой конфигурации калориметра точность определения наиболее центральных событий несколько лучше, чем для существующего калориметра. была проведена оценка определения центральности для 5% интервала по центральности столкновений. Также было показано, что точность определения плоскости реакции практически одинакова для полупериферических событий с существующей конфигурацией PSD и с модифицированной и составляет порядка 60 градусов.

Список цитируемой литературы

- [1] N. Antoniou et al. [NA61/SHINE Collaboration], CERN-SPSC-2006-034.
- [2] M. Gazdzicki, M. Gorenstein, P. Seyboth, Acta Phys. Polon. B42, 307 (2011)
[arXiv:1006.1765 [hep-ph]].
- [3] NuPECC Long Range Plan 2017 "Perspectives for Nuclear Physics",
<http://www.nupecc.org/index.php?display=lrp2016/main>
- [4] N. Abgrall et al., JINST 9 (2014) P06005

- [5] S. Afanasiev et al. (NA49 Collab.), Nucl. Instrum. Meth. A430 (1999) 210.
- [6] Péter Kövesárki: New calibration software (vD,T0,TPC shifts); Talk held at NA61 Collaboration Meeting (2014) [<https://indico.cern.ch/event/267227/>].
- [7] A.Ivashkin, et al., <http://arxiv.org/abs/arXiv:1205.4864>.
- [8] M.Golubeva, et al., Phys.Atom.Nucl. 75 (2012) 673-675.
- [9] О.Андреева, М.Голубева, Ф.Губер и др. Препринт ИЯИ РАН 1362/2013.
- [10] M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, et al J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012073 DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012073
- [11] M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov (Moscow, INR), A. Senger Submitted to Journal of Physics: Conference Series
- [12] S.Uozumi et al., NIM A487 (2002) 389-429.
- [13] Y.Fujii, NIM A453 (2000) 237-241.
- [14] V. Mikhaylov, F. Guber, A. Ivashkin, et al., Accepted at NIM A, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.066>

3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЖАТОЙ БАРИОННОЙ МАТЕРИИ НА УСТАНОВКЕ СВМ В GSI (ДАРМШТАДТ, ГЕРМАНИЯ)

Научный руководитель к.ф.-м.н. Губер Ф.Ф.

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке СВМ (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи в области высокой барионной плотности. На рис. 46. показаны возможные фазы ядерной материи и их границы в зависимости температуры от барионного химического потенциала.

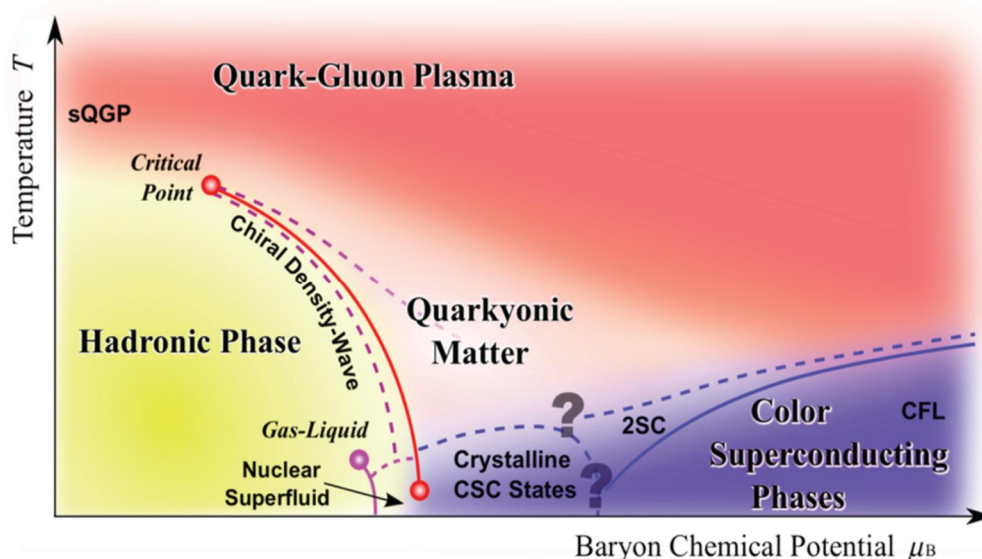


Рисунок 46. Эскиз фазовой диаграммы для сильно взаимодействующего вещества, [1].

Диагностические пробы для исследования плотной фазы, такие как барионы с большой странностью, дилептонные пары и очарованные частицы будут впервые измерены СВМ эксперименте в диапазоне энергий пучка до 11 АГэВ. Поэтому эксперимент СВМ имеет уникальный потенциал для открытий на SIS100. Для получения высокостатистических данных даже для частиц с наименьшими сечениями образования, эксперимент СВМ предназначен для работы со скоростью реакции от 100 кГц до 1 МГц. Для измерений чармония - где может генерироваться триггер на лептонных парах высоких энергий - предусмотрены скорости реакции до 10 МГц. Это превышает возможности других существующих и запланированных экспериментов с тяжелыми ионами на порядок, как показано на правой панели рис. 47.

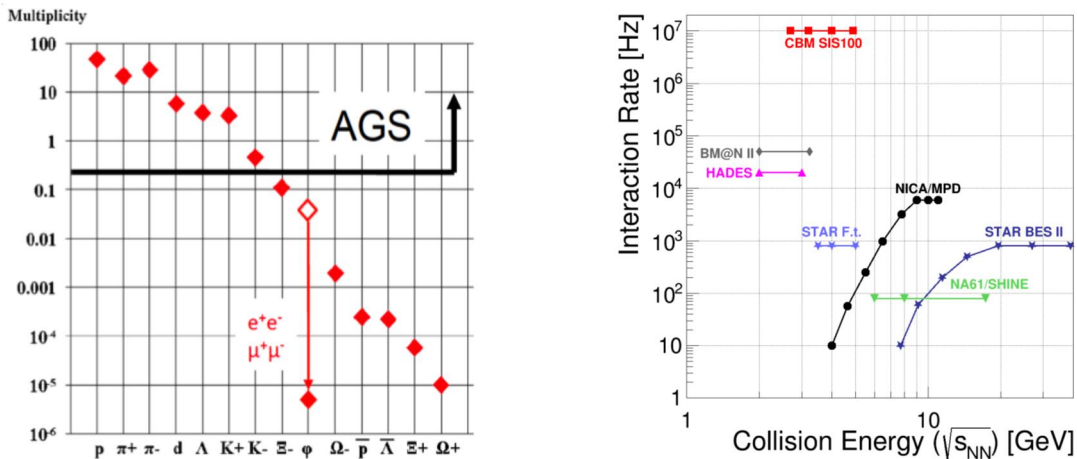


Рисунок 47. Слева: множественности частиц для центральных столкновений Au + Au при 4 AGeV в расчете со статистической моделью [11]. Справа: скорости взаимодействия, достигнутые существующими и в планируемых экспериментах с тяжелыми ионами в зависимости от энергии в системе центра масс [12].

С учетом уникальных возможностей измерений при очень высоких интенсивностях пучков тяжелых ионов и высоких скоростях набора данных физическая, программа измерений на установке CBM будет направлена на исследование уравнения состояния барионного вещества при плотностях сравнимых с плотностью нейтронных звезд, исследование свойств адронов в среде с целью поиска явлений, связанных с частичным восстановлением киральной симметрии, исследование фазовых переходов от адронной материи к кваркониновой или партонной материи при высоких чистых барионных плотностях. Планируются также эксперименты по поиску и исследованию гиперядер, странных дибарионов и массивных странных объектов, исследовании механизмов рождения чармиприванных частиц и свойств очарованных частиц в плотной ядерной материи [13-15].

Практически весь набор наблюдаемых величин, включая пособытийные флуктуации, и выход даже таких редких частиц как J/Ψ, предполагается изучать в зависимости от центральности столкновений, которая характеризует плотность энергии, достигаемой в этих реакциях. Для определения этих глобальных характеристик событий – центральности, а также угла плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях на установке CBM будет использоваться передний адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectile Spectator Detector.

ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации CBM за разработку, изготовление и подготовку этого калориметра к физическим экспериментам на ускорительном комплексе ФАИР.

Основные направления работ в 2017 г. по этому проекту были направлены на:

- завершение работы по изготовлению и сборке 45 модулей переднего адронного калориметра установки CBM и тестированию этих модулей на космических мюонах на специально оборудованном стенде в ИЯИ для проверки качества их сборки и определения световыходов для МИП, разработку методики калибровки продольных секций модулей калориметра на космике;
- продолжение работ по тестированию на стендах в ИЯИ РАН и в GSI различных прототипов аналоговой и считывающей электроники для переднего адронного калориметра CBM;
- измерение отклика супермодуля адронного калориметра CBM на каналах вторичных пучков протонов и пионов T9 и T10 в ЦЕРНе;
- измерение отклика одного из модулей калориметра в диапазоне энергий протонов 2 – 10 ГэВ с фотодиодами, предварительно облученными нейтронами, для определения их радиационной стойкости;
- проведение моделирования (в сотрудничестве с группой в GSI) радиационных доз и потоков нейтронов, которые ожидаются для переднего адронного калориметра на установке CBM при энергиях SIS100, в зависимости от диаметра отверстия для прямого пучка в центре калориметра;
- изучение возможности использования одного модуля в качестве mPSD на установке mCBM в ГСИ, работы по созданию которой начаты в 2017г, и его интеграцию в общую систему считывания и передачу данных установки mCBM;
- продолжение работ по разработке конструкции калориметра ZDC для установки BM@N с использованием модулей калориметра установки CBM модулей калориметра установки MPD. Подготовка к сеансу по измерению отклика модуля калориметра CBM на пучках углерода, аргона и криптона на установке BM@N, который планируется в феврале 2018г.

Установка CBM на ускорительном комплексе ФАИР.

Исследовательская программа эксперимента CBM направлена на исследование сжатой барионной материи на первичных пучках синхротрона SIS100 ускорительного комплекса ФАИР в Дармштадте (протоны до 29 ГэВ, Au до 11A GeV, ядра с $Z / A = 0,5$ до 14A GeV) при интенсивностях ионов золота до 10^9 в секунду.

Экспериментальная стратегия создаваемой установки CBM состоит в том, чтобы выполнять систематические интегральные и дифференциальные измерения почти всех частиц,

образующихся при ядерных столкновениях (т. е. выходы, распределения в фазовом пространстве, корреляции и флуктуации) с беспрецедентной точностью. Эти измерения будут проводиться в ядро-ядерных, протон-ядерных и – как реперные, в протон-протонных столкновения при разных энергиях пучка. Идентификация странных гиперонов с большой странностью, гиперядер, частиц с очаровыми кварками и векторных мезонов, распадающиеся на лептонные пары требует эффективного подавления фона и очень высоких скоростей взаимодействия. Чтобы выбрать события, содержащие эти редкие наблюдаемые, треки каждого столкновения должны быть восстановлены в процессе набора данных (online) для определения физических характеристик. Эта концепция представляет собой сдвиг парадигмы для сбора данных в экспериментах по физике высоких энергий: CBM будет работать без иерархического триггера. Самозапускающаяся считывающая электроника, высокоскоростная система обработки и сбора данных, быстрые алгоритмы и, что не менее важно, радиационно стойкие детекторы являются необходимыми предпосылками для успешной работы эксперимента. На рисунке 48 показана схема экспериментальной установки CBM.

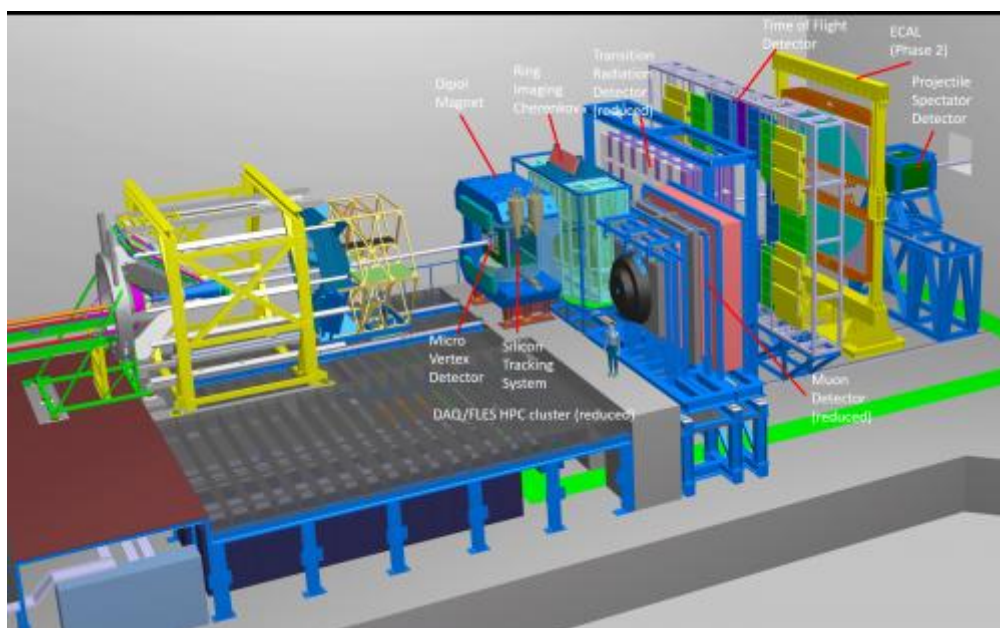


Рисунок 48. Общий вид установки CBM.

Экспериментальная установка CBM включает следующие компоненты:

Дипольный магнит. Дипольный магнит будет сверхпроводящим, чтобы снизить эксплуатационные расходы. Он имеет большую апертуру $\pm 25^\circ$ полярного угла и обеспечивает магнитное поле до 1 Тм.

Микровертекс-детектор (MVD). MVD обеспечит отличное координатное разрешение заряженной частицы и имеет очень маленькую радиационную длину, что требуется для идентификации частиц с открытым очарованием путем измерения их смещенной вершины распада. Этот детектор состоит из четырех слоев полупроводниковых пиксельных детекторов MAPS монолитного типа, расположенных в вакууме на расстоянии от 5 см до 20 см от мишени. Этот детектор обеспечивает пространственное разрешение вторичных вершин около 50-100 мкм вдоль оси пучка.

Система кремниевых полупроводниковых детекторов для определения координат траектории заряженных частиц (STS). Задачей STS является обеспечение восстановления траектории и определение импульса заряженных частиц. Система состоит из восьми слоев кремниевых стриповых детекторов, расположенными на расстоянии от 30 см и 100 см после мишени внутри магнитного поля.

Эти детекторы должны обеспечить импульсное разрешение около 1,5%.

Детектор черенковского изображения (RICH). Газовый детектор RICH обеспечит идентификацию электронов посредством измерения их Черенковского излучения в стандартной проекционной геометрии с фокусирующими зеркальными элементами и фотонным детектором. Детектор будет располагаться за дипольным магнитом примерно на 1,6 м после мишени. Он будет состоять из газового радиатора длиной 1,7 м (общая длина около 2 м) и двух массивов зеркал и плоскостей фотонного детектора. Конструкция плоскости фотонного детектора основана на фотоумножителях MAPM для обеспечения высокой степени гранулярности, высокой геометрического аксептанса, высокой эффективности детектирования фотонов, включая и ближнюю ультрафиолетовую область.

Мюонная камерная система (MUCH). Концепция системы детектирования мюонов заключается в отслеживании прохождения частиц через адронный поглотитель и идентифицировать мюоны, в зависимости от их импульсов. Компактная система абсорбер/детектор состоит из шести слоев поглотителей адронов, изготовленных из железных пластин и 18 газообразных координатных камер для определения треков частиц, расположенных тройками за каждым железным поглотителем. Этот детектор расположен сразу после STS, который определяет импульс частицы.

Детектор излучения переходного излучения (TRD). Детектор переходного излучения, состоит из четырех детекторных слоев, сгруппированных в одну станцию и будет служить для отслеживания частиц и для идентификации электронов и позитронов с $p > 1,0$ ГэВ/с. Детекторные слои расположены на расстоянии от 4,1 м до 5,9 м после мишени. Общая

активность площадь детекторов составляет около 114 м², Пространственное разрешение детектора составляет около 300 мкм в поперечной плоскости и 3-30 мм вдоль пучка.

Система времени пролета (TOF). Годоскоп многозачерных резистивных камер (MRPC) будет использоваться для идентификации адронов посредством измерения их времени пролета. Активная площадь детектора TOF составляет около 120 м² и расположена на расстоянии около 6 после мишени. Временное разрешение составляет порядка 80 пс.

Электромагнитный калориметр (ECAL). Калориметр типа «шашлык», использованный в экспериментах HERA-B, PHENIX и LHCb будет использоваться для измерения прямых фотонов и нейтральных мезонов (π^0 , η), распадающихся на фотоны. ECAL будет состоять из модулей, которые состоят из 140 слоев листов свинца и сцинтиллятора. Модули калориметра планируется расположить между TOF и PSD детекторными системами.

Детектор спектаторов (PSD). PSD является передним адронным калориметром и будет использоваться для определения центральности столкновений и измерения ориентации плоскости реакции. Этот детектор полностью разработан, изготавливается и тестируется в ИЯИ РАН. Более детальная информация по этому детектору будет приведена в последующих разделах.

Отбор онлайн-событий и система сбора данных. Для проведения измерений образования частиц с очень маленькими сечениями рождения требуется высокая скорость системы отбора онлайн-событий и сбора данных. В CBM эксперименте эта система рассчитана на частоту событий 10 МГц при интенсивности пучка 109 ионов/сек и 1% мишени. Поэтому, измерения с частотой событий 10 МГц требуют разработки алгоритмов отбора онлайн-событий (и аппаратных средств), которые отклоняют фоновые события (которые не содержат сигнала) в 100 или более раз. Системы сбора событий основана на быстрой онлайн-реконструкция событий, работающая на высокопроизводительной компьютерной ферме, оборудованной многоядерными процессорами (GSI GreenIT cube). Восстановление треков, наиболее времязатратный комбинаторный этап реконструкции события, будет основываться на параллельных алгоритмах поиска и отбора траекторий.

PSD – передний адронный калориметр установки CBM.

Передний адронный калориметр PSD (Projectile Spectator Detector) планируется использовать в экспериментах на установке CBM 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.

Схема общего вида и вида спереди этого калориметра показана на рис. 49, слева и в центре. Калориметр имеет модульную структуру, состоит из 44 модулей с отверстием диаметром 60 мм в центральной части калориметра для прохождения налетающего пучка ядер. и имеет поперечные размеры $160 \times 120 \text{ см}^2$. Каждый модуль адронного калориметра (рис. 49, справа) имеет поперечный размер $20 \times 20 \text{ см}^2$ и состоит из 60 слоев пластин свинца с толщиной 16 мм с расположенными между ними пластинами из пластикового сцинтиллятора толщиной 4 мм. При таком соотношении толщин свинца и сцинтиллятора (4:1) выполняется условие так называемой компенсации [16, 17], при котором вклад электромагнитной компоненты адронного ливня равен вкладу адронной компоненты ливня. Полная длина модуля калориметра соответствует 5.6 длинам ядерного взаимодействия. Вес одного модуля порядка 500 кг.

Все модули имеют одинаковую сегментированную продольную структуру. Свет от прохождения заряженных частиц через сцинтилляционные пластины собирается, передается и группируется переизлучающими оптоволоками на 10 фотодетекторов, установленных в конце каждого модуля. Таким образом обеспечивается продольная сегментация модуля на 10 секций, что обеспечивает равномерную эффективность сбора света по длине модуля.

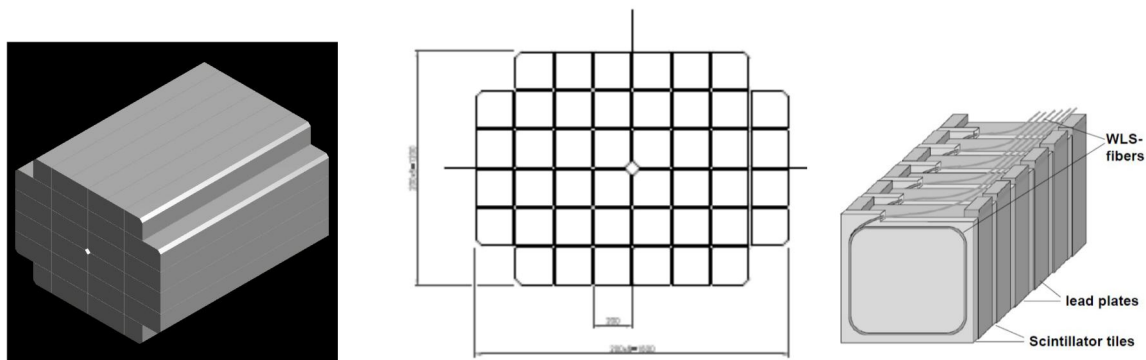


Рисунок 49. Чертеж общего вида переднего адронного калориметра (слева) и общий вид спереди (в центре). Схематический вид отдельного модуля PSD (справа).

Конструкция калориметра и его характеристики подробно описаны в Техническом проекте переднего адронного калориметра установки CBM [18].

В 2017 г. в ИЯИ РАН были завершены работы по изготовлению и сборке всех 45 модулей переднего адронного калориметра установки CBM (один модуль запасной). Работы

проводились в ИЯИ РАН на специально оборудованном участке и стендах для сборки и тестирования качества изготовленных модулей калориметра на космике, рис.50.



Рисунок 50. Участок для сборки модулей в ИЯИ РАН (слева) и процесс сборки модуля калориметра (справа).

Перел сборкой модулей, для проверки качества собранных сцинтилляционных пластин с клееным оптоволоконном, проводились измерения их световыхода на космических лучах на специальном стенде. На рис.51 показаны типичные результаты измерения световыхода вдоль диагонали сцинтилляционной пластины, выполненные с источником Sr^{90} . Видно, что измеренные световыходы пластин для модулей калориметра СВМ имеют достаточно равномерную зависимость от точки попадания частиц с незначительным увеличением световыхода вблизи точки пролегания оптоволоконна. С учетом потерь энергии электронов в сцинтилляционной пластине толщиной 4 мм удельный средний световыход составил 7.5 ± 0.4 ф.э./МэВ.

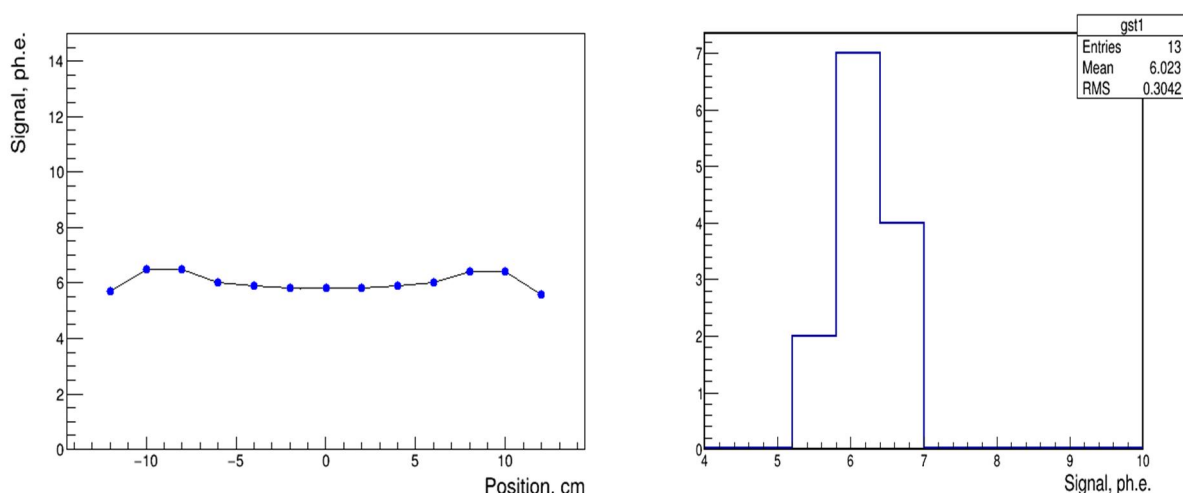


Рисунок 51. Слева — зависимость сигнала фотодиода от положения источника излучения вдоль диагонали сцинтилляционной пластины модуля калориметра СВМ. Справа — соответствующее распределение световыхода.

Измерения световыхода сцинтилляционной пластины модуля калориметра СВМ на космических мюонах при положении запускающего детектора, соответствующего прохождению мюонов через центр пластины показали среднее значение световыхода 5.6 ± 0.5 ф.э., что хорошо согласуется с результатами измерений с источником Sr^{90} , в которых световыход составил 6 ± 0.3 ф.э

В модулях адронного калориметра СВМ свет детектируется с группы (секции) из 6 последовательно расположенных в модуле сцинтилляционных пластин. Свет с каждой из 6 пластин секции собирается спектросмещающим оптоволоконном и передается на отдельный фотодиод через оптический разъем, расположенный на панели в торце модуля. Таким образом, на этой панели установлены 10 оптических разъемов с лавинными фотодиодами HAMAMATSU MPPC S12572-010P для считывания света с 10 секций модуля. Для проверки качества собранных модулей проводятся измерения световыхода с секций каждого модуля адронного калориметра на космических мюонах. Эти измерения необходимы 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 был создан стенд, схема которого дана на рис.7. Модуль калориметра был размещен горизонтально на специальной платформе.

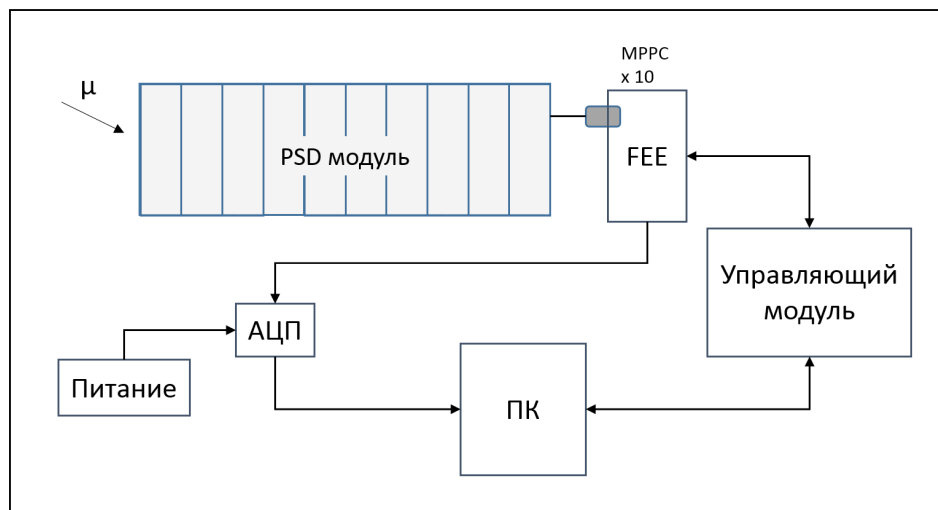


Рисунок 52. Рабочая схема для измерения световыхода отдельных секций модуля калориметра.

Световой сигнал от космических мюонов, проходящих через секции модуля калориметра, подавался с помощью спектросмещающего оптоволоконна на фотодетекторы

(МРРС), установленные на плате с аналоговой электроникой FEE (front-end electronics). Эта плата (Рис. 53, слева) размещалась в торце модуля на панели с оптическими разъемами, таким образом обеспечивался оптический контакт фотодиодов с вклеенными в оптический разъем спектросмещающими оптоволоконными. На данной печатной плате расположены предусилители сигналов фотодиодов, микроконтроллер и система управления напряжением питания фотодиодов, датчик температуры, а также элементы генератора калибровочных световых импульсов, включая микроконтроллер управления, светодиод и PIN-фотодиод, предназначенный для контроля амплитуды световой вспышки. Управление генератором и напряжением на фотодиодах осуществляется через последовательный интерфейс, связывающий плату FEE с управляющим модулем. Управляющий модуль включает в себя блок питания и микроконтроллер, который подключается к питающей сети, а через линию связи он соединен с управляющим компьютером. Платы аналоговой электроники и управляющий модуль разработаны и изготовлены в Дубне в ОИЯИ специально для этого калориметра.

Аналоговые сигналы от фотодиодов, расположенных на плате FEE поступают на каналы АЦП AFI Electronics ADC64s2 (Рис. 53, справа) и обрабатываются с помощью компьютера. ADC64s2 представляет собой 64-канальное 12-битовое устройство с частотой дискретизации 62.5 МГц и интерфейсом Ethernet. Функция считывания данных, триггера и синхронизации выполняется по одной волоконно-оптической линии связи. Питание АЦП осуществляется от источника АКИП 1124.



Рисунок 53. Слева — плата с аналоговой электроникой для считывания сигналов с 10 фотодетекторов в конце модуля калориметра СВМ. Справа — плата с АЦП (AFI Electronics ADC64s2).

Для измерения световых выходов каждой отдельной секции калориметра использовались отобранные события трех классов:

а) События, в которых мюон проходил через две секции – исследуемую, и одну из соседних – триггерную.

б) События, в которых мюон проходил через три секции – исследуемую, и две соседние –триггерные.

Эти два класса событий соответствуют наклонным трекам космических мюонов.

в) События с наличием одновременного сигнала со всех секций, что соответствует практически горизонтально летящим мюонам.

На рис. 54 схематично показаны эти три варианта отбора таких событий.

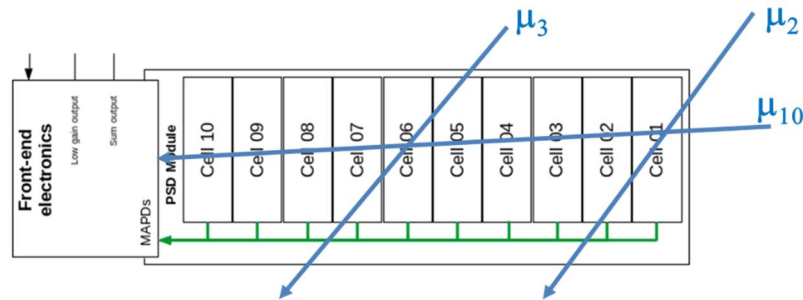


Рисунок 54. Схема геометрии модуля калориметра, состоящего из 10 продольных секций, и геометрия нескольких треков космических мюонов, проходящих через все секции модуля (горизонтальные мюоны), две секции и три секции модуля (наклонные треки)

Пример зарядового спектра отдельной секции модуля калориметра для установки СВМ показан на рис. 55 слева - для наклонных треков мюонов и справа -для горизонтальных треков.

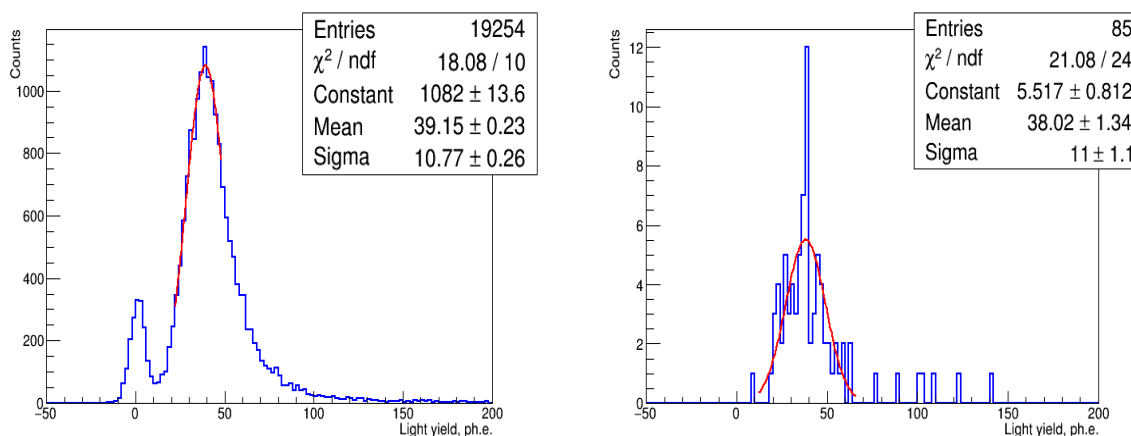


Рисунок 55. Зарядовый спектр отдельной секции модуля калориметра СВМ. Слева — для наклонных треков мюонов, справа — для горизонтальных треков мюонов.

Полученные распределения средних значений световых выходов для 10 секций модуля калориметра СВМ показаны на рис.56. Зеленым и красным цветами показаны полученные

данные по световыходам для наклонных треков, а синим цветом — для горизонтальных треков.

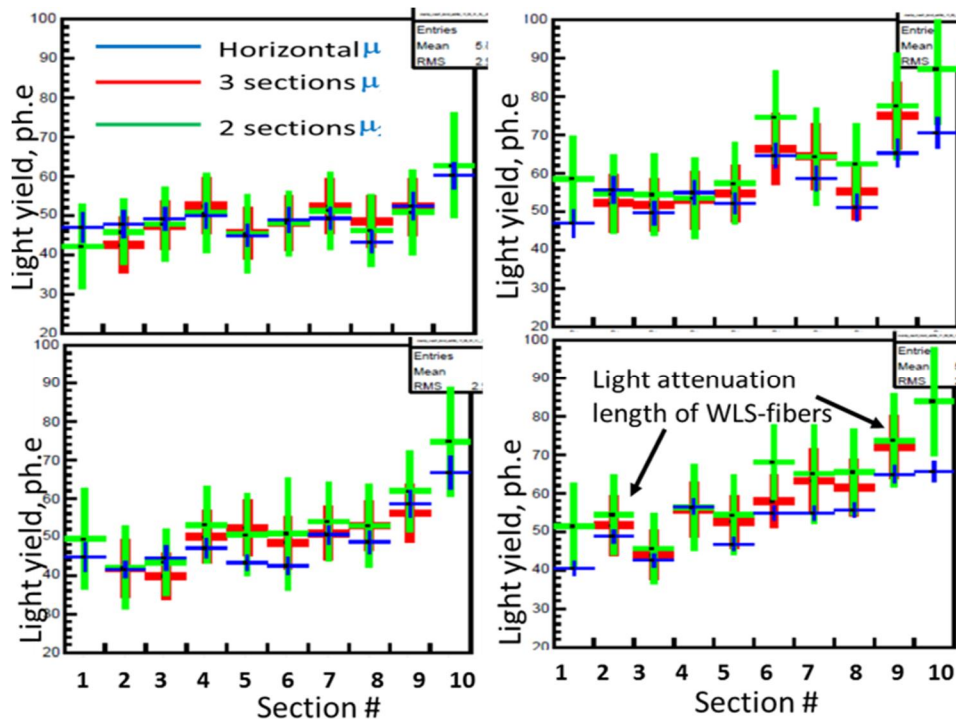


Рисунок 56. Световые выходы в продольных секциях четырех модулей, определенные несколькими способами: а) с помощью горизонтальных мюонов, проходящих через все 10 секций модуля (синие маркеры); б) от наклонных космических мюонов при условии прохождения мюона через одну из двух, левую или правую триггерную секции (зеленые маркеры); в) от наклонных космических мюонов при условии прохождения мюона одновременно через левую и правую триггерную секции (красные маркеры).

Сравнение полученных результатов для трех методов отбора треков мюонов показывает хорошее согласие средних значений световыхода, который составляет около 50 фотоэлектронов, полученных этими методами.

Наблюдаемый наклон зависимости световыхода от номера секции обусловлен различной длиной оптоволокну, которое транспортирует свет от пластины в торец модуля, что приводит к различному ослаблению сигнала в зависимости от номера секции. Световыход секций, измеренный для наклонных треков мюонов, несколько больше, чем для горизонтальных треков мюонов, что вызвано большим путем прохождения частиц в веществе сцинтиллятора.

Следует отметить значительно меньшее количество событий с горизонтально летящими мюонами, что является следствием углового распределения космических мюонов и

значительно меньшего аксептанса модуля для таких мюонов. Так за сутки набора данных количество отобранных горизонтальных треков составляет менее 50. Это, в принципе, позволит выполнить энергетическую калибровку всего калориметра перед началом сеанса на установке CBM за несколько суток непрерывного набора данных. Однако использование горизонтальных мюонов для контроля за качеством собранных модулей является весьма затруднительной задачей.

Исследование отклика супермодуля PSD CBM в диапазоне импульсов 2 – 10 ГэВ/с на тестовом адронном пучке в ЦЕРНе.

В настоящее время имеются экспериментальные данные по энергетическому разрешению и линейности отклика только для одиночного модуля в диапазоне энергий протонов и пионов 2-5 ГэВ [19]. Однако, поскольку поперечный размер модуля составляет всего 20х20 см², значительная утечка адронного ливня через боковые поверхности модуля может влиять на энергетическое разрешение. Поэтому, для исследований отклика адронного калориметра CBM было принято решение провести в 2017 г. измерения отклика супермодуля адронного калориметра CBM на пучках протонов и пионов в диапазоне импульсов 2-10 ГэВ/с в ЦЕРНе, т.е в энергетическом диапазоне CBM на ускорителе SIS100.

Супермодуль калориметра был собран в сборку 3х3 из 9 изготовленных модулей PSD с поперечными размерами 20х20 см² как показано на рис.57. Продольная длина каждого модуля равна 5,6 λ. Поперечный размер супермодуля составляет 60х60 см², что достаточно для того, чтобы большая часть энергии адронного ливня выделялась внутри калориметра. Общий вес супермодуля составляет около 4,5 тонн.



Рисунок 57. Фото супермодуля PSD.

Отклик супермодуля PSD изучался в 2017 г. в двух сеансах в ЦЕРНе - на канале T10, который обеспечивал пучок протонов и пионов в диапазоне импульсов 2-6 ГэВ/с и на канале T9, который обеспечивал вторичные пучки пионов и протонов с импульсами 4 - 10 ГэВ/с. На рис.58, слева, показано расположение супермодуля в конце канала T10, а на правом рисунке показано его расположение на канале T9.



Рисунок 58. Слева - фотография супермодуля PSD на канале T10; справа – на канале T9.

Супермодуль установлен на платформе, которая позволяет его перемещать в поперечном направлении, что необходимо для проведения калибровки модулей на мюонах пучка. Для идентификации типа частиц в пучке канала T10 измерялось время пролета между двумя черенковскими детекторами, один из которых с кварцевым радиатором диаметром 30 мм и длиной 30 мм был установлен на оси пучка непосредственно перед супермодулем. Другой черенковский детектор с кварцевым радиатором диаметром 20 мм и длиной 30 мм помещался на расстоянии около 12 м перед супермодулем. Сигналы с этих детекторов считывались с помощью 12-разрядного АЦП CAEN DT5742 с частотой дискретизации 5 ГГц. Сигнал совпадения обоих черенковских детекторов инициировал считывание данных супермодуля.

Усиленные и сформированные сигналы MPPC от модулей калориметра считывались двумя 64-канальными 12-разрядными платами ADC64s, производимыми AFI, ОИЯИ, Дубна. В качестве метода прямого считывания была использована схема быстрого АЦП, разработанная в ОИЯИ (Дубна). Данная плата работает с частотой 62.5MS/s, что дает 16 нс на отсчет. Для уверенного съема формы сигнала необходимо порядка 10-15 отсчетов для самого сигнала и примерно столько же для определения пьедестала, то есть время считывания составляет порядка 500 нс. В дальнейшем, предполагается разработка карты со скоростью 125 MS/s, что даст уменьшение времени считывания до 250 нс. Применяя алгоритмы

восстановления формы сигнала, можно добиться уменьшения времени до уровня 100-150 нс, что уже соответствует требованиям электроники эксперимента CBM.

Временное разрешение, обеспечиваемое черенковскими детекторами, составило около 60 пс, что позволило идентифицировать пионы и протоны в полном диапазоне импульсов пучка на канале T10 (рис.59, слева) и впервые измерить относительные доли пионов и протонов на канале T10 (рис.59, справа). Как видно, доли протонов и пионов с наибольшим импульсом около 6 ГэВ/с практически одинаковы, в то время как доля пионов увеличивается при меньших импульсах пучка.

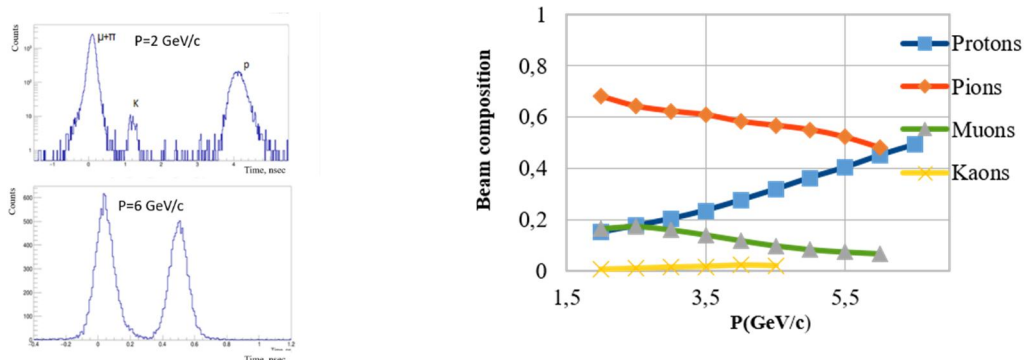


Рисунок 59. Слева - спектры TOF для частиц с импульсом 2 и 6 ГэВ/с; Справа - доля частиц в пучке T10 в зависимости от импульса частиц в пучке.

Энергетическая калибровка всех 10 секций в каждом из 9 модулей выполнялась с помощью мюонов от распада пионов в канале транспортировки. Идентификация мюонов проводилась с использованием корреляции между выделенной энергией в первой половине модуля (первые пять секций) и второй половине модуля (рис. 60, слева). Для мюонов эти энергии должны быть практически одинаковыми, в то время как адроны теряют основную долю энергии в первой половине модуля.

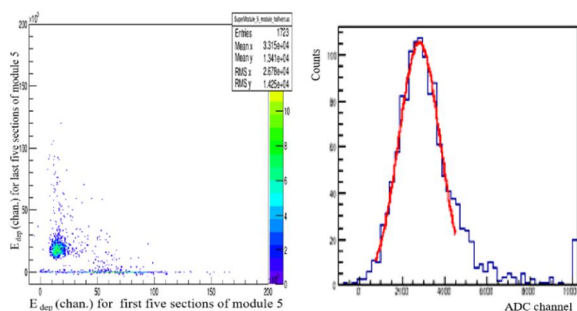


Рисунок 60. Слева - двумерная корреляция между потерянной энергией мюонов в первой половине модуля (первые пять секций) и второй половине модуля. Справа – амплитудный спектр мюонов в одной из секций модуля.

Выделенная энергия мюонов измерялись в каждой из 10 секций модуля. Типичный измеренный амплитудный спектр мюонов в одной из секций показан на рис.60, справа. Среднее значение этого распределения соответствует потерям энергии мюонов около 5 МэВ в 6 слоях сцинтилляторов общей толщиной 24 мм. Полученные калибровочные коэффициенты для всех 90 секций супермодуля используются для расчета выделенной энергии как для пионов, так и для протонов.

Полученные предварительные результаты измерений энергетического разрешения и линейности отклика супермодуля PSD для протонов и пионов в диапазоне импульсов 2-10 ГэВ/с представлены на рис.61. Энергетическое разрешение супермодуля находится в хорошем согласии с разрешением, измеренным ранее для одного модуля [19].

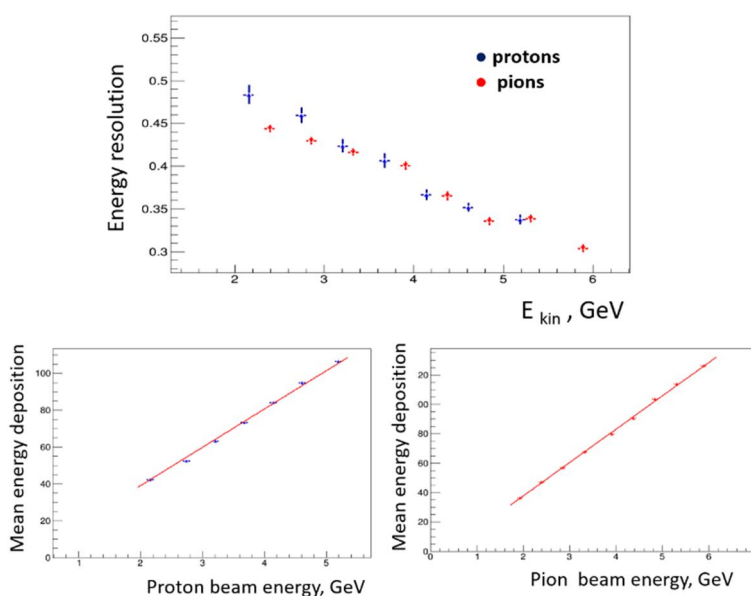


Рисунок 61. Энергетическое разрешение супермодуля PSD для пионов и протонов как функция энергии частиц (сверху) и линейность отклика супермодуля для протонов (слева внизу) и для пионов (справа внизу).

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

Результаты моделирования распределения доз от ионизирующих излучений и потоков нейтронов для переднего адронного калориметра на установке CBM в зависимости от размеров пучкового отверстия в калориметре.

При использовании калориметра на пучке частиц сильноточного ускорителя SIS100 для измерения энергии спектров надо учитывать, что в нем развиваются адронные ливни, частью которых являются нейтроны. Известно, что быстрые нейтроны опасны для кремниевых структур тем, что вызывают необратимые изменения в структуре р-п перехода и свойства последнего ухудшаются. Так как в качестве фотодетекторов в адронном калориметре для регистрации сигналов будут использоваться кремниевые лавинные фотодиоды, то это может привести к изменению их свойств (возрастанию шумов, падению усиления), что приведет к ухудшению отклика калориметра. С другой стороны, большие дозы от ионизирующих излучений и большие потоки нейтронов могут ухудшить прозрачность сцинтилляторов, что тоже приведет к ухудшению свойств калориметра.

Поэтому, в 2017 г. группа ИЯИ РАН продолжила сотрудничество с А.Зенгер из GSI по моделированию потоков нейтронов и радиационной дозы в адронном калориметре с целью их минимизации в зависимости от диаметра пучкового отверстия в калориметре.

Изначально в Техническом проекте калориметра [18] предполагалось, что диаметр пучкового отверстия в калориметре будет 60 мм. При этом предположении были выполнены все необходимые расчеты для оценки потоков нейтронов и радиационных доз. Однако, более точные оценки эммитанса пучка, а также учет многократного рассеяния ионов золота на мишени показывают довольно большую долю ионов золота, которые не будут проходить через отверстие диаметром 60 мм. На рис. 62 показана доля ионов золота в пучке, которые не проходят через пучковое отверстие в зависимости от радиуса этого отверстия для нескольких значений энергии пучка ядер золота. Калориметр расположен на расстоянии 8 м от мишени. Видно, что для энергии ядер золота 2 AGeV около 0.2% ионов будет попадать на калориметр. Эту величину можно уменьшить более чем в 25 раз увеличив диаметр отверстия в калориметре до 200мм.

Не прошедшие через отверстие в калориметре ионы золота будут взаимодействовать с материалами калориметра. Это, в свою очередь, приведет к увеличению потоков нейтронов и радиационных доз как в самом калориметре, так и других детекторных системах установки CBM.

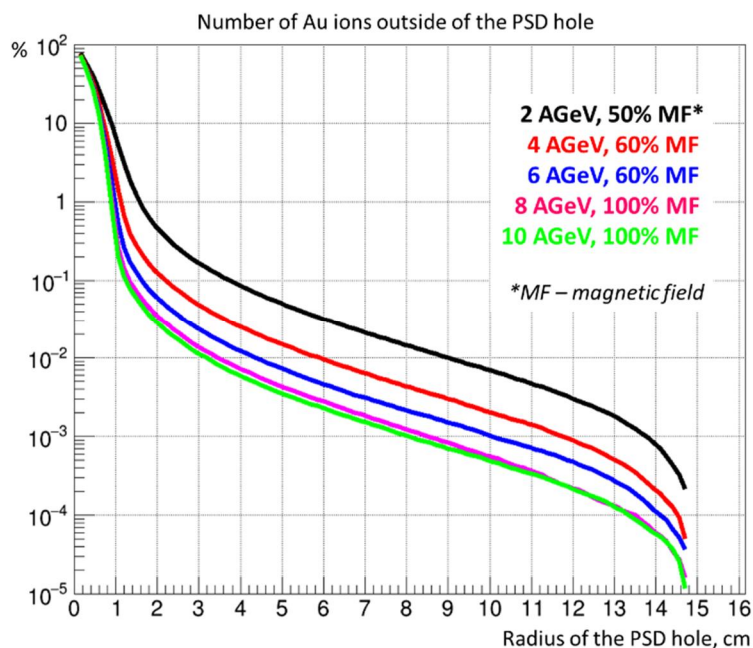


Рисунок 62. Зависимость относительной доли (в %) ионов золота в пучке, которые не проходят через отверстие в калориметре, от диаметра отверстия в калориметра и от энергии пучка ионов золота.

Для пучкового отверстия в калориметре с диаметрами 60 мм и 200 мм с использованием пакета FLUKA были выполнены расчеты распределения потоков нейтронов вдоль и поперек калориметра, а также в месте расположения кремниевых лавинных фотодиодов на панелях в конце модулей калориметра. Выполнены также расчеты распределения радиационных доз по калориметру для этих же условий. Расчеты проведены для реакции Au+Au с энергией ядер золота 4 и 10 АГэВ, интенсивностью пучка 10^8 ядер в секунду и толщиной мишени из золота 1% от ядерной длины. Оценки сделаны при условии непрерывного эксперимента в течение 2 месяцев.

На рис. 63, слева, показаны результаты моделирования распределения дозы от ионизирующих излучений по калориметру с диаметром пучкового отверстия 60 мм и при энергиях ионов золота 4 АГэВ. Справа показаны результаты моделирования для калориметра с диаметром отверстия 200 мм. Видно, что в первом случае очень высокий уровень радиационной дозы наблюдается в центральных модулях, что приведет к ослаблению прозрачности сцинтилляторов в этих модулях и ухудшению отклика калориметра. При диаметре пучкового отверстия 200 мм, уровень радиационной дозы в центральных модулях вполне приемлем и не превышает нескольких сот рад.

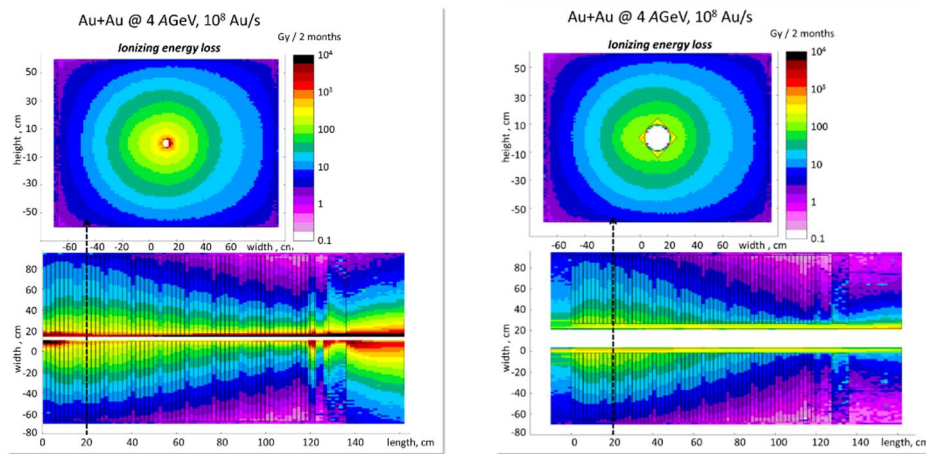


Рисунок 63. Распределение радиационных доз в поперечной плоскости адронного калориметра при энергии ионов золота в пучке 4 АГэВ. Слева – для калориметра с диаметром пучкового отверстия 60 мм, справа – для калориметра с диаметром пучкового отверстия 200 мм.

Результаты расчетов потоков нейтронов с эквивалентной энергией 1 МэВ на 1 см^2 в поперечной плоскости калориметра показаны на рис.64. Здесь, также наблюдаются умеренные потоки нейтронов в калориметре при диаметре пучкового отверстия 200 мм.

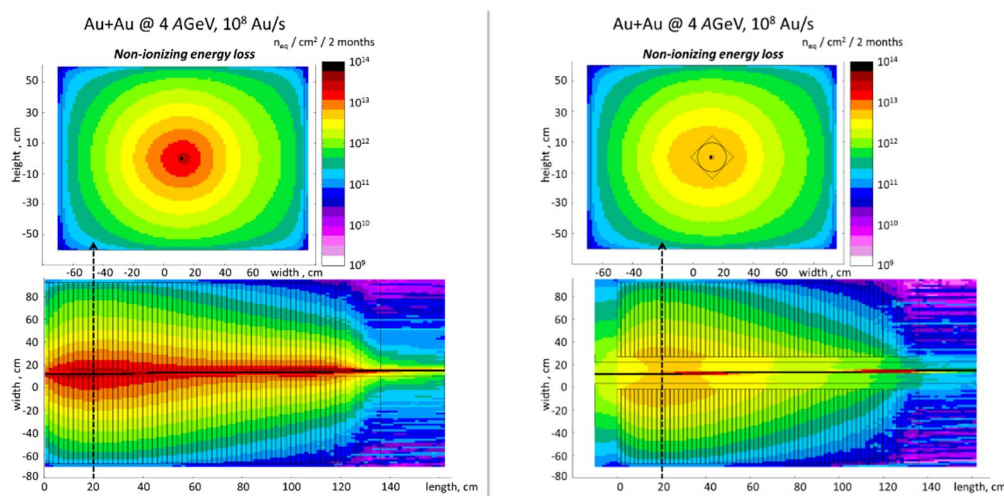


Рисунок 64. Распределение потоков нейтронов с эквивалентной энергией 1 МэВ на 1 см^2 в поперечной плоскости адронного калориметра при энергии ионов золота в пучке 4 АГэВ. Слева – для калориметра с диаметром пучкового отверстия 60 мм, справа – для калориметра с диаметром пучкового отверстия 200 мм.

Распределение потоков нейтронов с эквивалентной энергией 1 МэВ на 1 см^2 в зависимости от радиуса в плоскости расположения фотодиодов в конце калориметра показаны на рис. 20. Эти потоки соответствуют непрерывным измерениям в течение двух месяцев в году. Здесь черным и серым цветами показаны распределения потоков нейтронов для калориметра

с пучковым отверстием диаметром 60 мм для энергий пучка ионов золота 4 и 10 АГэВ, соответственно. Красным и розовым цветами показаны потоки нейтронов для калориметра с пучковым отверстием диаметром 200 мм, вписанного в квадрат 200х200 мм² с различной пространственной ориентацией для энергии пучка 4 АГэВ. Для энергии 10 АГэВ, соответствующие распределения показаны синим и голубым цветами.

Видно, что в случае использования пучкового отверстия в форме повернутого квадрата с размерами 200х200 мм² потоки нейтронов вблизи оси пучка снижаются до уровня 2×10^{11} нейтронов на квадратный сантиметр. При таких уровнях потоков нейтронов ожидается, что изменение характеристик МРРС незначительно повлияет на отклик калориметра (см. следующий раздел).

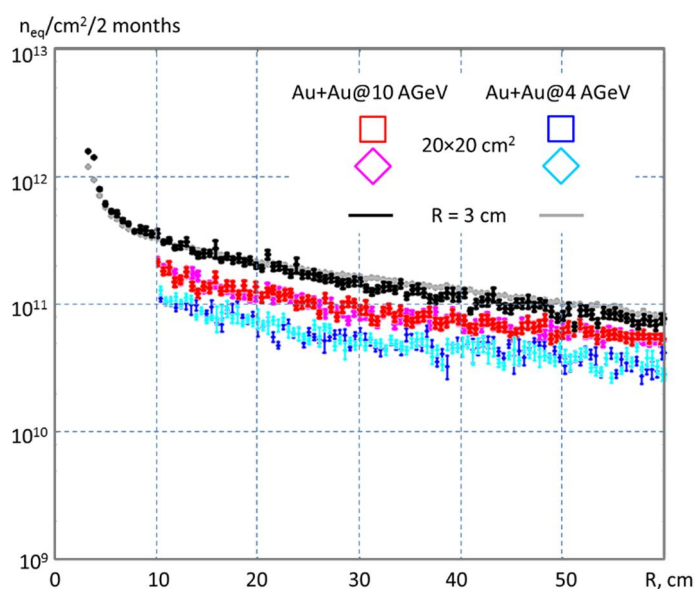


Рисунок 65. Потоки нейтронов в плоскости расположения фотодетекторов в зависимости от расстояния до оси пучка (пояснения см. в тексте).

В 2018 г. планируется исследовать как увеличение диаметра пучкового отверстия влияет на точность определения центральности и угла плоскости реакции с помощью адронного калориметра.

Исследования отклика модуля калориметра на пучке протонов с облученными нейтронами микропиксельными лавинными фотодиодами.

В течение 2017 г ИЯИ РАН проводил исследования отклика модуля калориметра PSD на установке NA61 в ЦЕРНе NA61 в диапазоне энергий протонов 20 – 80 ГэВ и при энергиях протонов и пионов в диапазоне 1 – 10 ГэВ на каналах T9 и T10 [20]. и на каналах T9 и T10 с использованием в качестве фотодетекторов микропиксельных лавинных фотодиодов,

предварительно облученными нейтронами. Облучение нескольких партий фотодиодов различными суммарными потоками нейтронов было проведено чешскими членами коллаборации CBM на пучке циклотрона ядерного исследовательского института (Rez, Чехия). Всего было облучено 4 партии по 5 фотодиодов Hamamatsu S12572-010P суммарными потоками нейтронов 4×10^{10} , 4×10^{11} , 1×10^{12} и 3×10^{12} нейтронов/см², соответственно.

В этих измерениях необлученные MPPC в первых пяти секциях одного модуля адронного калориметра были заменены на облученные фотодиоды с ячейкой 10 мкм (S12572-010P) производства Hamamatsu. MPPC работали при перенапряжениях около 2 В. и при постоянной температуре 20 °С. Полученное на адронном калориметре установки NA61 энергетическое разрешение для первых пяти секций показано на рис. 66, слева для облученных фотодиодов с различными суммарными потоками нейтронов в сравнении с необлученными фотодиодами. При этом отбирались только события, в которых адронный ливень начинался уже в первой секции калориметра.

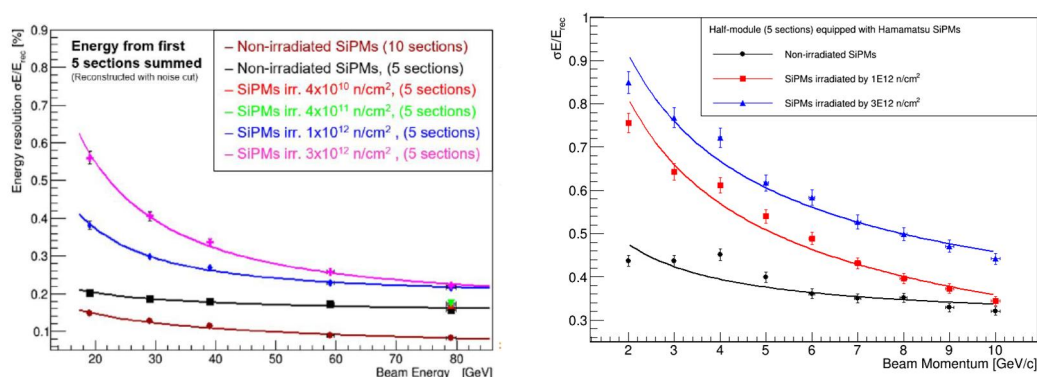


Рисунок 66. Зависимость энергетического разрешения модуля адронного калориметра установки NA61 с учетом выделенной энергии адронного ливня только в первых пяти секциях модуля [5].

Видно, что при энергии протонов 80 ГэВ практически нет разницы в разрешении пяти секционного калориметра с необлученными и облученными диодами с суммарным потоком нейтронов вплоть до 4×10^{11} нейтронов/см². Для фотодиодов, облученных более высокими потоками нейтронов, уже наблюдается заметное ухудшение энергетического разрешения.

Энергетическое разрешение ухудшается и с уменьшением энергии протонов, т.к. при уменьшении энергии уменьшается отношение сигнал/шум для облученных фотодиодов. Поэтому, было важно измерить энергетическое разрешение модуля калориметра с фотодиодами, облученными потоками нейтронов 1×10^{12} и 3×10^{12} нейтронов/см² при энергиях протонов и пионов при энергиях 1 – 10 ГэВ, т.е. в области энергии эксперимента CBM.

Предварительные результаты измерений показаны на рис. 66, справа. Видно, что при энергии протонов порядка 2 ГэВ, энергетическое разрешение падает примерно в 2 раза.

В 2018 г. предполагается установить в одном модуле во всех 10 секциях калориметра фотодиоды, облученные суммарными потоками нейтронов порядка 2×10^{11} нейтронов/см² и провести измерения энергетического разрешения модуля калориметра на каналах T9 и T10 в диапазоне энергий протонов 1 – 10 ГэВ.

Эти исследования очень важны для эксперимента CBM, т.к. большая часть модулей калориметра установки CBM с пучковым отверстием диаметром 200 мм, за исключением нескольких модулей в центральной части калориметра, будет облучаться именно такими потоками в процессе эксперимента (рис.65).

Подготовка к экспериментам mCBM в GSI и BM@N на нуклотроне в ОИЯИ.

В течение 2017 г. группа ИЯИ РАН занималась вопросами подготовки к эксперименту mCBM в рамках программы ФАИР-фаза-0 на действующем ускорителе SIS18 в ГСИ. Программным комитетом ГСИ в 2017 г. была утверждена программа измерений на этой установке и выделено пучковое время на период с 2018 по 2022г.г. Цель этого эксперимента – проведение тестовых измерений отдельных уже изготовленных элементов всех детекторных систем CBM на пучке ионов золота с интенсивностью порядка 10⁸ ионов в секунду в условиях высоких нагрузок и радиационных условиях максимально приближенных к ожидаемым на CBM, а также интеграция всех детекторных систем установки CBM в общую систему сбора данных, которая будет использоваться на CBM, отработка методов считывания и анализа полученных экспериментальных данных.

ИЯИ РАН готовит к использованию в этом эксперименте один из уже изготовленных модулей адронного калориметра (mPSD). Ввиду очень ограниченных размеров помещения, в котором будет размещаться установка mCBM, (рис. 22), вопросы механической интеграции mPSD в эту установку были первоочередной задачей, которой группа ИЯИ занималась в 2017 г. Предложено несколько вариантов размещения mPSD на этой установке, один из которых показан на рис. 67. В настоящее время, размещение mPSD находятся на этапе согласования.

Для проведения моделирования mPSD начаты работы по интеграции mPSD в пакет mCBMroot и разработке соответствующего программного обеспечения. Начаты работы по интеграции считывания сигналов с mPSD в общую систему считывания установки mCBM.

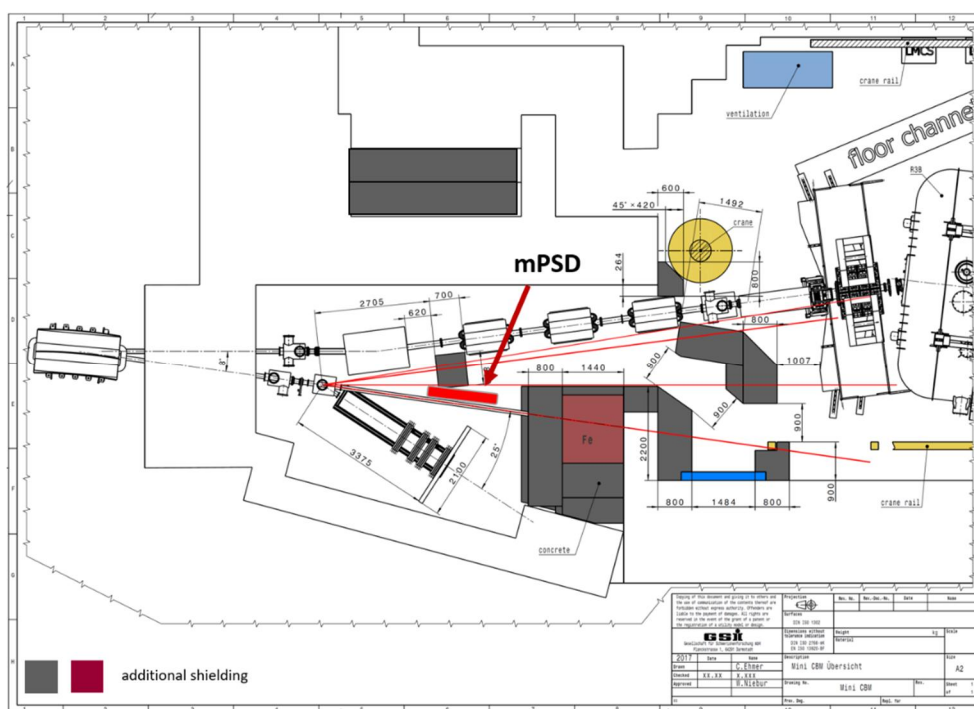


Рисунок 67. Схема размещения mPSD на установке mCBM.

В 2017 г. было подписано соглашение между ИЯИ РАН, ОИЯИ и CBM коллаборацией о сотрудничестве в рамках программы ФАИР-фаза-0 по использованию части модулей, изготовленных в ИЯИ для эксперимента CBM, в новом переднем калориметре ZDC установки BM@N, рис 23, слева. Калориметр ZDC будет состоять из 16 центральных модулей с поперечными размерами $15 \times 15 \text{ см}^2$, которые изготовлены в ИЯИ РАН для переднего адронного калориметра установки МПД на ускорительном комплексе НИКА и 27 модулей калориметра CBM с поперечными размерами $20 \times 20 \text{ см}^2$, рис 68, справа.

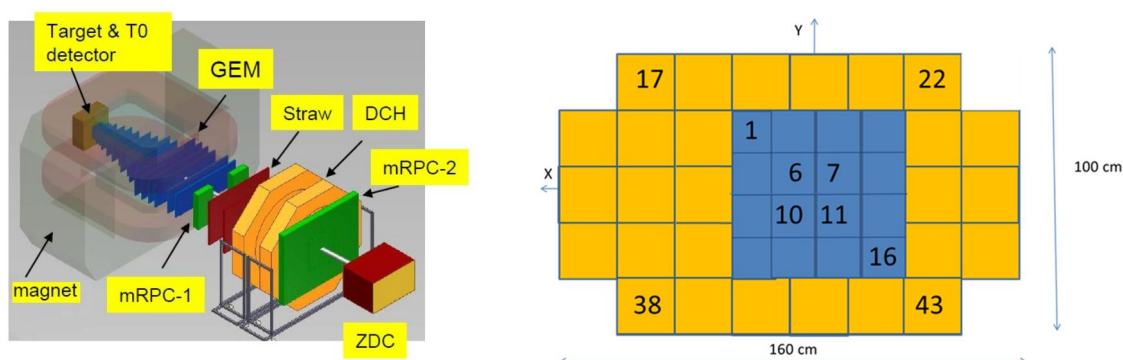


Рисунок 68. Слева - схема установки BM@N. Справа - схема калориметра ZDC.

В 2017г. группой ИЯИ РАН была разработана конструкция этого калориметра с использованием модулей калориметра установки CBM. Проведено моделирование точности определения центральности и точности определения угла плоскости реакции этим

калориметром. Показано, что точность определения угла плоскости реакции в этом эксперименте будет примерно такой же, как и в эксперименте CBM.

Начата подготовка к сборке калориметра из модулей калориметра CBM в ОИЯИ, которую планируется завершить к концу 2018г. Завершена подготовка к сеансу по измерению отклика модуля калориметра CBM на пучках углерода, аргона и криптона на установке BM@N. Модуль установлен на установке BM@N, рис. 69, и подготовлен к измерениям, которые планируется провести в феврале 2018г.



Рисунок 69. Расположение модуля адронного калориметра на BM@N, для проведения измерений на пучках ионов углерода, аргона и криптона.

Список цитируемой литературы

- [1] K. Fukushima and T. Hatsuda. The phase diagram of dense QCD. *Rept. Prog. Phys.*, 74:014001, 2011.
- [2] S. Borsanyi et al. Is there still any T_c mystery in lattice QCD? Results with physical masses in the continuum limit III. *JHEP*, 09:073, 2010.
- [3] A. Bazavov et al. The chiral and deconfinement aspects of the QCD transition. *Phys. Rev.*, D85:054503, 2012].
- [4] Y. Aoki et al. The Order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics. *Nature*, 443:675–678, 2006.].
- [5] Z. Fodor and S. D. Katz. Critical point of QCD at finite T and μ , lattice results for physical quark masses. *JHEP*, 04:050, 2004.
- [6] A. Andronic et al. Hadron Production in Ultra-relativistic Nuclear Collisions: Quarkyonic Matter and a Triple Point in the Phase Diagram of QCD. *Nucl. Phys.*, A837:65–86, 2010.

- [7] A. Schmah et al. Highlights of the Beam Energy Scan from STAR. *Central Eur. J.Phys.*, 10:1238–1241, 2012.
- [8] A. Aduszkiewicz et al. NA61/SHINE at the CERN SPS: Plans, status and first results. *Acta Phys. Polon.*, B43:635, 2012.
- [9] D. Blaschke et al. Topical issue on Exploring Strongly Interacting Matter at High Densities - NICA White Paper. *The European Physical Journal A*, 52(8):1–1, 2016.
- [10] W. Ehehalt and W. Cassing. Relativistic transport approach for nucleus nucleus collisions from SIS to SPS energies. *Nucl. Phys.*, A602:449–486, 1996.
- [11] A. Andronic, P. Braun-Munzinger, and J. Stachel. Hadron production in central nucleus-nucleus collisions at chemical freeze-out. *Nucl. Phys.*, A772:167–199, 2006.
- [12] T. Ablyazimov et al. Challenges in QCD matter physics –The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR. *Eur. Phys. J.*, A53(3):60, 2017.
- [13] T. Ablyazimov et al. Challenges in QCD matter physics –The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR. *Eur. Phys. J.*, A53(3):60, 2017.
- [14] CBM Collaboration. CBM Report 2012-01, Nuclear matter physics at SIS-100, 2011.
- [15] B. Friman et al. The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory experiments. *Lect. Notes Phys.*, 814:pp.1–980, 2011.
- [16] S.Uozumi et al., NIM A487 (2002) 389-429
- [17] Y.Fujii, NIM A453 (2000) 237-241.
- [18] PSD TDR, <https://repository.gsi.de/search?p=id:%22GSI-2015-02020%22>
- [19] 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
- [20] Radiation hardness of Silicon Photomultipliers for CBM@FAIR, NA61@CERN and BM@N experiments 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 Accepted at NIM A, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.066>

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В АДРОН-ЯДЕРНЫХ И ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НА УСТАНОВКЕ HADES (GSI, ГЕРМАНИЯ)

Научный руководитель к.ф.-м.н. Губер Ф.Ф.

В 2017 году работа по эксперименту ХАДЕС проводилась российскими группами по следующим основным направлениям:

- Проведение работ по модернизации переднего сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall), который планируется использовать в эксперименте Ag+Ag при энергии налетающих ядер серебра 1.65 АГэВ на ускорителе SIS18 в 2018 году.

- Сборка, тестирование и установка модулей нового электромагнитного калориметра установки ХАДЕС. Частично собранный электромагнитный калориметр будет использован уже в эксперименте на ионах серебра действующего ускорителя SIS18 в GSI в 2018 г. В 2019 г. году планируется завершить полную сборку калориметра.

- Проведение работ по определению центральности в столкновениях ионов золота Au+Au при энергии и налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с помощью переднего годоскопа FW (Forward Wall) установки HADES. Исследовались возможность определения центральности столкновений с помощью распределения по множественности хитов в FW годоскопе. Данный метод позволит избежать различных автокорреляций, которые могут быть достаточно велики при стандартном методе определения центральности с помощью количества хитов в TOF детекторах или MDC.

- Проведение работ по анализу систематики при расчетах коллективных потоков и заряженных частиц в экспериментальных данных по столкновению ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке ХАДЕС в 2012 г. Исследованы эффекты, связанные с высокой плотностью треков в центральных на измеренные величины коллективных потоков и методы их коррекции.

Группы ИЯИ РАН (10 чел. из них 3 молодых ученых. Коллаборация ХАДЕС включает 18 Институтов из 9 Европейских стран.

Экспериментальная установка ХАДЕС

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, которые перекрывают область полярных углов в диапазоне от 18° до 88° и практически полный азимутальный угол. Поперечное сечение двух противоположных секторов показано на Рис. 1. При такой геометрии акцептанс установки в области промежуточных быстрот для дилептонных пар достаточно большой и составляет $\sim 40\%$.

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 камкры, имеют временное разрешение порядка 80 псек [2], а сцинтилляционный годоскоп TOF [3] - порядка 180 псек. Это позволяет с высокой эффективностью идентифицировать заряженные частицы в столкновениях тяжелых ядер.

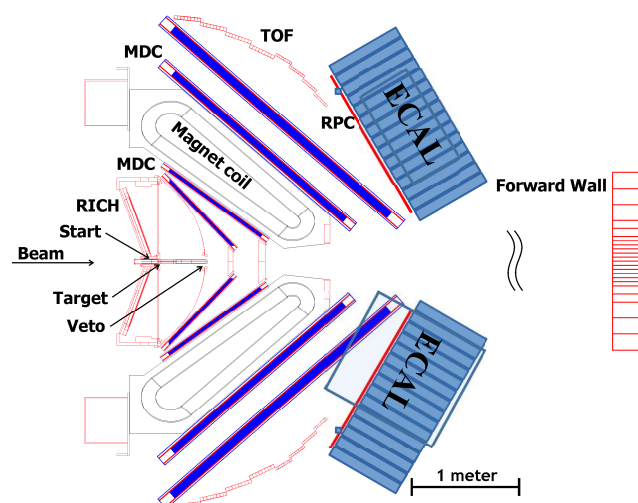


Рисунок 70. Схема установки ХАДЕС

Для идентификации электронов, помимо описанной выше времяпролетной системы, используется кольцевой черенковский пороговый детектор (RICH) расположенный в области вокруг мишени, где отсутствует магнитное поле. Дополнительно, также для этой цели, в области передних углов ранее использовался предливневый детектор (SHOWER), который в настоящее время заменяется 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]. Определяющий вклад в создание и обслуживание этого годоскопа внесла группа ИЯИ РАН. Этот годоскоп был впервые использован на установке ХАДЕС для идентификации пр взаимодействий при исследовании образования электрон-позитронных пар в dp реакции при энергии налетающих дейтронов 1.24 ГэВ на нуклон [5]. Годоскоп располагается на расстоянии 7 м от мишени мишенью и перекрывал область полярного угла от 0,33 до 7,17 градусов. После значительной модернизации переднего годоскопа, проведенной группой ИЯИ РАН, он был использован в 2012г. 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 событийном анализе данных и использование этой информации для анализа потоков заряженных частиц в данной реакции.

Модернизация переднего годоскопа установки ХАДЕС и его калибровка на космических мюонах в 2017г.

В 2017 г. были проведены работы по модернизации переднего сцинтилляционного годоскопа, предназначенного для измерения геометрии ядро-ядерных столкновений, центральности и ориентации плоскости реакции. Передний годоскоп является одной из детекторных систем экспериментальной установки ХАДЕС и единственным детектором установки ХАДЕС, регистрирующим частицы в области больших быстрот, в основном, спектаторов – фрагментов ядер пучка, не участвующих во взаимодействии. Этот годоскоп планируется использовать в эксперименте ХАДЕС для определения центральности соударений и ориентации угла плоскости реакции при исследовании реакции $Ag+Ag$ на пучке ионов серебра с энергией 1.65 АГэв ускорителя SIS18 в середине 2018 г.

Передний годоскоп установки ХАДЕС в настоящее время представляет собой многоканальную систему сцинтилляционных детекторов для регистрации заряженных частиц. На рис. 71 слева представлена схема геометрического расположения детекторных ячеек переднего годоскопа установки ХАДЕС. Справа показана фотография фронтальной стороны переднего годоскопа, закрытой светоизолирующей плёнкой, и модулей высоковольтного HV-

питания на передвижной платформе. Для оптимизации акцептанта и уменьшения вклада систематических ошибок в определение угла плоскости реакции была выбрана симметричная геометрия расположения сцинтилляционных ячеек.

Передний годоскоп состоит из 288 сцинтилляционных детекторных ячеек: 140 ячеек – в центральной области, 64 ячейки – в средней области и 84 ячейки – во внешней области. В центральной области годоскопа используются детекторные ячейки малого размера (сцинтилляторы с активной площадью $4 \times 4 \text{ см}^2$). В средней области годоскопа используются детекторные ячейки среднего размера (сцинтилляторы с активной площадью $8 \times 8 \text{ см}^2$). И, наконец, во внешней области годоскопа используются детекторные ячейки большого размера (сцинтилляторы с активной площадью $16 \times 16 \text{ см}^2$). Толщина всех сцинтилляционных детекторных ячеек составляет 2,54 см. В качестве радиаторов используется пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола BC408. В геометрическом центре (по оси пучка) переднего годоскопа имеется отверстие размером $8 \times 8 \text{ см}^2$ для пропускания первичного пучка релятивистских частиц. Полный поперечный размер переднего годоскопа – $180 \times 180 \text{ см}^2$.

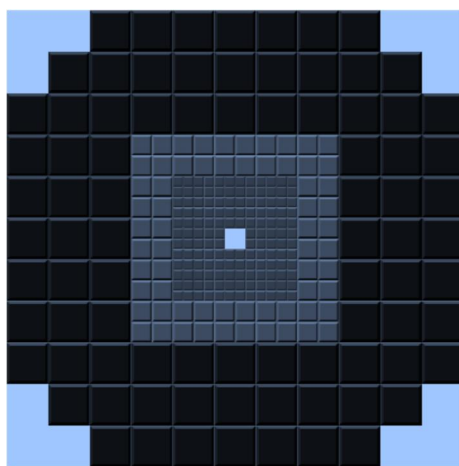


Рисунок 71. Слева - схема геометрического расположения сцинтилляционных детекторных ячеек в переднем годоскопе установки ХАДЕС. Справа - фронтальный вид переднего годоскопа (под защитной плёнкой).

Каждая отдельная сцинтилляционная детекторная ячейка переднего годоскопа состоит из следующих функциональных элементов (рис. 72):

1. Пластмассовый сцинтиллятор BC408.

2. «Воздушный» световод с корпусом из алюминиевого сплава с полированной внутренней светоотражающей поверхностью. Световод используется для собирания света со сцинтиллятора на фотокатод ФЭУ.

3. ФЭУ типа ХР2982 для детекторных ячеек малого размера в центральной части переднего годоскопа и ФЭУ типа ХР2262 для детекторных ячеек среднего и большого размеров в промежуточной и внешней областях годоскопа.

4. Делитель высокого напряжения для питания ФЭУ.

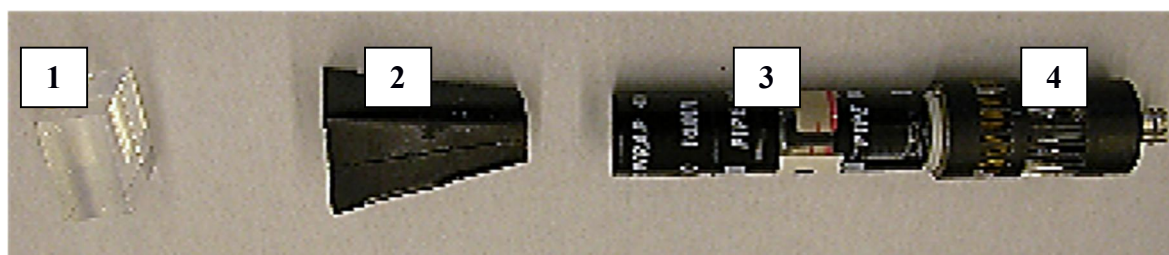


Рисунок 72. Функциональные элементы сцинтилляционной детекторной ячейки переднего годоскопа.

Необходимость в модернизации переднего годоскопа была вызвана несколькими причинами:

1. В связи с установкой электромагнитного калориметра доступная площадь в экспериментальном зале резко уменьшается, что приводит к необходимости модификации существующей механической платформы переднего годоскопа.

2. В связи с установкой рельсовой системы передвижения механической платформы электромагнитного калориметра необходимо совместить платформу переднего годоскопа с данной рельсовой системой.

3. Часть ячеек сцинтилляционного годоскопа показала неустойчивую работу в предыдущих экспериментальных сеансах. Было установлено, что основные проблемы связаны с нестабильной работой фотоэлектронных усилителей в нескольких сцинтилляционных ячейках вблизи оси пучка, где интенсивность загрузки детекторов является максимальной.

Первые две проблемы были решены в 2017 г. путем модификации существующей механической платформы. Было определено оптимальное положение платформы относительно несущей конструкции электромагнитного калориметра, позволяющее избежать пространственного конфликта в процессе сборки электромагнитного калориметра, рис. 73. Нижняя часть платформы была уменьшена в размерах. Расстояние между стойками платформы было подобрано таким образом, чтобы они входили в зазор между рельсами системы передвижения электромагнитного калориметра.

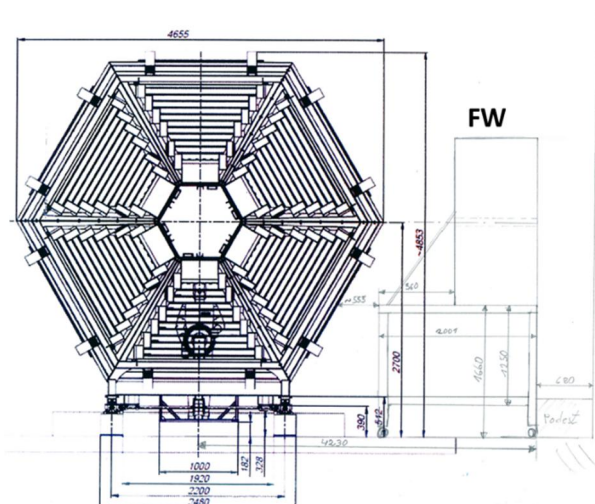


Рисунок 73. Взаимное расположение несущей конструкции электромагнитного калориметра (слева) и механической платформы переднего годоскопа (справа), позволяющее избежать пространственного конфликта в процессе сборки электромагнитного калориметра.

Следующая часть работы по модификации переднего годоскопа связана с проверкой работы сцинтилляционных ячеек годоскопа и заменой фотоумножителей в ячейках с нестабильным режимом работы. Проверка ячеек годоскопа была выполнена путем 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 (плоскости годоскопа). Как известно, энерговыделение (и как следствие, число образовавшихся фотонов) от космических мюонов пропорционально длине пробега мюона в сцинтилляторе, и для переднего годоскопа зависит от поперечных размеров центральных, средних и внешних детекторных ячеек. Амплитудные спектры от космических мюонов в различных типах детекторных ячеек приведены на рис. 74. Левый узкий пик соответствует пьедесталу. Средний пик в 550 канале соответствует энерговыделению от мюонов, которые прошли только через края детекторной ячейки. Правый пик соответствует энерговыделению от вертикальных мюонов, прошедших через всю ячейку. Как видно из рис. 74, амплитуды пиков для вертикальных мюонов, прошедших через всю ячейку, пропорциональны поперечным размерам детекторной ячейки. Числа в скобках соответствуют отношению поперечных размеров ячейки к толщине ячейки вдоль оси пучка.

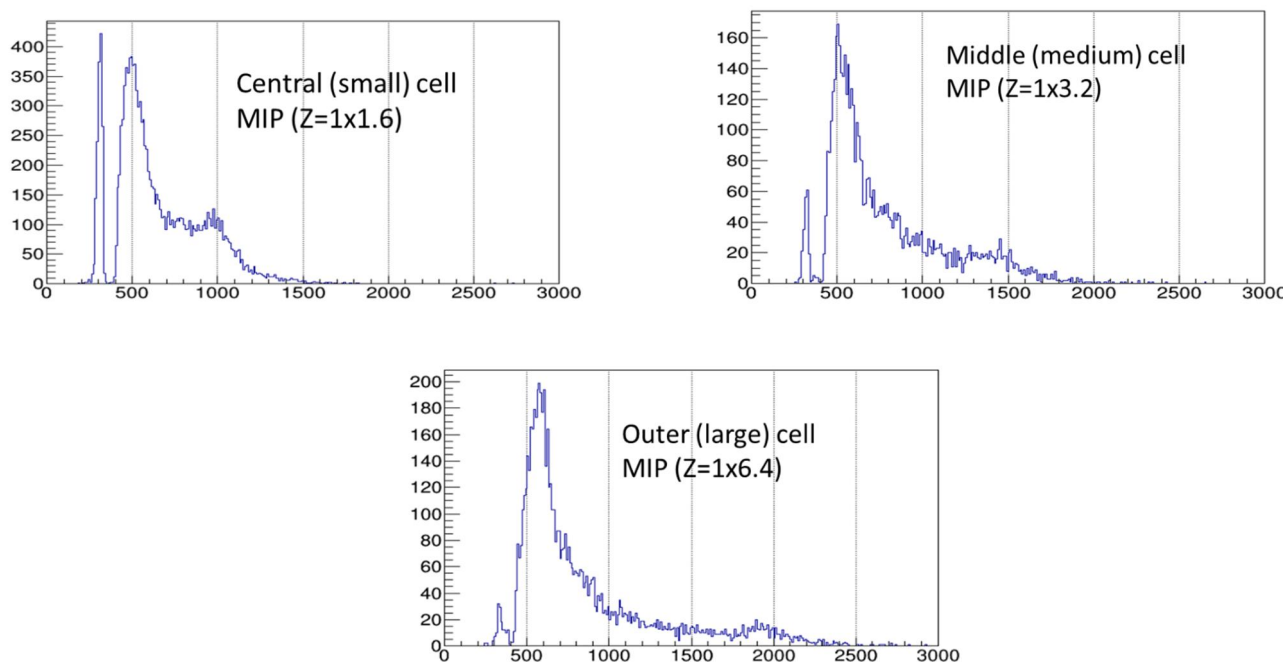


Рисунок 74. Амплитудные спектры от космических мюонов, прошедших через центральную (левый верхний рисунок), среднюю (правый верхний рисунок) и внешнюю (нижний рисунок) детекторные ячейки переднего годоскопа. Первый пик в гистограммах соответствует пьедесталу, второй пик – от мюонов с низким энергосодержанием.

По итогам измерений всех сцинтилляционных ячеек годоскопа была построена суммарная гистограмма скорости счета в зависимости от номера ячейки, рис. 75. Как видно, часть ячеек показала высокий уровень счета, вызванный шумами фотоэлектронных умножителей. В некоторых каналах сигнал отсутствовал из-за плохого контакта в выходных разъемах.

По результатам измерений была проведена замена трех фотоумножителей, показывающих высокий уровень шума. Также были исправлены разъемы кабелей в каналах, в которых отсутствовали сигналы. Итогом данной работы было обеспечение корректной работы всех ячеек переднего годоскопа и всех электронных каналов съема информации.

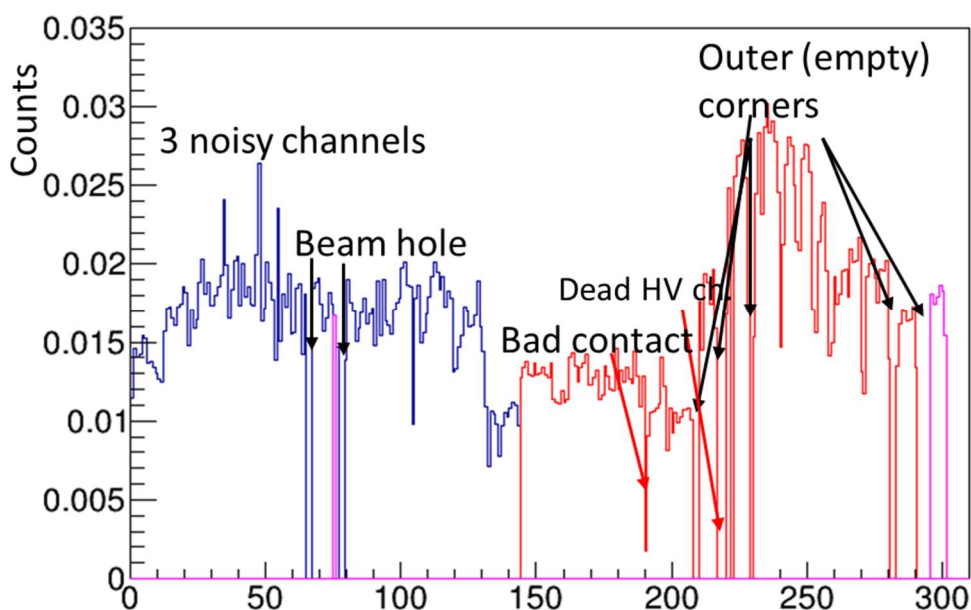


Рисунок 75. Суммарная информация по скорости счета в сцинтилляционных ячейках годоскопа в зависимости от номера ячейки.

Сборка и тестирование электромагнитного калориметра установки ХАДЕС в 2017г.

В настоящее время в ГСИ (г. Дармштадт, Германия) с участием группы ИЯИ разработан новый электромагнитный калориметр (ECAL), состоящий из 978 черенковских детекторных модулей с радиаторами на основе свинцового стекла [6,7]. ECAL позволит выполнить точные измерения инклюзивных сечений рождения π^0 и η -мезонов и улучшить идентификацию электронов и позитронов с импульсами, большими 400 МэВ/с при измерениях спектров инвариантных масс дилептонных пар в эксперименте ХАДЕС в энергетической области SIS18 и SIS100 (FAIR). ECAL заменит в эксперименте ХАДЕС Pre-Shower-детектор (см. рис.1), установленный в передней области азимутальных углов $18^\circ < \theta < 45^\circ$. Проведенные ранее тесты детекторных ECAL-модулей на пучке фотонов и детальное моделирование показали, что энергетическое разрешение ECAL составляет $(5 - 6) \% \cdot E^{-1/2}$, что позволит провести идентификацию η -мезонов в предстоящем эксперименте по столкновению ядер Ag + Ag при 1,65 AGeV/c и в будущих измерениях на ускорителе SIS100 в экспериментах по столкновению ядер Ni + Ni в диапазоне энергий 2 - 8 AGeV.

В 2017 г. продолжались начатые ранее работы по его сборке, стендовым испытаниям детекторных ECAL-модулей на космическом излучении и монтаж испытанных модулей в секторах основной конструкции ECAL.

Схема расположения электромагнитного калориметра ECAL на установке ХАДЕС показана на рис. 76. Базовая конструкция ECAL определяется геометрией установки ХАДЕС – шесть отдельных секторов, покрывающих полярные углы между 12° и 45° и почти полный

азимутальный угол. Общая площадь калориметра ECAL составляет около 8 м^2 . ECAL состоит из 978 черенковских детекторных модулей с радиаторами из свинцового стекла (163 модуля в каждом секторе).

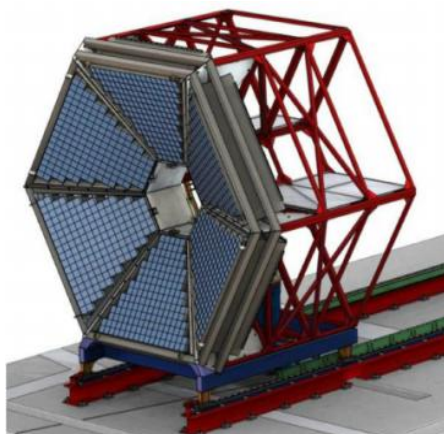


Рисунок 76. Конструкция электромагнитного калориметра ECAL на установке ХАДЕС.

Черенковский детекторный ECAL-модуль (рис. 8) состоит из радиаторного блока из свинцового стекла CEREN25 (1) размером $92 \times 92 \times 420 \text{ мм}$, обернутого бумагой фирмы Tyvek, ФЭУ (2), защитной алюминиевой крышки (3), корпуса детекторного модуля из латуни (4) и оптической LED-системы (5). Свинцовое стекло CEREN25 имеет следующие основные свойства: радиационная длина (X_0) – 2,51 см, показатель преломления – 1,708 (при $\lambda = 400 \text{ нм}$) 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). Мультиканальную карту RADIWA планируется использовать в качестве системы считывания. Модули ECAL тестируются с ФЭУ Hamamatsu R6091 (3-дюймовый фотокатод) и ФЭУ THORN EMI 9903 (1,5-дюймовый фотокатод). ФЭУ THORN EMI используются в некоторых модулях из-за проблем с финансированием закупки новых ФЭУ Hamamatsu R6091.

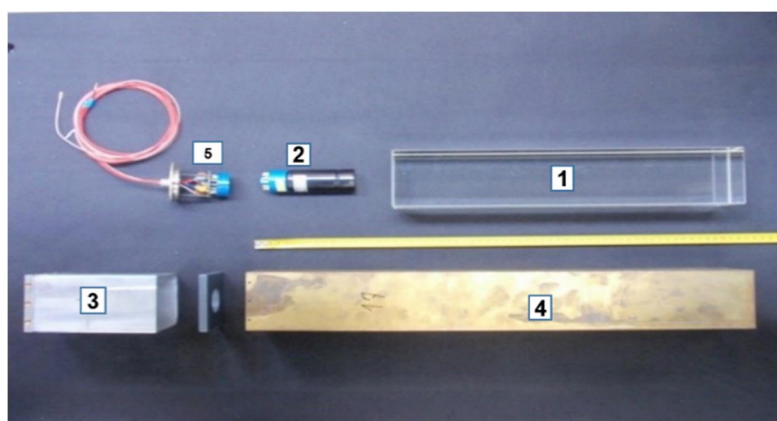


Рисунок 77. Конструкция черенковского детекторного ECAL-модуля: 1 – радиаторный блок из свинцового стекла CEREN25; 2 – ФЭУ; 3 – Алюминиевая крышка; 4 – Корпус детекторного модуля из латуни; 5 – ВВ делитель и оптическая LED-система.

Перед установкой модулей на специальную платформу на установке ХАДЕС каждый из модулей калориметра тестировался на 2х стендах, созданных группой ИЯИ в GSI. Один из таких стендов показан на рис. 78. На этих стендах можно одновременно проводить измерения 8 детекторных ECAL-модулей на космическом излучении.

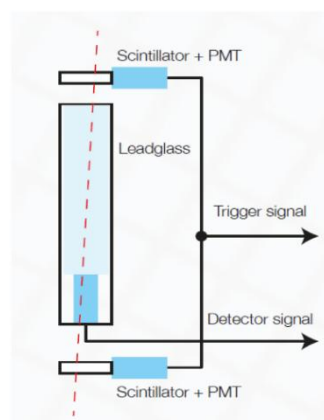
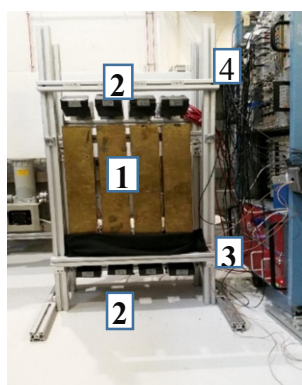


Рисунок 78. Слева - фотография 4-канальной секции испытательного стенда для измерения ECAL-модулей на космических мюонах. (1) – измерительные каналы для ECAL-модулей; (2) – сцинтилляционные триггерные детекторы; (3) – HV-источник питания; (4) – NIM-крейты с электронными модулями. Справа - функциональная схема испытательного стенда.

Основные цели стендовых испытаний ECAL-модулей:

выбор рабочего значения HV-напряжения на ФЭУ Hamamatsu R6091 и THORN EMI 9903 в испытываемых модулях, исходя из требуемой величины средней амплитуды сигнала -

1500 мВ в условиях регистрации космического излучения и световых импульсов от LED-оптической системы;

- изучение возможностей использования LED-оптической системы для амплитудной калибровки индивидуальных модулей;
- оценка амплитудного (энергетического) разрешения детекторного ECAL-модуля при измерении спектров космических частиц;
- выявление дефектных модулей и их подготовка для соответствующего ремонта;
- выработка рекомендаций для сборки и монтажа модулей.

В 2017 г. были собраны и проведены стендовые испытания 278 ECAL-модулей. В результате проведенных измерений на космическом излучении и с использованием LED-оптической системы были выбраны рабочие значения HV-напряжения для испытываемых ECAL-модулей. Пример амплитудного спектра (1) и интегрального зарядового спектра (2) для одного из ECAL-модулей показан на рис. 79. Рабочее значение HV-напряжения определялось на основе среднего значения амплитудного спектра сигнала. На рис. 79 среднее значение амплитудного спектра (1) составляет -1500 В.

В стендовых испытаниях на космическом излучении проведена оценка энергетического разрешения детекторных ECAL-модулей, которое определялось по интегральным зарядовым спектрам. Энергетическое разрешение ECAL-модуля с 3-дюймовым ФЭУ составило 8-9%, а энергетическое разрешение ECAL-модуля с 1,5-дюймовым ФЭУ составило 11-19% для интегральных спектров.

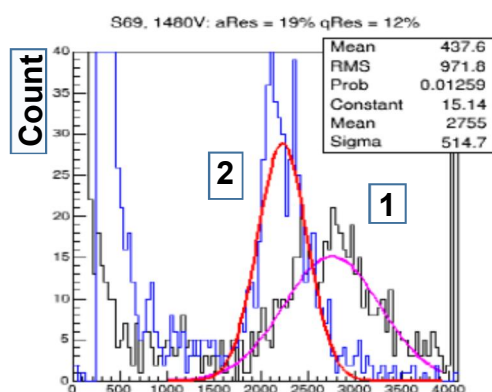


Рисунок 79. Пример амплитудного (1) и интегрального зарядового (2) спектров космических мюонов для одного из ECAL-модулей.

В 2017 г. проведён монтаж испытанных модулей в секторах №№ 3 и 6 на основной платформе ECAL на установке ХАДЕС. На рисунке 11 показаны полностью собранные сектора № 3 и № 6 ECAL на крепёжной раме с установленными 163 модулями и частично собранный

сектор № 5 калориметра ECAL (состояние на начало декабря 2017г.). До середины 2018 г. планируется полностью собрать сектора 2 и 5.

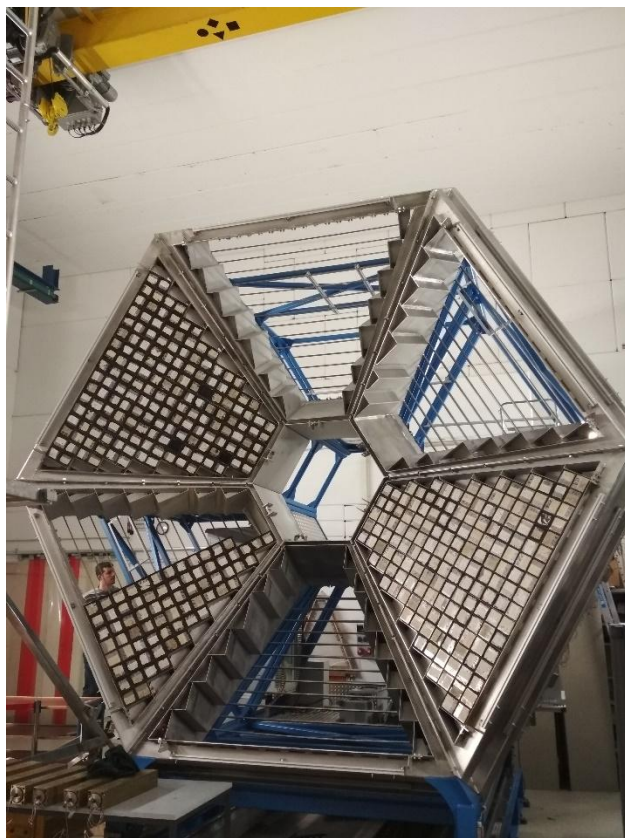


Рисунок 80. Статус сборки ECAL на установке ХАДЕС (состояние на начало декабря 2017г). Полностью собраны из отдельных детекторных модулей сектора 3 и 6. Сектор 5 собран частично.

Результаты испытаний ECAL-модулей представлены в докладах на совещании коллаборации ХАДЕС и международной конференции ICPPA2017, а также подготовлена и отправлена в печать статья.

Разработка методов определения центральности в столкновениях тяжелых ионов золота $Au+Au$ при энергии и налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с помощью переднего годоскопа установки HADES.

Размер и эволюция среды, образованной в столкновениях тяжелых ионов, должны зависеть от энергии столкновения и от начальной геометрии, которая не может быть измерена непосредственно. В данный момент в эксперименте ХАДЕС при анализе экспериментальных данных по столкновениям ядер золота при энергии налетающих ядер золота 1.24 АГэВ, центральность столкновений характеризуются множественностью треков в MDC или количеством хитов в TOF+RPC системе.. Для этого столкновения разделяются на классы по центральности, где класс наиболее центральных столкновений содержит события с наибольшей

множенностью в MDC TOF+RPC, что соответствует наименьшему импакт-параметру [8]. Однако, данный метод определения центральности может приводить к различным видам автокорреляций.

В 2017г начата работа по разработке метода отбора событий по классам центральности используя распределение по хитам в переднем годоскопе FW и определения параметров модели Глаубера для данных классов. Модель Глаубера используется для определения геометрических переменных с измеренными величинами (например, множественность частиц), в ней образование частиц основано на отрицательном биномиальном распределении (НБД) [9]. Монте-Карло версия модели Глаубера определяет для события с заданным прицельным параметром (b) соответствующее число участников столкновений (N_{part}). Множенностью хитов в годоскопе FW на нуклон-нуклонное столкновение параметризуется НБД. Чтобы применить эту модель к любому столкновению с заданным значением N_{part} , вводится понятие независимых источников излучения. В этом подходе множественность хитов в годоскопе моделируется как сумма частиц, образованных из набора независимых источников излучения. Каждый источник излучения производит частицы в соответствии с отрицательным биномиальным распределением (НБД) со средним значением (μ) и шириной (σ). Полное сечение и узловая точка (значение, ниже которого определение центральности не достоверно) были определены при помощи фитирования распределения множественности хитов в переднем годоскопе FW распределением, сгенерированным моделью Глаубер-Монте-Карло [2].

Предварительные результаты для распределений средних значений прицельного параметра в классах центральности.

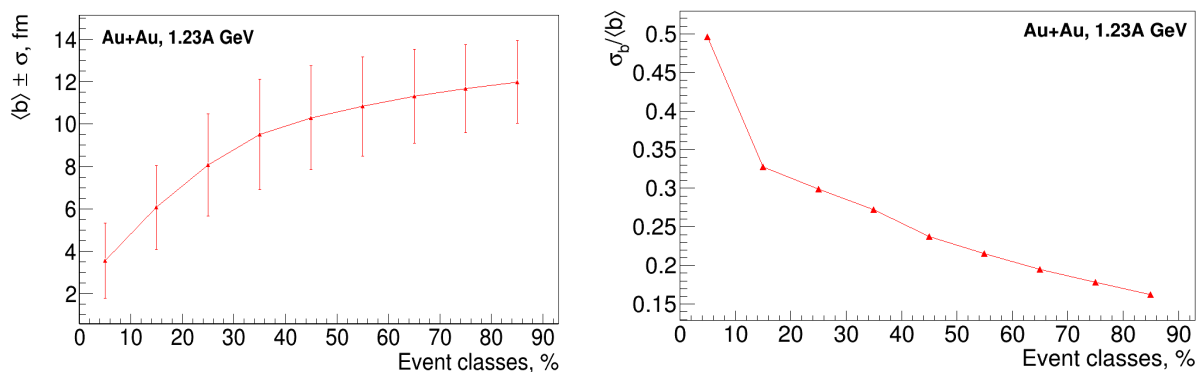


Рисунок 81. Слева - распределение прицельного параметра. Справа - распределение разрешения прицельного параметра в классах центральности.

В 2018г. планируется определить соответствующие систематические погрешности данной процедуры и сравнить результаты с процедурой определения центральности с помощью множественности треков в MDC или количества хитов в TOF+RPC системе установки ХАДЕС.

Исследование коллективных потоков и азимутальных корреляций заряженных частиц в столкновениях тяжелых ионов золота Au+Au при энергии и налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон

Анизотропные потоки, проявляющие себя в анизотропии испускания частиц в плоскости, поперечной направлению пучка, являются одним из важных наблюдаемых чувствительных к транспортным свойствам: уравнению состояния, скорости звука и значению удельной вязкости сдвига η/s . Азимутальная анизотропия получаемых частиц может быть количественно описана Фурье коэффициентами v_n в разложении азимутального распределения частиц:

$$\frac{dN}{d(\varphi - \Psi_n)} \sim 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos(n(\varphi - \Psi_n)),$$

где φ – азимутальный угол частиц данного типа и Ψ_n – азимутальный угол плоскости события порядка n . Новые возможности по изучению коллективных азимутальных потоков появились благодаря недавно полученным на установке HADES экспериментальным данным с высокой статистикой в реакции Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон. Изучение зависимости коллективных потоков разных гармоник от центральности и типа частиц поперечного импульса, быстроты является основным инструментом для получения информации об уравнении состояния ядерной материи. В качестве примера на рисунке 82 показаны предварительные результаты коллаборации ХАДЕС для зависимости от быстроты для прямого потока (v_1), эллиптического потока (v_2) и треугольного потоков (v_3) протонов образованных в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон. Анализ коллективных потоков для системы Au+Au, ведущийся в ИЯИ РАН, НИЯУ МИФИ и ГСИ близок к завершению. В 2017г., группа ИЯИ совместно с МИФИ продолжила изучение возможных систематических эффектов в этих результатах. В частности, был закончен анализ систематики в определении плоскости симметрии столкновений и ее разрешения.

Проведенный анализ показывает, что метод двух случайных подсобытий, который традиционно использовался для определения разрешения плоскости события на протяжении последних нескольких лет, ведет к систематическому завышению величины разрешения на 10-20% в зависимости от центральности. Основной причиной этого является присутствие так называемых «нон-флоу» эффектов, вызванных близкоскодействующими корреляциями хитов, не связанных с общей плоскостью симметрии столкновения. Предложенный метод трех подсобытий, разделенных интервалом по псевдо-быстроте, позволяет решить эту проблему. Окончательные результаты данной работы были опубликованы в [10].

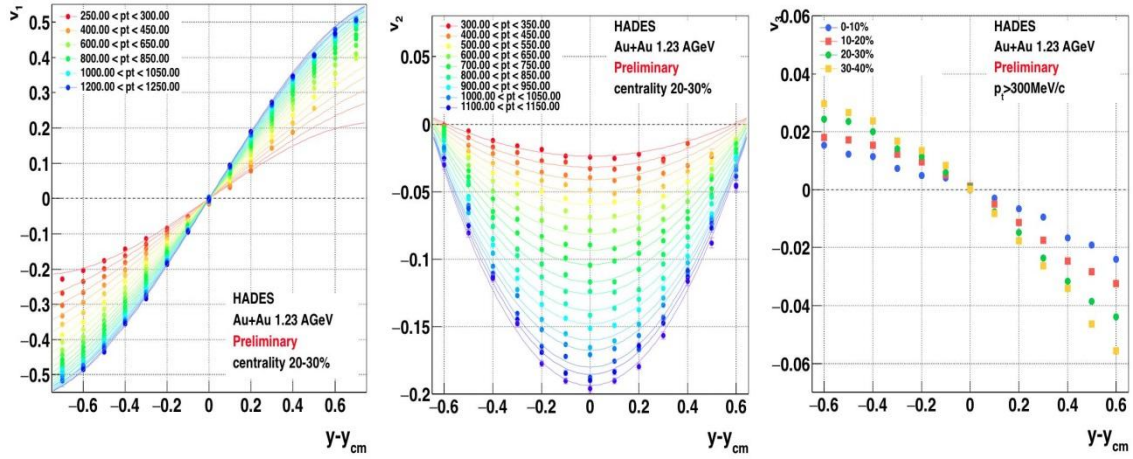


Рисунок 82. Предварительные результаты коллаборации ХАДЕС зависимости для прямого потока (v_1), эллиптического потока (v_2) и треугольного потоков (v_3) протонов образованных в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон от быстроты.

Дальнейшее детальное рассмотрение предварительных результатов измерения коллективных потоков в реакции Au+Au выявило наличие детекторных эффектов, связанных с высокой плотностью треков в центральных столкновениях. Например, левая часть Рис.14 показывает предварительные данные для зависимости прямого потока потока (v_1) отрицательных пионов от быстроты частицы для разных интервалов по центральности. Для симметричных систем, которые мы изучаем, $v_1(y)$ должна быть асимметричной относительно средней быстроты ($y_0 = 0$), в частности $v_1(0)$ должна быть равна нулю. Как мы видим из рис. 14, слева, $v_1(y)$ не пересекает ноль в ($y_0 = 0$) и величина офсета увеличивается с увеличением центральности. Подобный эффект наблюдался экспериментом FORI и был объяснен сильной зависимостью эффективности реконструкции от множественности треков (оссурансу effect). Используя метод коррекции, предложенной коллаборацией FORI, необходимые коррекции были сделаны, рис. 83, справа.

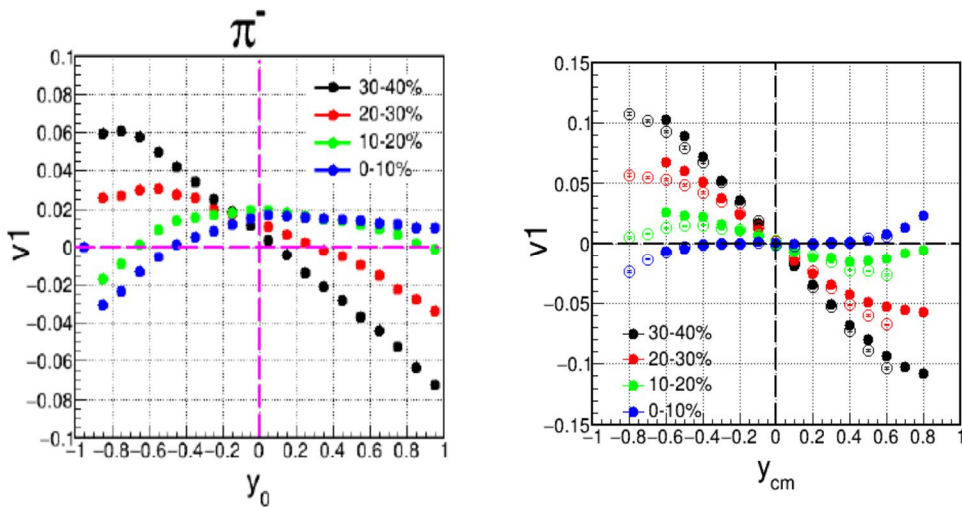


Рисунок 83. Слева, предварительные данные для зависимости прямого потока потока (v_1) отрицательных пионов от быстроты частицы для разных интервалов по центральности в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон до коррекции детекторных эффектов, связанных с высокой плотностью треков в центральных столкновениях. Справа, та же зависимость после коррекции этих эффектов.

В 2018 году будет продолжен анализ полученных на установке ХАДЕС экспериментальных данных по азимутальным потокам заряженных частиц в реакции столкновений ядер золота при энергии налетающих ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон. Планируется подготовить и опубликовать результаты анализа азимутальных потоков для протонов, дейтронов и тритонов.

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] K.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>.
- [5] Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС, О.В. Андреева, М.Б. Голубева, Ф.Ф. Губер, А.П. Ивашкин, А.Б. Курепин, А.И. Решетин, А.С. Садовский, Е.А. Усенко, ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2014, № 2, с. 13-30 DOI: 10.7868/S0032816214020141
- [6] Svoboda O, Blume C, Czyżycki W *et al* 2014 Electromagnetic calorimeter for the HADES@FAIR experiment *Journal of Instrumentation* 9 C05002
- [7] Czyżycki W *et al* 2011 Electromagnetic Calorimeter for HADES *arXiv*: 1109.5550
- [8] Centrality determination of Au+Au with HADES, HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) *et al.*). Dec 21, 2017. e-Print: [arXiv:1712.07993](https://arxiv.org/abs/1712.07993) [nucl-ex]
- [9] V. Klochkov “Centrality determination in heavy-ion collisions with the CBM experiment”, J. Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012059
- [10] Estimates of the collision symmetry planes in HADES experiment at GSI A.S. Zaytsev (NRNU MEPhI), I. Selyuzhenkov (NRNU MEPhI & EMMI). 2017. 5 pp. J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012064

5. ЭКСПЕРИМЕНТ MPD/NICA

Научный руководитель к.ф.-м.н. Ивашкин А.П.

В эксперименте MPD/NICA группа ИЯИ отвечает за разработку, изготовление и тестирование переднего адронного калориметра, который будет использован для определения центральности, а также для определения плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях.

В 2017 г. в рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Полностью подготовлен технический проект калориметра, состоящего из двух плеч, расположенных симметрично относительно точки взаимодействия. Всего калориметр включает 90 индивидуальных модулей.

В 2017 г. в ИЯИ РАН была изготовлена первая партия модулей переднего адронного калориметра, рис. 84. Поскольку адронный калориметр будет работать в сильном поле сверхпроводящего магнита, все элементы калориметра выполнены из немагнитных материалов, а регистрирующая электроника нечувствительна к магнитным полям. 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.

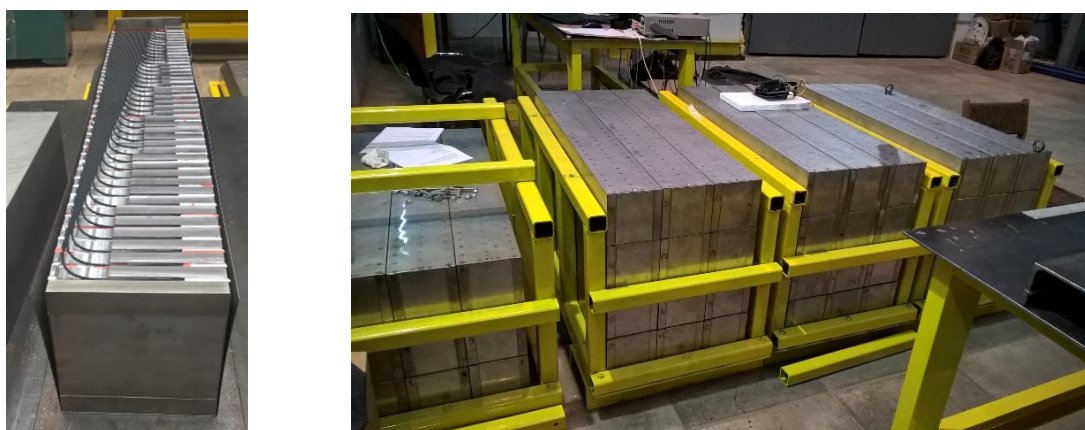


Рисунок 84. Слева - фото модуля калориметра в процессе сборки. Справа – фото нескольких собранных модулей адронного калориметра.

В создании адронного калориметра используются современные технологии захвата и транспортировки фотонов в переизлучающих оптоволоконных. Разработанные методы позволяют собирать световое излучение одновременно с десятков сцинтилляционных пластин большого размера и транспортировать фотоны к компактным фотодетекторам, размещенным в задней части калориметра, рис. 85. В качестве детекторов света используются новейшие

микропиксельные лавинные фотодиоды, способные детектировать сверхслабые световые сигналы на уровне одиночных фотонов.

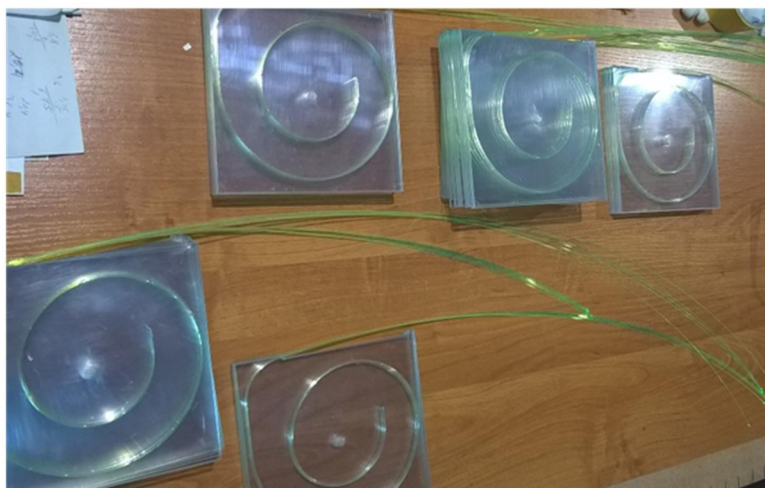


Рисунок 85. Фото активных элементов калориметра, сцинтилляторов и переизлучающих оптоволокон.

Были созданы несколько стендов для тестирования качества сцинтилляционных пластин с вклеенным оптоволоконном и микропиксельных лавинных фотодиодов, а также электроники.

Измерение параметров отдельных сцинтилляционных пластин для адронного калориметра эксперимента MPD, рис. 86, 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 Kuraray (Япония) типа Y11(200) S-type диаметром 1 мм. В калориметре эксперимента MPD используются пластины размером $15 \times 15 \times 0.4 \text{ см}^3$ с оптоволоконном, вклеенным в канавку спиралью. Глубина канавки составляет 1.2мм.

При прохождении через исследуемую пластину частицы, в сцинтилляторе возникает вспышка света. Фотоны, захватываемые спектросмещающим оптоволоконном, регистрируются микропиксельным лавинным фотодиодом (кремниевым фотоумножителем, SiPM). Для увеличения световыхода, противоположный конец оптоволоконна был покрыт слоем специальной светоотражающей краски на основе серебра.

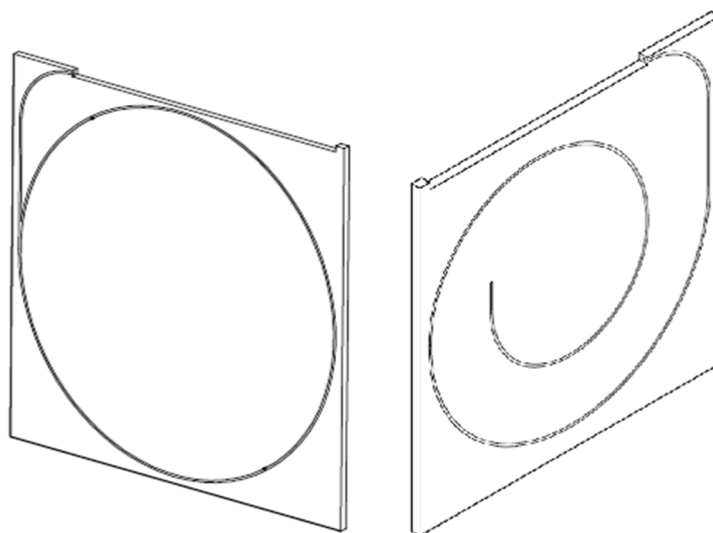


Рисунок 86. Внешний вид тестовых сцинтилляционных пластин для модулей адронного калориметра MPD.

Для измерения световыхода отдельных сцинтилляционных пластин был создан стенд, позволяющий проводить измерения с источником β -излучения Sr^{90} , рис. 87. В работе использовался фотодетектор HAMAMATSU MPPC S12572-010P размером 3x3 мм с паспортным усилением 1.35×10^5 , снабженный индивидуальным предусилителем с коэффициентом усиления 300. Питание фотодиода осуществлялось от лабораторного источника питания АКИП-1124. Рабочее напряжение фотодиода, при котором проводились измерения составляло 70.87В. 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 25мм 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 5ГГц. Для запуска АЦП использовался сигнал с ФЭУ. Оцифрованные сигналы считывались через шину USB и обрабатывались с помощью вычислительно-обрабатывающего пакета ROOT.

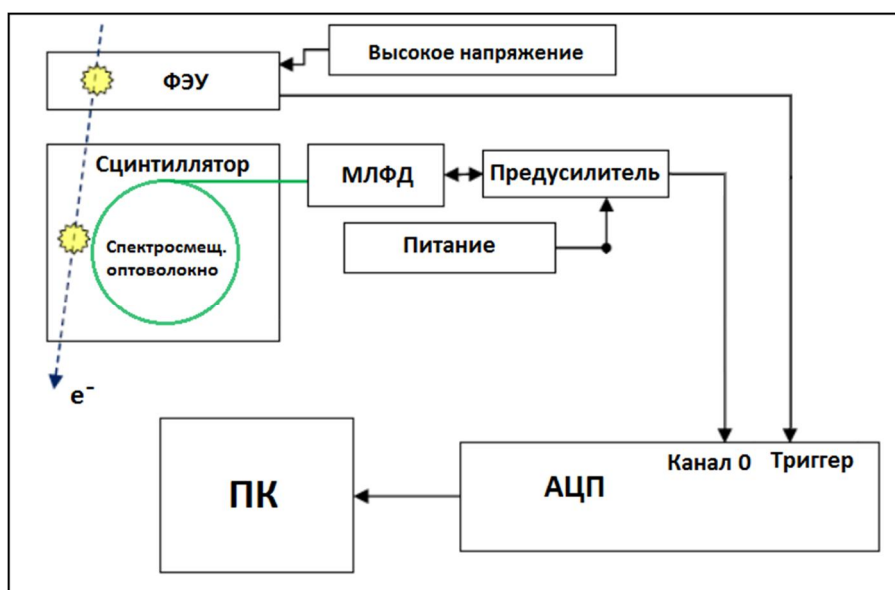


Рисунок 87. Схема установки для исследования световыхода сцинтилляционных пластин модулей адронного калориметра.

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. На рис. 88, в качестве примера, представлен зарядовый спектр фотоэлектронов, измеренный в центре сцинтилляционной пластины.

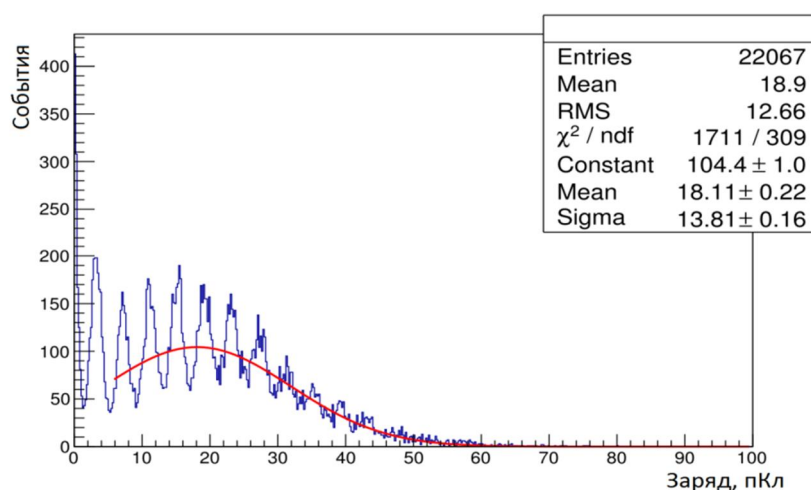


Рисунок 88 Зарядовый спектр фотоэлектронов, измеренный в центре сцинтилляционной пластины.

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, заданное на диаграмме в пКл, соответствует одному фотоэлектрону, что позволяет определить величину среднего заряда, выраженную в фотоэлектронах.

На первом этапе работы измерялись несколько типов пластин, различных по типу используемых отражателей и формы канавки для спектро-смещающих волокон, рис.6. В качестве отражателей использовались пленка TYVEK и/или поверхностный слой, образуемый на поверхности пластины в результате травления полистирола (поверхностный пенопласт).

Измерения световыхода проводились при различных положениях радиоактивного источника вдоль диагонали сцинтилляционных пластин. Первые результаты измерений показали большую пространственную неоднородность светосбора в случае поверхностного пенопласта. Поэтому основное внимание уделялось измерениям с отражателем TYVEK.

Исследования влияния формы канавки для оптоволокон на величину световыхода были проведены для двух типов канавок – круглой и спиральной. На рис. 89 приведены распределения световыходов пластин с круглой и спиральной канавками при сканировании радиоактивным источником вдоль диагонали сцинтилляционных пластин.

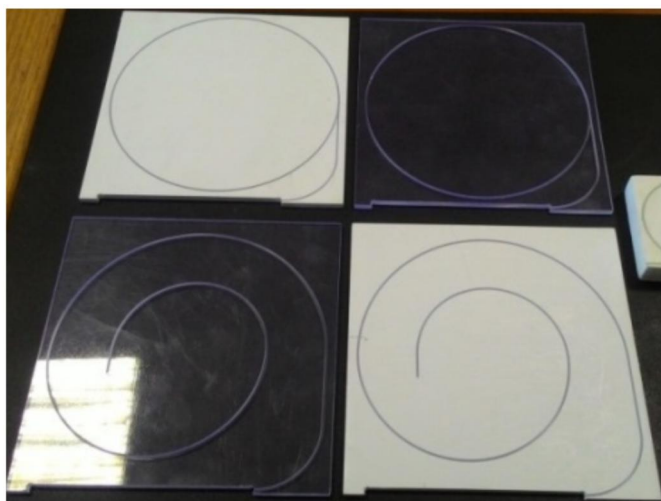


Рисунок 89. Фото различных типов сцинтилляционных пластин с различными отражателями и формами канавок для спектросмещающих волокон.

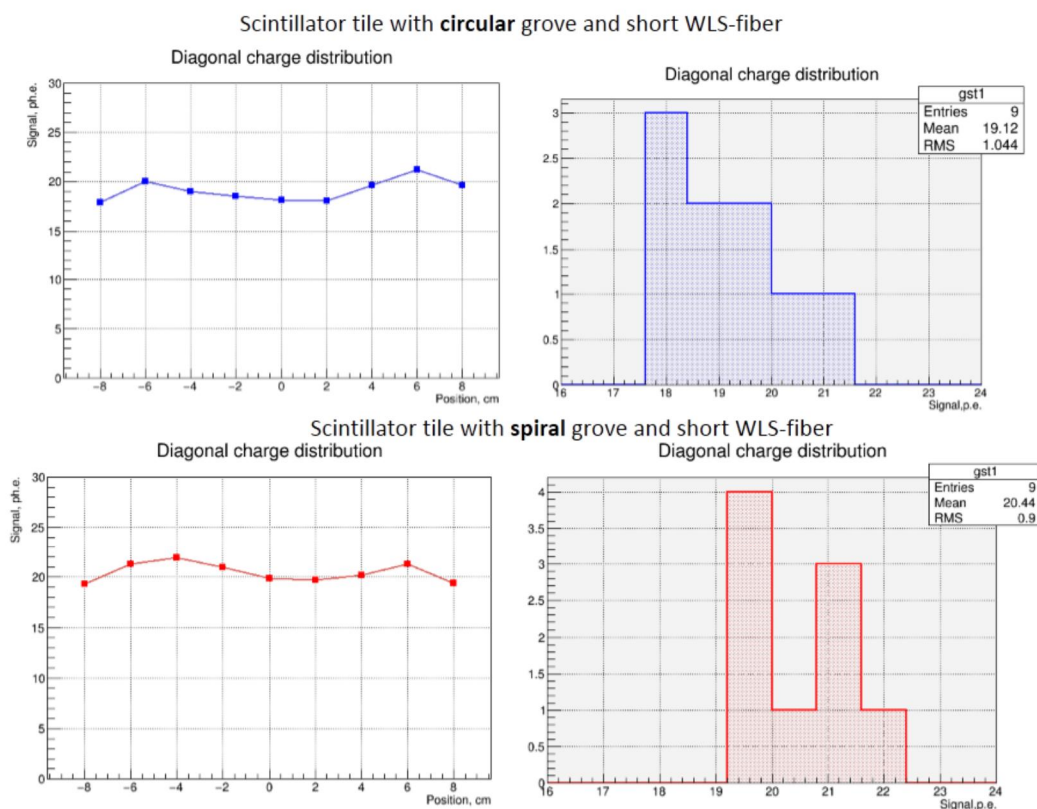


Рисунок 90. Распределение световыхода вдоль диагонали сцинтилляционной пластины с двумя типами канавок для оптоволокон. Вверху – для круглой канавки, внизу – для спиральной канавки. Гистограммы слева – проекции на вертикальную ось распределений справа.

В обоих случаях использовалось короткое спектро-смещающее волокно с длиной свободного конца около 10 см. Как видно из рис. 90, для круглой и спиральной канавок распределения световыхода почти идентичны. Для спиральной канавки средний световыход немного выше (более 20 фотоэлектронов) и немного лучшей неоднородностью (RMS распределения 0.9 фотоэлектронов). Поэтому было принято решение изготавливать пластины со спиральной формой канавки. В первой половине 2017 г. были изготовлены и поставлены четыре партии сцинтилляционных пластин. С целью проверки качества поставленных сцинтилляторов были измерены световыходы отдельных пластин в каждой из партии.

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. В настоящее время разрабатываются несколько подходов в энергетической калибровке модулей с помощью космических мюонов.

6 ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, ДИНАМИКА ЯДЕРНЫХ И ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, ФИЗИКА РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ

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

Приведенные результаты относятся к следующим направлениям исследований:

1. Электромагнитные взаимодействия нуклонов и ядер; свойства адронов и их связанных состояний в ядерной среде (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра).
2. Свойства гигантских резонансов в ядрах.
3. Нелинейные эффекты квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров.
4. Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.
5. Источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8.

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

Впервые в мире выполнены измерения пучковой асимметрии Σ_3 комптоновского рассеяния на протоне ниже порога фоторождения пионов (рис. 1). Полученные результаты подтверждают предсказания моделей, основанных на теории возмущений и дисперсионных соотношениях, и существенно отличаются от борновского члена, в котором не учтены вклады скалярных поляризуемостей протона. Полученные результаты показывают, что измерение пучковой асимметрии ниже порога является альтернативным способом определения скалярных поляризуемостей по отношению к измерениям неполяризационного сечения комптоновского рассеяния. Эксперимент выполнен коллаборацией A2 на пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя MAMI (Майнц).

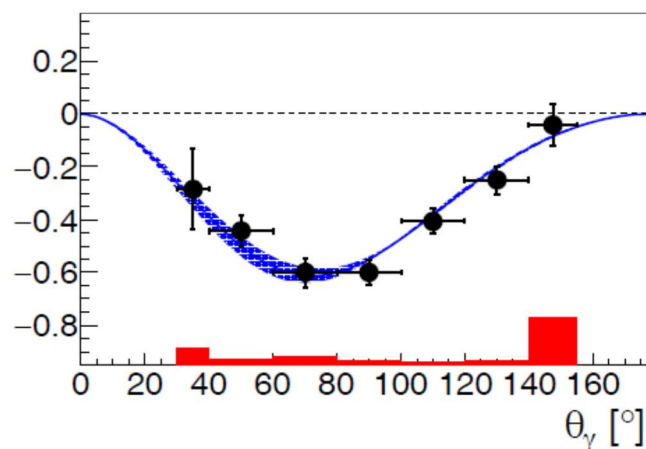


Рисунок 91. Пучковая асимметрия Σ_3 в диапазоне энергий 119-139 МэВ. Точки – эксперимент, кривая – расчет по теории возмущений.

Впервые измерены дважды поляризационная наблюдаемая E и спин-зависимые сечения $\sigma_{1/2}$ и $\sigma_{3/2}$ для фоторождения π^0 мезонов на протонах и нейтронах, связанных в дейтроне. В эксперименте использовались пучок циркулярно поляризованных фотонов от ускорителя МАМІ и продольно поляризованная мишень на основе дейтерированного бутанола. Продукты реакции (нуклоны отдачи и γ -кванты от распада π^0 мезонов) регистрировались электромагнитными калориметрами Crystal Ball и TAPS. Сравнение с данными, полученными на свободных протонах, показывает, что абсолютная величина сечений значительно изменяется под действием эффектов взаимодействия в конечном состоянии. Однако эти эффекты не оказывают заметного влияния на асимметрию E , поскольку компоненты $\sigma_{1/2}$ и $\sigma_{3/2}$ изменяются аналогичным образом.

Выполнены прецизионные измерения спин-зависимых сечений и дважды поляризационной наблюдаемой E для фоторождения η мезонов на квазисвободных протонах и нейтронах, связанных в дейтроне. Для оптимизации статистической точности данных и оценки систематических неопределенностей анализировались моды распада $\eta \rightarrow 2\gamma$ и $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$. В измерениях использовалась продольно поляризованная дейтронная мишень ИЯИ-ОИЯИ в комбинации с циркулярно поляризованным γ -пучком ускорителя МАМІ и детектирующей системой коллаборации А2. Результаты показывают, что узкая структура, наблюдавшаяся ранее в неполяризационном сечении фоторождения η –мезона на нейтроне, проявляется только в реакциях с антипараллельными спинами налетающего фотона и нуклона мишени ($\sigma_{1/2}$). Она отсутствует в реакциях с параллельными ориентациями спинов ($\sigma_{3/2}$) и, следовательно, связана с парциальными волнами, характеризующимися полным спином $1/2$. Поведение угловых распределений спин-зависимых сечений было проанализировано путем их аппроксимации полиномами Лежандра. Результаты хорошо согласуются с моделью Бонн-Гатчина, которая объясняет узкую структуру в сечении интерференцией парциальных волн P_{11} и S_{11} .

Выполнены измерения параметров Далиц-распадов $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$, $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ и $\eta \rightarrow e^+ e^- \gamma$ в реакциях $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$, $\gamma p \rightarrow \omega p$ и $\gamma p \rightarrow \eta p$ соответственно на пучке энергетически меченых фотонов ускорителя МАМІ. Полученные результаты имеют наилучшую на настоящий момент точность и хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

Свойства гигантских резонансов в ядрах.

Проведены оценки вкладов изовекторных электрических квадрупольных ($E2$) на фоне дипольных ($E1$) гигантских резонансов в атомных ядрах, возбуждаемых в прямых и обратных реакциях с фотонами (реальными и виртуальными). Разработан метод изучения полных

сечений фотопоглощения для среднетяжёлых атомных ядер вблизи порогов фотонейтронных реакций с помощью измеряемых сечений возбуждения изомеров $(\gamma, \gamma')^m$.

Завершены работы по созданию унитарной версии частично-дырочной дисперсионной оптической модели. На основе этой модели исследованы силовые функций изоскалярных монопольных возбуждений в тяжелых ядрах, в частности в ядре ^{208}Pb , и произведены сравнения с экспериментом. Для этого же ядра исследован нейтронный распад изоскалярных монопольных возбуждений. Полученные результаты частично совпадают с соответствующими экспериментальными данными.

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

Разработана методика исследования фотоядерных реакций вблизи порога на базе фемтосекундного лазерного комплекса МЛЦ МГУ, включающая в себя детектирование продуктов реакций в условиях высоких импульсных нагрузок. Разработан магнитный электронный спектрометр для диагностики плазмы в фемтосекундном диапазоне. Проведены предварительные измерения выходов фотоядерных реакции вблизи порога.

Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.

Исследованы возможности получения медицинских радиоизотопов, необходимых для позитронно - эмиссионной томографии и радиотерапии в результате реакций (γ, p) и (γ, pn) . Разработана методика фотоядерного получения и радиохимического извлечения образуемого в мишени из металлического цинка естественного изотопного состава в результате реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$ радионуклида ^{67}Cu , применяемого в медицине для радиоиммунотерапии.

Проведено модельное описание фотоядерного активационного детектирования углерода (реакция $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$) с учетом фона, вызванного образуемыми пучком фотонейтронами, в сопоставлении с имеющимися экспериментальными данными.

Источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8.

Отработана методика экспериментов с изготовленным ранее и поставленным на пучок ускорителя ЛУЭ-8 источником нейтронов. В источнике используется широкий спектр нейтронов от бериллиевой мишени. Методика включает в себя набор стандартных режимов основных систем работы ускорителя, что позволяет оперативно, в течение одного сеанса,

многократно изменять и устанавливать с требуемой в эксперименте точностью основные параметры пучка (энергию в диапазоне 4 – 9 МэВ и средний ток до 10 мкА). Осуществлена проводка пучка через магнит, поворачивающий пучок на 135 градусов, на выходе которого возможна регулировка энергетического разброса электронов в пучке. Исследованы параметры пучка, достижимые по энергетическому разрешению (порядка 1%) и интенсивности порядка 1 – 5 мкА после его проводки через второй 135-градусный магнит, что дает возможность постановки других планируемых экспериментов, требующих повышенного энергетического разрешения. Проведена работа по автоматизации контроля режимов основных систем ускорителя ЛУЭ-8. Определены основные требования для разработки тех. задания на проектирование блока интеграторов. Общая наработка ускорителя за 2017 год составила 500 часов. Из них чистое время использования пучка на набор экспериментальных данных - 400 часов, наладка и тестирование экспериментального оборудования на пучке – 100 часов, На ремонтно-профилактические работы и отработка методических приемов настройки по отдельным узлам установки затрачено около 200 часов.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НУКЛОНОВ С МАЛОНУКЛОННЫМИ СИСТЕМАМИ И ЛЁГКИМИ ЯДРАМИ НА ПУЧКАХ МОСКОВСКОЙ МЕЗОННОЙ ФАБРИКИ

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Евгений Сергеевич Конобеевский

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в nd и pd взаимодействиях, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования nn и pp корреляций в малонуклонных системах разработана программа экспериментов по исследованию реакций



в которых впервые будет проведено прямое определение энергии nn -виртуального синглетного 1S_0 состояния в различных реакциях и при различных энергиях налетающих частиц.

1 Экспериментальное исследование nn -корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.

Исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ проведено при энергии дейтронов 15 МэВ [13]. Данная реакция может проходить через образование в промежуточном состоянии синглетных пар – $(nn)^S$ и $(pp)^S$. Моделирование реакции показало, что в определенных кинематических условиях при регистрации pp -пары и нейтрона под углами вылета NN -пар в квазибинарной реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow (nn)^S + (pp)^S$, форма энергетического (временного) спектра нейтрона зависит от энергии виртуального синглетного состояния nn -пары [14], а, следовательно, согласно

$$\frac{1}{a_{nn}} = -\left(\frac{m_n E_{nn}}{\hbar^2}\right)^{1/2} - \frac{1}{2} r_{nn} \frac{m_n E_{nn}}{\hbar^2} + \dots \quad (4)$$

от значения nn -длины рассеяния.

Эксперимент проведен на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ. В измерениях была использована мишень из дейтерированного полиэтилена толщиной $2 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$, пучок дейтронов с током на мишени 10–20 нА. В эксперименте регистрировались в совпадении два протона ΔE – E телескопом под углом 27° и нейтрон.

Моделирование ионизационных потерь для использованного ΔE – E телескопа показало возможность выделения событий одновременного прохождения через него двух протонов от локусов одиночных частиц. Нейтроны детектировались под углом 36° (соответствующим

кинематике двухчастичной реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2n$) жидким водородосодержащим сцинтиллятором EJ-301, установленным на расстоянии 0.79 м от мишени. Энергия нейтронов определялась по времени пролета нейтронов до детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролетной системы использовался временной сигнал от ΔE -детектора. В эксперименте использовалась система сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров DT5742 и DT5720, описанная в [13].

Экспериментальный время-пролетный спектр нейтронов сравнивался с результатами моделирования, зависящими от значений энергии синглетного nn -состояния [14]. На рис. 92 экспериментальный спектр показан вместе с результатами моделирования для $E_{nn} = 40, 80$ и 160 кэВ. В результате проведенного χ^2 -анализа экспериментальных и смоделированных данных получено значение $E_{nn} = 76 \pm 6$ кэВ, которое можно соотнести, согласно (1), с величиной nn -длины рассеяния $a_{nn} = -22.6 \pm 0.6$ Фм, при значении эффективного радиуса $r_{nn} = 2.82$ Фм [15].

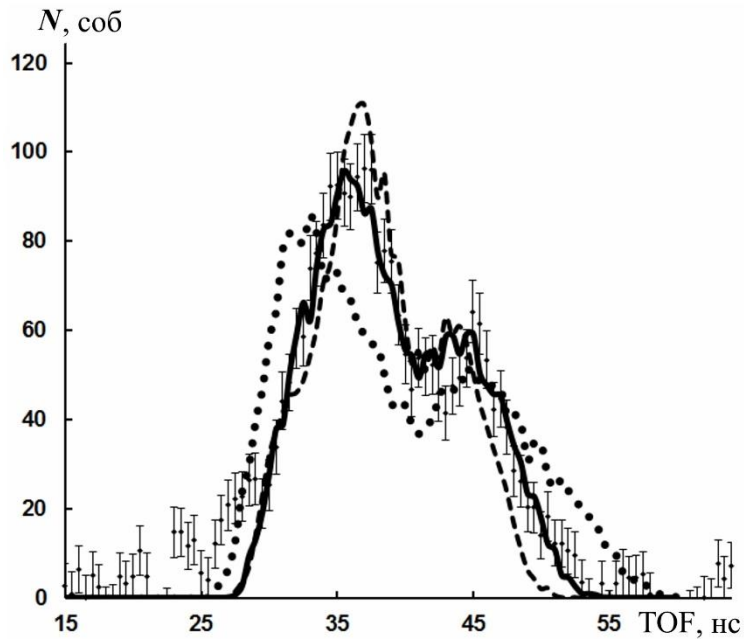


Рисунок 92. Экспериментальный времяпролётный спектр нейтронов в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2n^S + {}^2p^S \rightarrow n + n + p + p$ и результаты моделирования для значений эффективной энергии синглетного nn -состояния 40 (точечная линия), 80 (сплошная) и 160 кэВ (пунктир)

Создание экспериментальной установки для исследования pp -корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$.

В реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$ можно также получить данные об энергии pp синглетного состояния. Известно, что эта реакция может идти с образованием на первом этапе (до развала) различных синглетных двухнуклонных систем: $d + d \rightarrow (nn)^S + (pp)^S$. Для

получения данных об энергии *pp*-состояния необходимо регистрировать два протона от развала этого состояния. Для этой задачи создан матричный детектор на основе кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LFS-8 [16, 17].

Внешний вид первого варианта детектора представлен на рис. 93. Детектор создан на основе кристаллов LYSO и матрицы кремниевых фотоумножителей SiФЭУ ARRAYC-30035-16P-PCB фирмы SENS�.

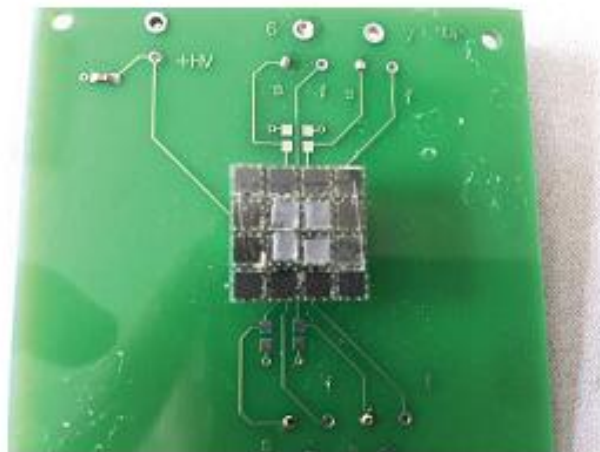


Рисунок 93. Внешний вид первого варианта детектора

Матрица состоит из 16 SiФЭУ, в данном варианте детектора пока используются только четыре центральных элемента. Матрицы SENS� имеют ряд преимуществ: высокая степень надежности, гарантированно одинаковые параметры составляющих, малый темновой ток, высокий коэффициент усиления, дополнительный быстрый выход для временных измерений. Были использованы сцинтилляционные кристаллы LYSO размерами $3 \times 3 \times 2$ мм³, самостоятельно изготовленные из кристаллов стандартных размеров $3 \times 3 \times 12$ мм³.

Выбор кристаллов LYSO и их размеров основан на следующих требованиях: отсутствие входного окна у кристалла (регистрируются заряженные частицы, поэтому исключаются все гигроскопичные кристаллы), хорошее энергетическое разрешение, полное поглощение заряженных частиц с энергией до 10 МэВ.

Проведены измерения параметров прототипа такого детектора, состоящего из 4-х детектирующих секций (при полном наборе в 16). Определялся стандартный набор параметров: разрешение (временное, амплитудное), относительная эффективность, собственный фон, коэффициенты усиления и т.д. и их зависимости от напряжения (рис. 94 и 95) и температуры. Определены эффективности применения различных вариантов оптического контакта при установке кристаллов на кремниевый фотоумножитель. Определен рабочий диапазон напряжений смещения и выбрано рабочее напряжение. Определен собственный фон детектора и его влияние на применение детектора для измерений. Были

проведены измерения по определению зависимости разрешения детектора от температуры. Путем исследования спектров определен наилучший материал для создания оптического контакта между кристаллами и матрицей SiФЭУ. Данная конструкция и измеренные параметры детектора уже удовлетворяют условиям эксперимента. В ближайшее время планируется модернизация детектора (замена кристаллов) для достижения лучших значений энергетического разрешения.

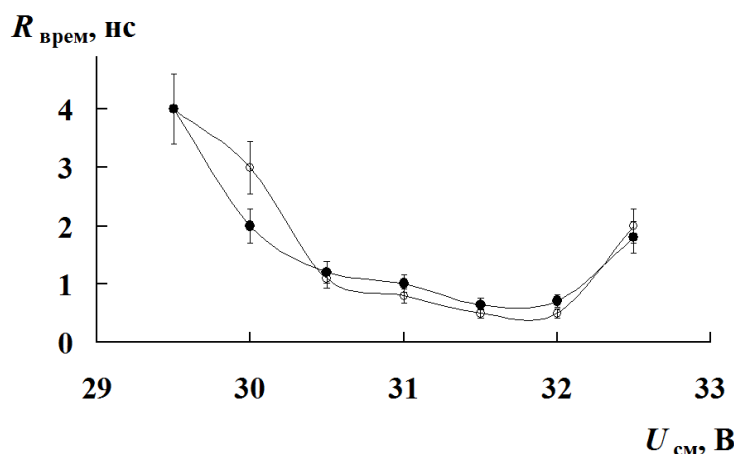


Рисунок 94. Зависимость временного разрешения системы E - и D_n -детекторов от напряжения смещения E -детектора. Белые точки – дифференциальный выход ячейки, черные – линейный

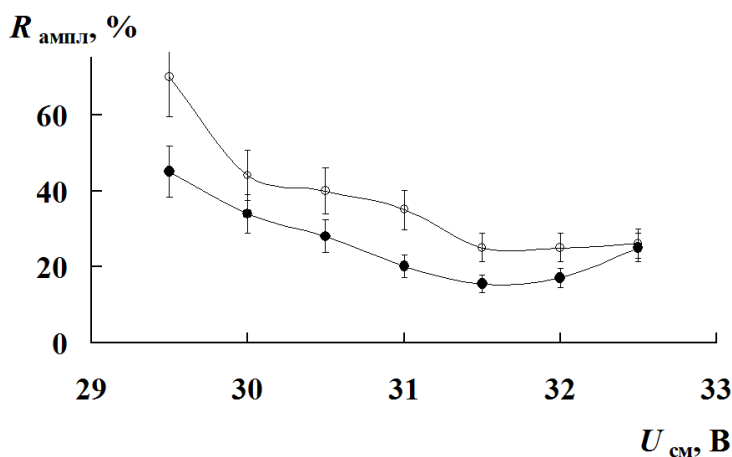


Рисунок 95. Зависимость амплитудного разрешения детектора по γ -линии 662 кэВ ^{137}Cs от напряжения смещения. Соответствие точек аналогично рис. 94.

При дополнительной доработке экспериментальной установки, включающей в себя изготовление предусилителей и усилителей, соответствующих нормальным режимам работы дифференциальных выходов ячеек E -детектора, возможно улучшение временного разрешения телескопа. Рассматривается вопрос о помещении ΔE - E телескопа в собственную

вакуумированную камеру. Это позволит изменять в широких пределах телесные углы вылета вторичных частиц и, соответственно, расширить границы эксперимента.

Исследование энергетической зависимости параметров nn -взаимодействия.

Проведен анализ данных о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученных в последние годы в реакциях nd и dd -развала. [8, 10-11, 15, 18-21]. Данные представлены на рис. 5 в зависимости от года опубликования результата. Видно, что разброс значений a_{nn} (от -16 до -22 Фм) значительно превосходит приведенные авторами значения ошибок. В чем же причина таких расхождений? Заметим, что приведенные в таблице значения 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 [12] 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.

Реакции nd и dd -развала можно рассматривать как проходящие через промежуточную стадию образования и разлета фрагментов: nn -пары и протона (или «дипротона», соответственно). Выберем некоторый произвольно фиксированный временной интервал (например, $t = 10^{-23}$ с) и, используя кинематический расчет для скорости разлета двух фрагментов, рассчитаем расстояние R между ними, соответствующее выбранному временному интервалу t (выбор определенного значения t не имеет значения из-за очевидного масштабирования). При фиксированном t , параметр R зависит от относительной скорости разлета фрагментов, т.е. от энергии и массы фрагментов в конечном состоянии. Для различных экспериментов параметр R может значительно отличаться (см. таблицу 6).

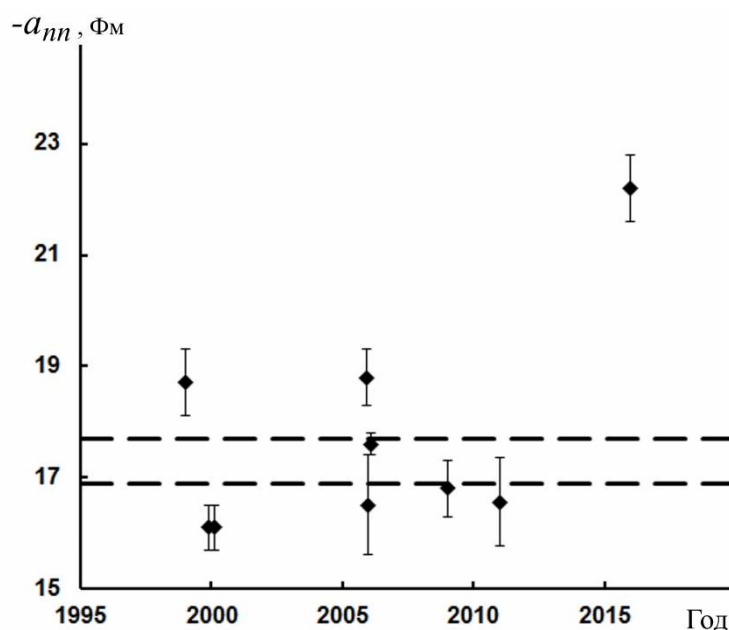


Рисунок 96 – Значения a_{nn} длины рассеяния, извлеченные из экспериментов по nd - и dd -развалу [8-9, 11, 15, 18-21] в зависимости от года опубликования результата. Пунктирные линии соответствуют предельным значениям $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ Фм.

Таблица 6. Значения a_{nn} и параметры экспериментов, данные о длине рассеяния, полученные из абсолютных значений сечения (абс.) и из подгонки формы сечения (форм.)

Установка	Реакция	Энергия, МэВ	Длина рассеяния a_{nn} , Фм	R , Фм	Источник
TUNL	$d(n, nn)p$	13	-18.7 ± 0.6 (абс.)	4.25	[8]
TUNL	$d(n, nn)p$	13	-18.8 ± 0.5 (форм.)	4.25	[9]
BONN	$d(n, np)n$	16.6	-16.2 ± 0.3 (форм.)	4.93	[11]
BONN	$d(n, np)n$	25.3	-16.3 ± 0.4 (абс.) -16.1 ± 0.4 (форм.)	6.44	[11]
BONN	$d(n, p)nn$	17.4	-16.5 ± 0.9 (абс.)	5.16	[18]
BONN-TUNL	$d(n, nn)p$	19	-17.6 ± 0.2 (форм.)	5.44	[19]
BONN-TUNL	$d(n, np)n$	19	-16.8 ± 0.5 (форм.)	5.44	[20]
ИЯИ РАН	$d(n, nnp)$	40	-16.6 ± 1.0 (форм.)	8.35	[21]
ИЯИ-НИИЯФ	$d(d, npp)n$	15	-22.2 ± 0.6 (форм.)	2.38	[18]

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 на параметры nn -взаимодействия, извлекаемые из эксперимента. Используя этот R -критерий, мы построили график зависимости значений a_{nn} , полученные из экспериментов по nd и dd -развалу, от параметра R (рис. 97). Видно, что экспериментальные точки, в основном, расположены в соответствии с относительным расстоянием R , и могут быть описаны гладкой кривой, зависящей от R .

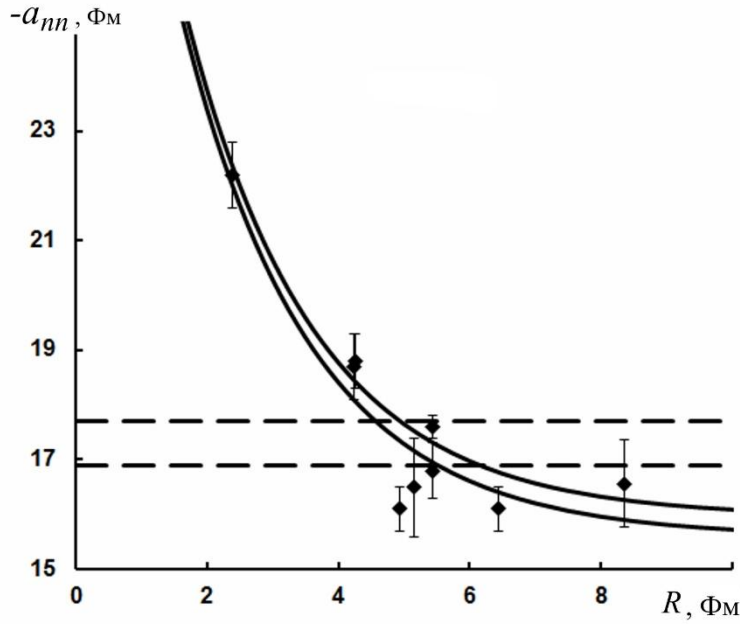


Рисунок 97 – Зависимость значений a_{nn} от параметра R . Пунктирные линии соответствуют предельным значениям $a_{pp} = -17.3 \pm 0.4$ Фм, сплошные – аппроксимация экспериментальных точек зависимостью (4) при максимальном и минимальном значениях параметра a : $-15.8 + 0.2$ и $-15.8 - 0.2$, где 0.2 – ошибка в определении этого параметра.

Для аппроксимации экспериментальных a_{nn} была использована экспоненциальная функция (5) (см. рис. 97)

$$a_{nn}(R) = a + b \exp(-R/r_0), \quad (5)$$

при этом значения ее параметров a , b и r_0 определялись из минимума χ^2 . Параметр a определяет асимптотическое значение a_{nn} , полученное экстраполяцией этой кривой при $R \rightarrow \infty$, и должен быть свободным от вклада $3N$ -сил. Для использованных экспериментальных данных получено значение параметра $a \equiv a_{nn}(\infty) = -15.8 \pm 0.2$ Фм.

Дальнейшие исследования [22] показали, что это значение a_{nn} хорошо согласуется со значениями a_{nn} , отвечающими кулоновской разнице энергий $\Delta E_c = E_B(^3\text{He}) - E_B(^3\text{H})$ основных состояний ^3He и ^3H , а также синглетной длине np -рассеяния после перенормировки потенциала однопионного обмена. Таким образом, можно считать, что эти данные дают совершенно независимое подтверждение полученных нами экстраполированных значений a_{nn} .

Вместе с тем необходимы дополнительные исследования, главным образом по анализу возможных погрешностей экспериментальных ошибок, для установления истинного значения a_{nn} , как одной из фундаментальных констант ядерной физики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. R. Machleidt, F. Sammarruca and Y. Song, Phys. Rev. C 53, R1483 (1996).
2. V. G. J. Stoks et al., Phys. Rev. C 49, 2950 (1994).

3. Siepe et al., Phys. Rev. C 65, 034010 (2002).
4. X. C. Ruan et al., Phys. Rev. C 75, 057001 (2007).
5. Deltuva et al., Phys. Rev. C 72, 054004 (2005).
6. G. A. Miller, B. M. K. Nefkens and I. Slaus, Phys. Rep. 194, 1 (1990).
7. Dumbrajs, R. Kohn, H. Pilkuhn et al., Nucl. Phys. B 216, 277 (1983).
8. D. E. Gonzales Trotter, F. Salinas, Q. Chen et al., Phys. Rev. Lett. 83, 3798 (1999).
9. R. Machleidt, Adv. Nucl. Phys. 19, 189 (1989).
10. D. E. Gonzales Trotter, F. Salinas, W. Tornow et al., Phys. Rev. C 73, 034001 (2006).
11. V. Huhn, L. Watzold, Ch. Weber et al., Phys. Rev. C 63, 014003 (2000).
12. Faessler, V. I. Kukulin, I. T. Obukhovskiy, V. N. Pomerantsev, J. Phys. G 27, 1851 (2001).
13. Е. С. Конобеевский и др., ЯФ 78, 687 (2015).
14. С. В. Зуев, А. А. Каспаров, Е. С. Конобеевский, Изв. РАН. Сер. физ. 81, 753 (2017).
15. E. S. Konobeevski et al., Few-Body Syst. 58, 107 (2017).
16. В. В. Мицук, М. В. Мордовской Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO ТРУДЫ МФТИ. 2017. Том 9. № 4. Стр. 43-49.
17. В. В. Мицук, М. В. Мордовской Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO Физика элементарных частиц и космология. III Межинститутская молодежная конференция. 27-28 апреля 2017 года. МФТИ (ГУ), Московская область, г. Долгопрудный.
18. W. von Witsch, X. Ruan, and H. Witala, Phys. Rev. C 74, 014001 (2006).
19. B. J. Crowe III, A. S. Crowell, J. Deng et al., TUNL Progr. Rep.. XLV, 65 (2005-2006).
20. C. R. Howell, A. S. Crowell, J. Deng, et al., TUNL Progr. Rep. XLVIII, 57 (2008–2009).
21. Е. С. Конобеевский и др., ЯФ 73, 1343 (2010).
22. E. S. Konobeevski, S. V. Zuyev, V. I. Kukulin, and V. N. Pomerantsev. New estimation for neutron-neutron scattering length: charge symmetry and charge independence breaking revisited. arXiv:1703.00519v1 [nucl-th].

8. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ЯДЕР С ЯДРАМИ ПРИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЯХ

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Евгений Сергеевич Конобеевский

Кинематическое моделирование реакции ${}^6\text{He} + 2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + n + n$.

Для проверки возможности извлечения данных о нейтрон-нейтронных корреляциях в гало-ядрах проводилось моделирование реакций передачи кора от гало-ядер дейтрону. В качестве примера приведены результаты моделирования для ядра-снаряда ${}^6\text{He}$.

Кинематическое моделирование реакции ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + n + n$ проводилось в два этапа. На первом этапе моделируется «квазибинарная» ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + nn$ реакция. При этом, в расчетах «затравочная» масса nn -системы берется как сумма масс двух нейтронов и энергии nn -синглетного состояния E_{nn} , для которой взято значение 0.15 ± 0.05 МэВ. Оценка энергии E_{nn} соответствует существующим данным по nn -длине рассеяния и возможным отклонениям от этого значения. Расчет проводился для энергии ${}^6\text{He}$ -пучка 60 МэВ. Анализ рассчитанных угловых и энергетических зависимостей вторичных частиц в «квазибинарной» реакции позволил выбрать углы вылета фрагментов – $\Theta_{nn} = 14^\circ$, $\Theta_{\text{Li}} = 60^\circ$, $\Phi_{nn-\text{Li}} = 180^\circ$. Углы выбраны так, чтобы соответствующая энергия ${}^6\text{Li}$ была достаточно большой ($E_{\text{Li}} \approx 32$ МэВ) для уменьшения ионизационных потерь, а энергия nn -системы ($E_{nn} \approx 7.5$ МэВ) была относительно малой для уменьшения погрешности в определении энергии нейтрона по времени пролета. Таким образом, в результате моделирования «квазибинарной» реакции ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + nn$ определяются «затравочные» значения углов вылета ядра ${}^6\text{Li}$ и двухнейтронной системы.

На втором этапе моделировалась трехчастичная реакция ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + n + n$. При этом условием эксперимента (и моделирования) являлась регистрация в совпадении двух частиц – ${}^6\text{Li}$ и нейтрона под углами равными или близкими к углам вылета фрагментов (${}^6\text{Li}$ и nn), определенными в «квазибинарной» кинематике.

Кинематическое моделирование реакции с тремя частицами в конечном состоянии проводилось при энергии пучка ${}^6\text{He}$ 60 МэВ и углах регистрации $\Theta_n = 14^\circ$, $\Theta_{\text{Li}} = 60^\circ$, $\Phi_{n-\text{Li}} = 180^\circ$. В результате моделирования получался массив событий со всеми параметрами (энергиями, импульсами и углами вылета) для всех вторичных частиц. Эти параметры могут быть использованы для построения различных двумерных диаграмм и спектров. На рис. 98а представлена рассчитанная двумерная диаграмма $E_n - E_{\text{Li}}$ для всех событий полного развала, а на рис. 1б представлен соответствующий энергетический спектр одного из нейтронов.

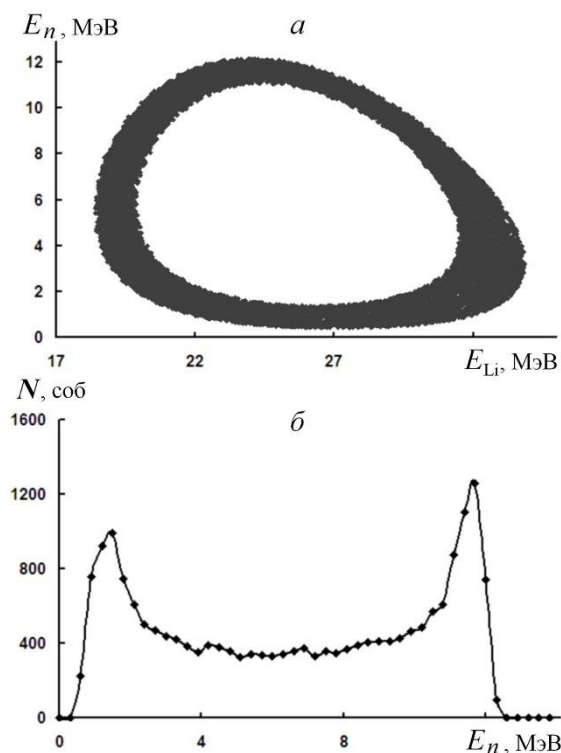


Рисунок 98. Результаты моделирования реакции ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + n + n$: *a* – двумерная диаграмма E_n – E_{Li} , *б* – энергетический спектр нейтрона

Для каждого отобранного события относительная энергия системы двух нейтронов, т.е. превышение энергии nn -системы над суммой масс двух нейтронов, рассчитывается по формуле (1):

$$\varepsilon_{nn} = \frac{1}{2} \left(E_1 + E_2 - 2\sqrt{E_1 E_2} \cos \Delta\Theta \right), \quad (1)$$

где E_1 и E_2 – кинетические энергии нейтронов, а $\Delta\Theta$ – угол их разлета в лабораторной системе. Отметим, что при развале возбужденного состояния nn -системы с энергией E_{nn} , вылетающие нейтроны будут обладать относительной энергией, равной энергии уровня.

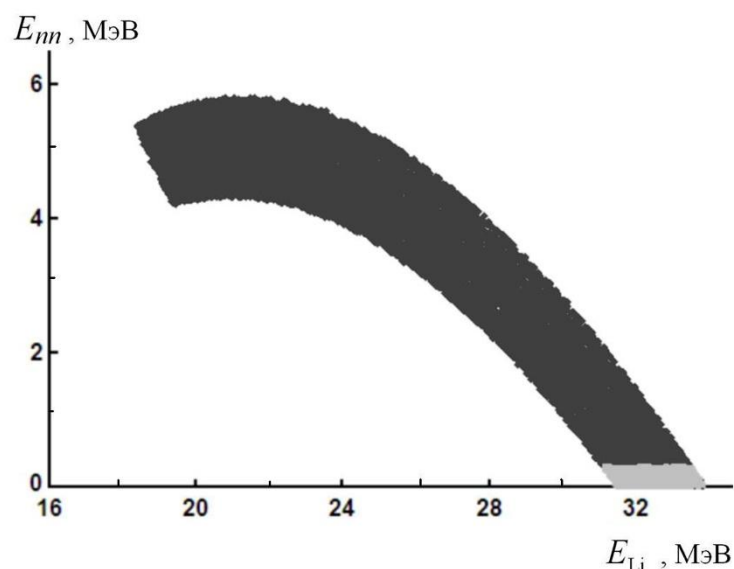


Рисунок 99. Двумерная диаграмма $E_{nn} - E_{Li}$, светлая область соответствует относительной энергии nn -системы $E_{nn} < 300$ кэВ

На рис. 99 представлена моделированная зависимость относительной энергии nn -системы от энергии ${}^6\text{Li}$. Видно, что, представляющая интерес в эксперименте область малых энергий возбуждения ($\sim 0 - 300$ кэВ) достигается при максимальных энергиях ядра ${}^6\text{Li}$. Таким образом, исследование этой области возбуждения, позволяет применить дополнительное условие на отбор событий (как при моделировании, так и в эксперименте), например, $E_{Li} > 30$ МэВ.

Для определения энергии квазисвязанного nn -состояния будет применен метод, позволяющий определять эту энергию по форме энергетического спектра нейтрона, вылетевшего при развале этого состояния [8]. При условии, что детектирование нейтрона происходит под углом соответствующем вылету nn -системы в двухчастичной реакции, попасть в детектор может только нейтрон, вылетевший в системе ц.м. или вперед ($\sim 0^\circ$) или назад ($\sim 180^\circ$). Проведем отбор моделированных событий с определенным значением относительной энергии. На рис. 3 видно, что события, отвечающие развалу квазисвязанного состояния nn -системы с энергией, например, $E_{nn} = 90 \pm 5$ кэВ, приводит к структуре, как в двумерных диаграммах, например, $E_{n1} - E_{Li}$ (рис. 100а), так и в энергетическом спектре нейтронов (рис. 100б).

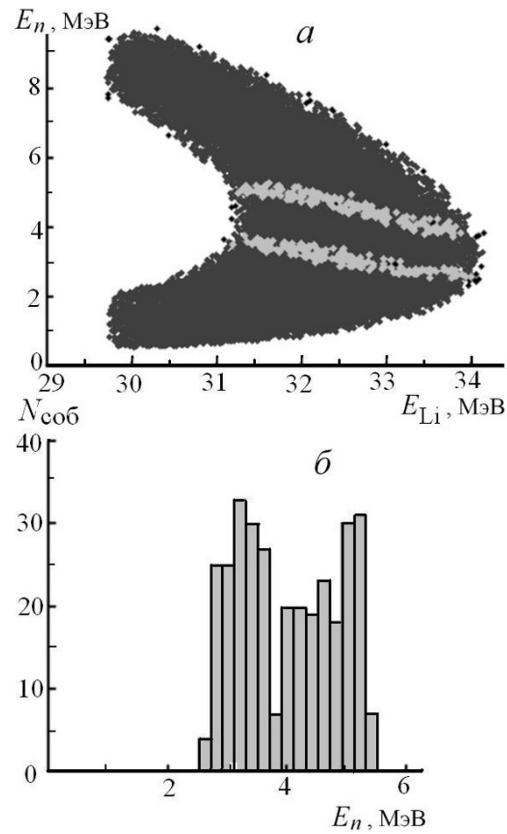


Рисунок 100. Результаты моделирования: *а* – двумерная диаграмма $E_{nn}-E_{Li}$, светлый участок выделяет события, соответствующие развалу nn -состояния с энергией $E_{nn} = 90 \pm 5$ кэВ; *б* – энергетический спектр нейтронов из развала этого nn -состояния

Однако, хотя на двумерной диаграмме (рис. 100*а*) видны четко разделенные области с определенным расстоянием между ними, энергетический спектр, получаемый как проекция на ось E_n , может не дать четкой картины (рис. 100*б*), особенно в случае малых значений E_{nn} . В этом случае может быть проведена оптимизация энергетического спектра путем поворота осей координат на некоторый угол и переходу к новым смешанным координатам:

$$\begin{aligned} E'_1 &= E_1 \cos \alpha - E_2 \sin \alpha \\ E'_2 &= E_1 \sin \alpha + E_2 \cos \alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

где α – угол поворота, E_1 и E_2 – кинетические энергии нейтрона и ${}^6\text{Li}$ до поворота и E'_1 и E'_2 – координаты после поворота (рис. 101). Видно, что после поворота осей пики в спектре разделяются лучше и можно определить расстояние между ними. Проведенное моделирование показало, что для экспериментальных условий, приведенных выше, расстояние между пиками в энергетическом спектре нейтронов зависит от энергии квазисвязанного состояния nn -пары и при изменении E_{nn} от 50 до 250 кэВ возрастает от ~ 1 МэВ до 3 МэВ.

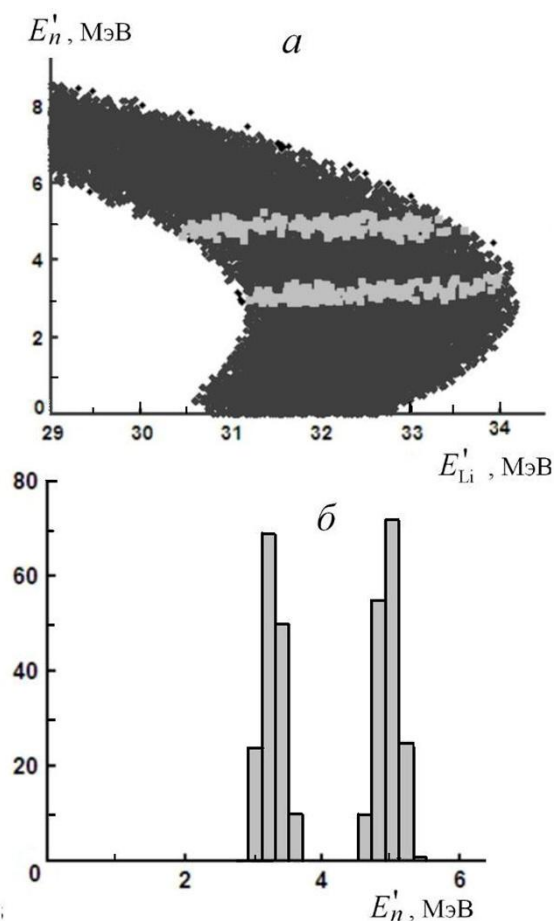


Рисунок 101. То же, что и рис. 100, но после процедуры поворота осей согласно формуле (4).

Таким образом, исследование энергетических (время-пролетных) спектров нейтронов, регистрируемых под углом близким к углу вылета nn -системы в совпадении с заряженной частицей, позволит получить информацию об энергии квазисвязанного состояния, т.е. о степени корреляции нейтронов в гало-ядрах.

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 будет проведено исследование реакции передачи кора на пучках радиоактивных нейтроноизбыточных ядер. При исследовании реакций будет использован пучок ${}^6\text{He}$ (${}^{11}\text{Li}$) с энергией $\sim 5\text{--}10$ МэВ/нуклон и тонкая мишень из дейтерированного полиэтилена. В эксклюзивном эксперименте будут регистрироваться как заряженная частица (${}^6\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$), так и один или два нейтрона. Углы регистрации должны соответствовать кинематике двухчастичной реакции с вылетом нейтрона и заряженной частицы. Заряженные частицы (${}^6\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$) 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 nn -квазисвязанных состояний. На основе определения этих энергий (и в случае их отличия от значений для свободных nn -пар) будут проведены оценки эффективного притяжения, возникающего между виртуальными нуклонами в поле третьей частицы (кора).

Для проверки методики в 2017 г. был проведен тестовый совпадательный эксперимент с детектированием заряженной частицы и нейтрона. Эксперимент был проведен в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ на пучке радиоактивных ионов He и Li с энергией 26 Мэв/нуклон. Заряженные частицы регистрировались полностью обедненным поверхностно-барьерным кремниевым детектором с толщиной 380 мкм, а нейтроны жидким водородосодержащим сцинтиллятором EJ-301, с возможностью n - γ разделения по форме сигнала.

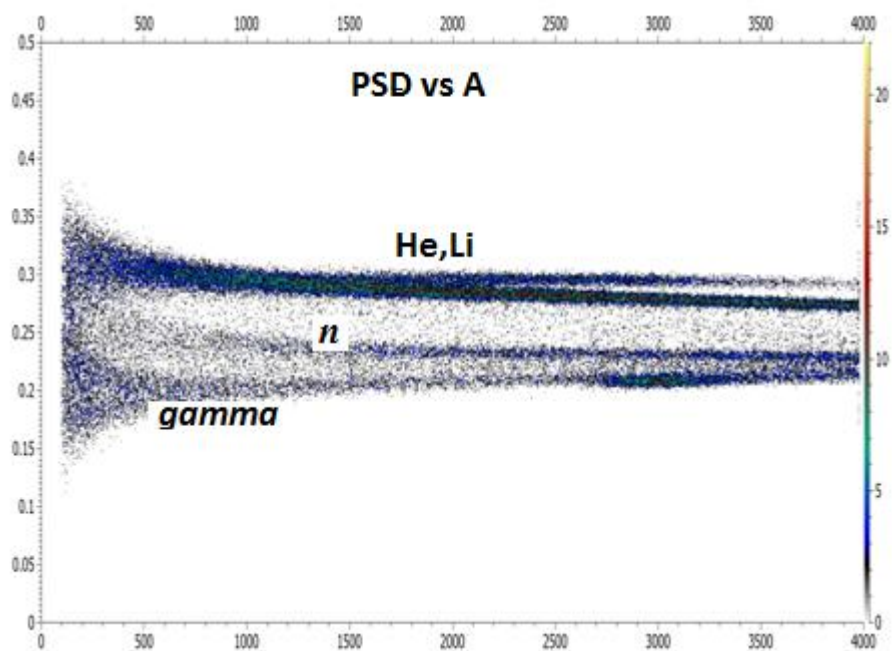


Рисунок 102. Двумерная диаграмма PSD-A

На рис. 102 показана двумерная диаграмма — Параметр разделения по форме импульса (PSD) — Амплитуда импульса. Из рисунка видно, что нейтронные события в нейтронном детекторе однозначно отделяются от событий, вызванных гамма-квантами (нижний локус), так и от событий, вызванных заряженными частицами (He, Li). Таким образом, показана

возможность проведения эксперимента с регистрацией заряженного фрагмента и нейтрона от распада виртуального np -состояния.

Кинематическое моделирование реакций квазисвободного рассеяния (КСР) протонов, дейтронов, альфа-частиц на кластерах ядер ${}^6,{}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$.

В рамках темы для определения вклада различных конфигураций структуры легких ядер предполагается исследование реакций квазисвободного рассеяния (КСР) протонов, дейтронов, альфа-частиц на кластерах ядер ${}^6,{}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10,11}\text{B}$. При этом, в качестве рассеянной частицы будет рассматриваться частица-снаряд. В реакции квазисвободной передачи (КСП), например, дейтрона каналы, связанные с различными кластерами (n , ${}^4\text{He}$, ${}^5\text{He}$), будут приводить к различным вторичным частицам (t , ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$).

Рассмотрим для примера реакцию квазисвободного рассеяния дейтронов на кластерах ${}^7\text{Li}$. Возможными кластерными конфигурациями этого ядра являются – $({}^4\text{He}+t)$, $({}^5\text{He}+d)$, $({}^6\text{He}+n)$, $({}^6\text{Li}+n)$. В реакции КСР дейтрона один из кластеров рассматривается как ядро, на котором рассеивается дейтрон, а оставшийся кластер рассматривается как зритель, имеющий в выходном канале реакции малую долю передаваемого импульса.

Моделирование планируемых экспериментов проводилось с помощью программы кинематического моделирования, предназначенной для изучения реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии [9]. Программа позволяет проводить выбор геометрии эксперимента, в выбранной геометрии рассчитывать угловые и энергетические характеристики вторичных частиц, оптимизировать параметры установки (размеры детекторов, временное и энергетическое разрешения и др.).

На рис. 6 показана моделированная диаграмма $E_d-\Theta_d$, для реакции КСР дейтрона для различных кластерных конфигураций ядра ${}^7\text{Li}$. На рис. 7 показана моделированная диаграмма $E_\alpha-\Theta_\alpha$, для реакции КСР альфа-частиц для различных кластерных конфигураций ядра ${}^7\text{Li}$.

Из сравнения результатов моделирования видно, что конфигурации $({}^4\text{He}+t)$, $({}^6\text{Li}+n)$ и суммарная конфигурация $({}^5\text{He}+d)$ - $({}^6\text{He}+p)$, хорошо разделяются на диаграмме КСР дейтронов при углах вылета дейтронов 0° - 180° (рис. 6) и на диаграмме для КСР альфа-частиц до 40° (рис. 103). Разделение вкладов $({}^5\text{He}+d)$ и $({}^6\text{He}+p)$ конфигураций, согласно моделированию, возможно в реакции КСР альфа-частиц при углах вылета 40° - 60° .

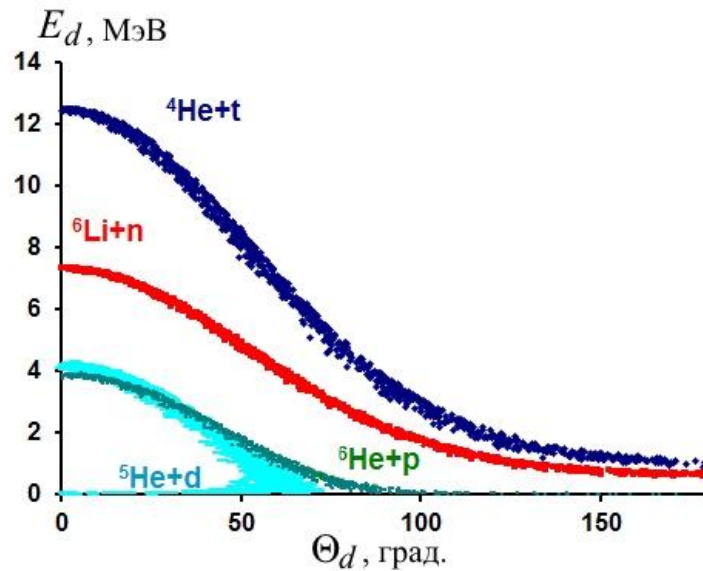


Рисунок 103. Моделированная двумерная диаграмма E_d – Θ_d для КСР дейтронов с энергией 15 МэВ на различных кластерных конфигурациях ядра ${}^7\text{Li}$

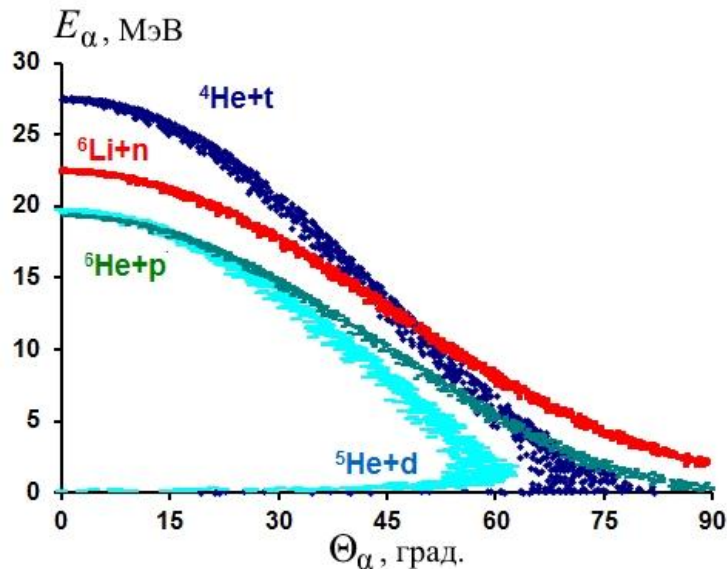


Рисунок 104. Моделированная двумерная диаграмма E_α – Θ_α для КСР альфа-частиц с энергией 30 МэВ для различных кластерных конфигураций ядра ${}^7\text{Li}$

На рис. 104 показаны вклады различных конфигураций в энергетический спектр рассеянных альфа-частиц при углах регистрации 20° (рис. 104а) и 50° (рис. 104б). Видно, что в спектре для угла 20° хорошо разделяются вклады от конфигураций (${}^4\text{He}+t$), (${}^6\text{Li}+n$) и суммарной конфигурации (${}^5\text{He}+d$) – (${}^6\text{He}+p$). Аналогичная картина будет и для спектра дейтронов из рис. 102. В тоже время, в спектре альфа-частиц для угла 50° разделяются вклады и от конфигураций (${}^5\text{He}+d$) и (${}^6\text{He}+p$). Таким образом, использование различных ядер-

снарядов и углов регистрации позволит обеспечить более однозначное определение кластерной структуры ядер.

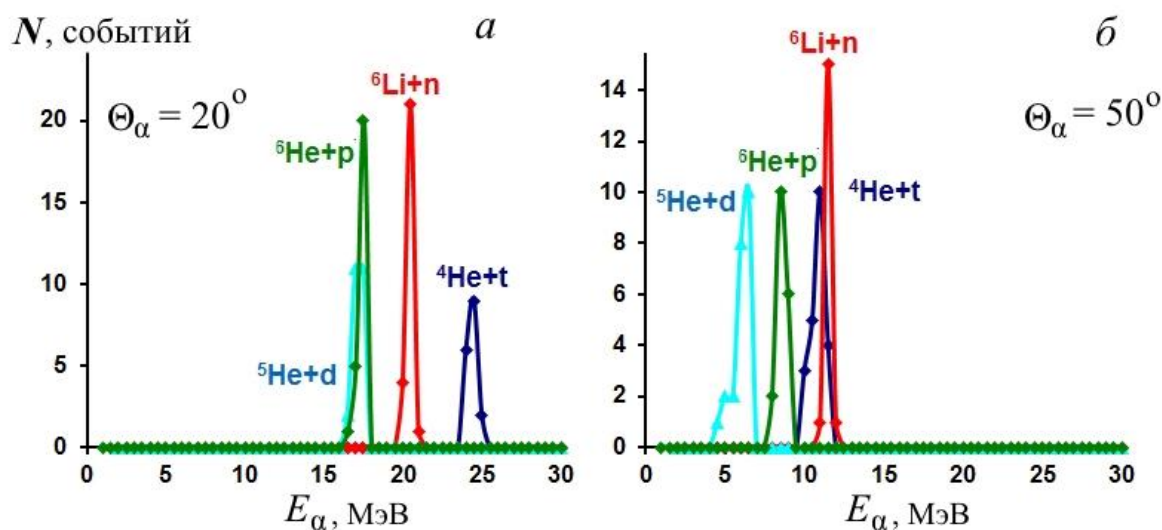


Рисунок 105. Вклады различных конфигураций в энергетический спектр рассеянных альфа-частиц. *а* – при угле регистрации 20° , *б* - при угле регистрации 50° . Энергия налетающих альфа-частиц 30 МэВ

Проверка экспериментальной методики исследования реакции квазисвободного рассеяния дейтронов на кластерах ^9Be .

Тестовое измерение реакций при взаимодействии дейтронов с мишенью ^9Be исследование проведено при энергии налетающих дейтронов 15 МэВ в НИИЯФ МГУ им. Д.В.Скобелева. Получены первые результаты измерения угловой зависимости выхода заряженных фрагментов. Продукты реакции регистрировались в интервале углов ($70\text{--}110$) градусов кремниевым $\Delta E\text{--}E$ телескопом с толщинами ~ 25 мкм и ~ 415 мкм. Получены двумерные $\Delta E\text{--}E$ диаграммы для различных углов вылета вторичных заряженных частиц. На рис. 9 приведена экспериментальная $\Delta E\text{--}E$ диаграмма при угле регистрации заряженных частиц 100° . Видны локусы, соответствующие протонам (нижний локус), дейтронам (средний) и тритонам (верхний). На рисунке не показан (из-за масштаба) локус, соответствующий альфа-частицам, вылетающим в реакции передачи $^9\text{Be}+d \rightarrow ^7\text{Li}+\alpha$.

На рис. 107 показан энергетический спектр дейтронов, полученный отбором событий дейтронного локуса. В энергетическом спектре видны пики, соответствующие как различным энергетическим уровням ^9Be , так и рассеянию дейтрона на кластерах ядра ^9Be .

В 2018 г. будут проведены статистически обеспеченные измерения реакций, вызванных взаимодействием дейтронов и альфа-частиц с ^9Be .

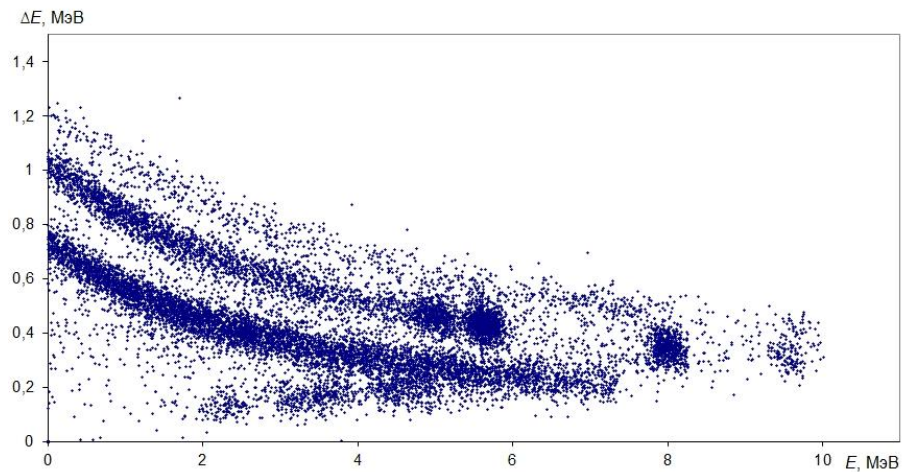


Рисунок 106. Экспериментальная ΔE – E диаграмма при угле регистрации заряженных частиц 100°

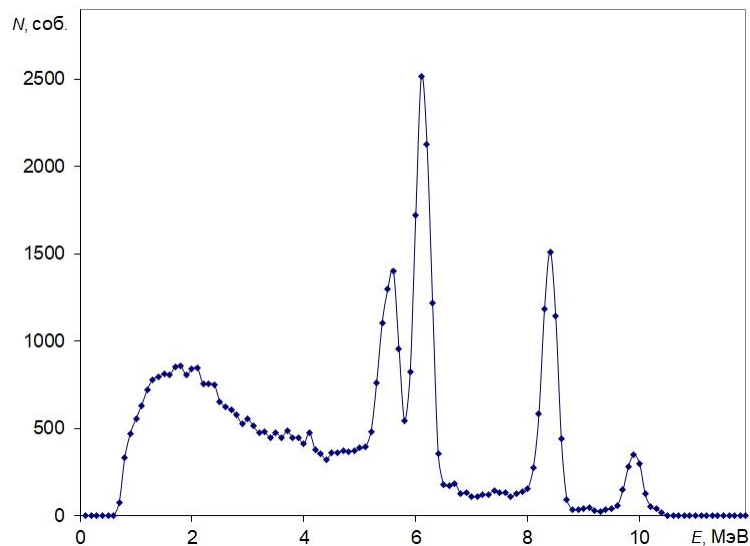


Рисунок 107. Экспериментальный энергетический спектр дейтрона при угле регистрации 100°

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).
4. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C 60, 044605 (1999).
5. Г. Е. Беловицкий и др., ЯФ 72, 1772 (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. С. В. Зуев, А. А. Каспаров, Е. С. Конобеевский, Изв. РАН. Сер. физ. 81, 753 (2017).
9. Zuyev, S.V., Kasparov, A.A., Konobeevski, E.S. Bul. Rus. Ac. Sci. Physics, 2014, Vol. 78, No. 5, P. 345.

9. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АППАРАТУРЫ НИЗКОФОНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕРМАНИЕВЫХ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ

Научный руководитель: д.т.н А.В.Андреев

Работы по данной теме проводились на созданном ранее активационно-измерительном комплексе, включающем W-Be-фотонейтронный источник нейтронов на базе линейного ускорителя электронов и низкофонный гамма-спектрометр. Источник обеспечивает поток тепловых нейтронов порядка $10^8 - 10^9$ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения. Комплекс включает низкофонную камеру с пассивной защитой, гамма спектрометр на основе детектора из ообоочистого германия и систему регистрации, сбора и обработки информации с детектора. Текущий вариант «пассивной» защиты обеспечивает значение скорости счета фона менее 5 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: $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111m}\text{Cd}$, $^{113}\text{In}(\gamma, \gamma')^{113m}\text{In}$, $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$ при энергии фотонов до 8 МэВ. Измерения выполнены на тормозном пучке, полученном на линейном ускорителе ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. На рис. 108 приведен спектр гамма-квантов из распада ядра ^{111m}Cd , образованного в реакции $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111m}\text{Cd}$.

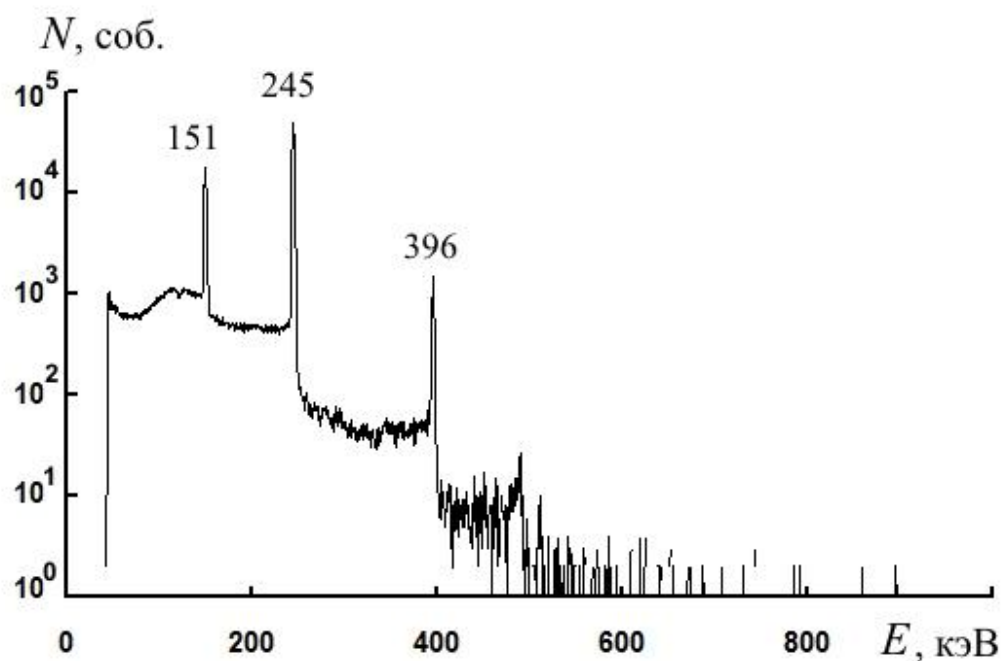


Рисунок 108. Спектр гамма-квантов из распада ядра ^{111m}Cd после облучения образца ^{111}Cd потоком тормозных фотонов с энергией до 7.5 МэВ. Время облучения – 3 часа, время выдержки после облучения – 180 с, время измерений наведенной активности – 600 с, поток гамма-квантов – $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Выполнялось высокочувствительное определение содержания и состава нерадиоактивных и радиоактивных элементов в атмосферных аэрозолях и выпадениях, отбираемых на специальные аналитические фильтрующие материалы вблизи земной поверхности. Исследование изотопного состава атмосферных аэрозолей и выпадений проводилось методом измерения естественной радиоактивности и методом нейтронно-активационного анализа.

Основой мониторинга атмосферы является фильтрация воздуха через специальные материалы с последующим анализом осевших на них выпадений и аэрозолей. Для низкоуровневого радиоактивного мониторинга атмосферы используются волокнистые фильтрующие материалы. В настоящей работе в качестве фильтров при сборе выпадений и аэрозолей и последующем анализе использованы фильтр из отбеленной марли и фильтр ЛФС-2 (лента фильтрующая спектрометрическая).

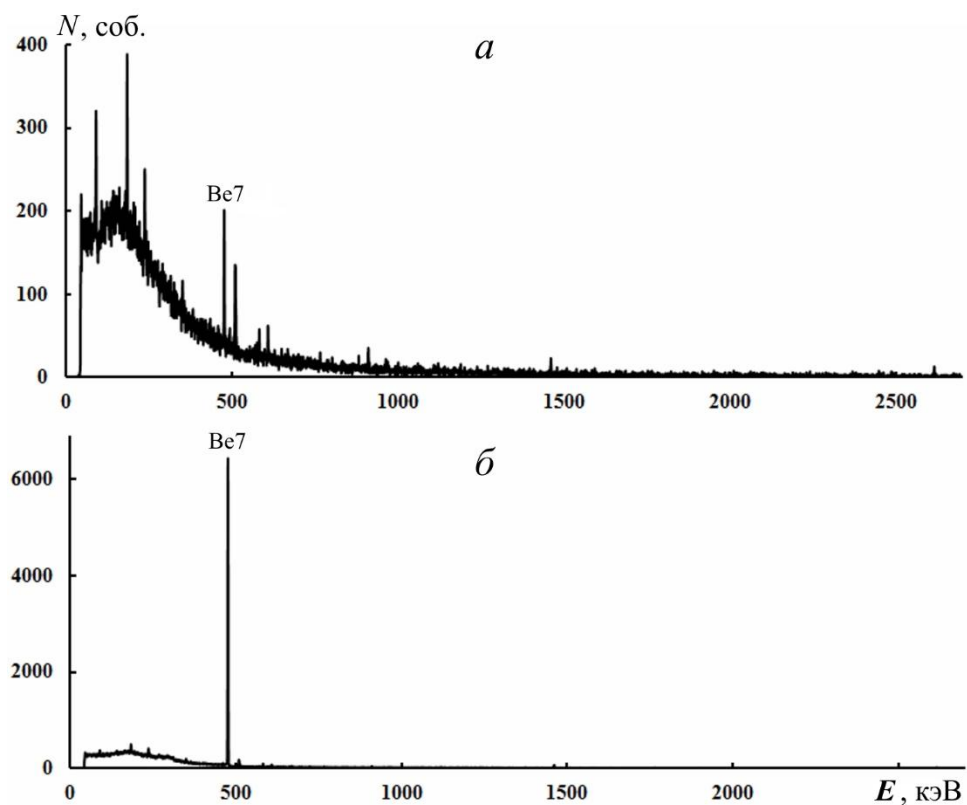


Рисунок 109. Гамма-спектр радиоактивности фильтров: *а* – марлевый фильтр, устанавливавшийся на крыше здания высотой 15 – 20 м, время сбора осадков – 1 неделя, время измерения – 90700 с; *б* – ЛСФ-фильтр в заборном отверстии фильтро-вентиляционной установки на высоте 20 – 25 м от земли, время пробоотбора – 1 месяц, время измерения – 80000 с

Измерены временные зависимости активности нуклидов U и Th-рядов в приповерхностном слое Земли. Активность определялась из измеренных выходов гамма-квантов соответствующих нуклидов. На рис. 110 представлена временная зависимость активности изотопов U-238 ряда, соответственно, в атмосферных осадках и аэрозолях. Заметно, что в рамках одного ряда распределения активностей коррелируют друг с другом. Также измерены временные зависимости активности Be-7 и K-40 в приповерхностном слое Земли (рис. 4) в атмосферных осадках и аэрозолях. Заметна корреляция между активностью Be-7 и K-40.

При НАА фильтры активировались потоком тепловых нейтронов $\sim 10^7$ нейтрон/см²·с в течение ~ 2 часов. Время набора спектров ~ 20 часов. НАА фильтров проводился, как для образцов после пробоотбора, так и для «чистых» образцов, не участвовавших в пробоотборе, которые являются образцами-сравнения.

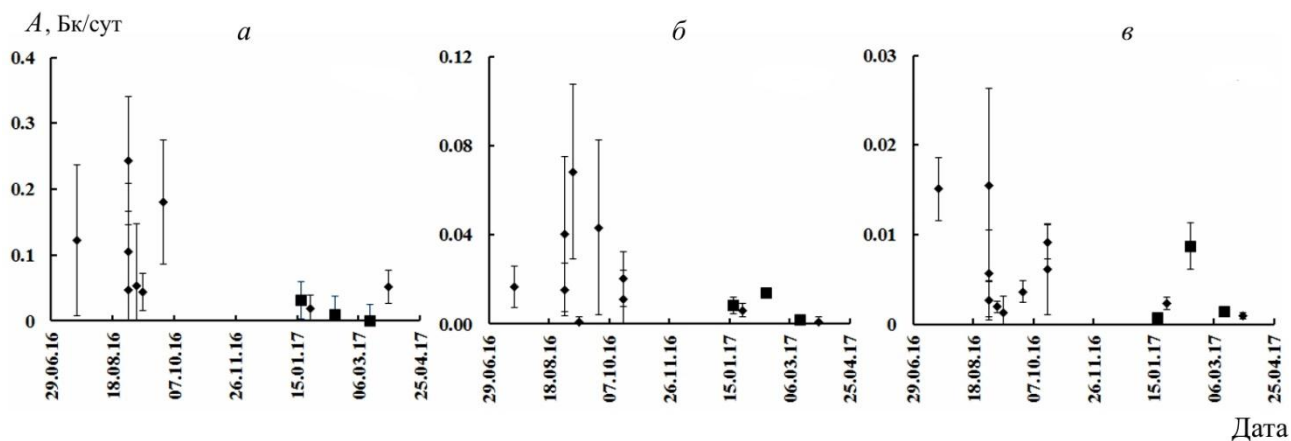


Рисунок 110. Активность изотопов U-238 ряда Th-234 (по линии 92 кэВ) (*a*), Pb-214 (средняя по линиям 242, 296 и 352 кэВ) (*б*) и Bi-214 (средняя по линиям 609, 1120 и 1764 кэВ) (*в*) в атмосферных осадках (♦) и в аэрозолях (■), соответственно

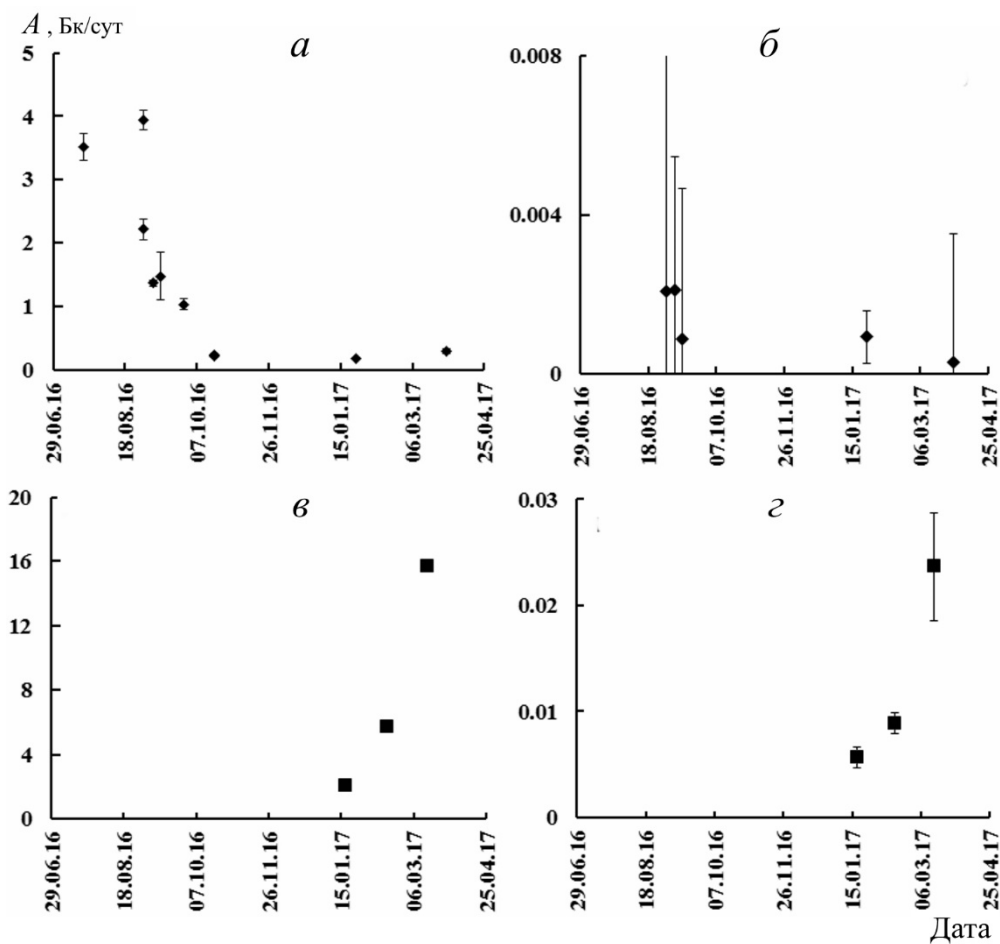


Рисунок 111. Активность изотопов Be-7 (по линии 478 кэВ) (*a*, *в*) и K-40 (1460 кэВ) (*б*, *г*) в атмосферных осадках (♦) и в аэрозолях (■), соответственно

Активационные гамма-спектры имеют сложный вид. Идентификация пиков в спектрах осуществлялась с помощью разработанной программы, содержащей базу данных по нуклидам, активируемым при облучении нейтронами фотонейтронного источника в реакциях (n, γ) , $(n, n'\gamma)$ и (n, p) . По заданным пикам в спектре программа находит с заданной точностью соответствующие им варианты линий нуклидов с указанием периода полураспада и интенсивности. По полученным при обработке спектров данным по периоду полураспада происходит окончательная идентификация пиков.

Анализ активационных гамма-спектров, соответствующих чистым образцам (рис. 5б и 6б), указывает на наличие в образцах марли заметных следов Na и Mn с небольшими следами Cl, а в ЛСФ – K, Na и Cl с небольшими следами Mn.

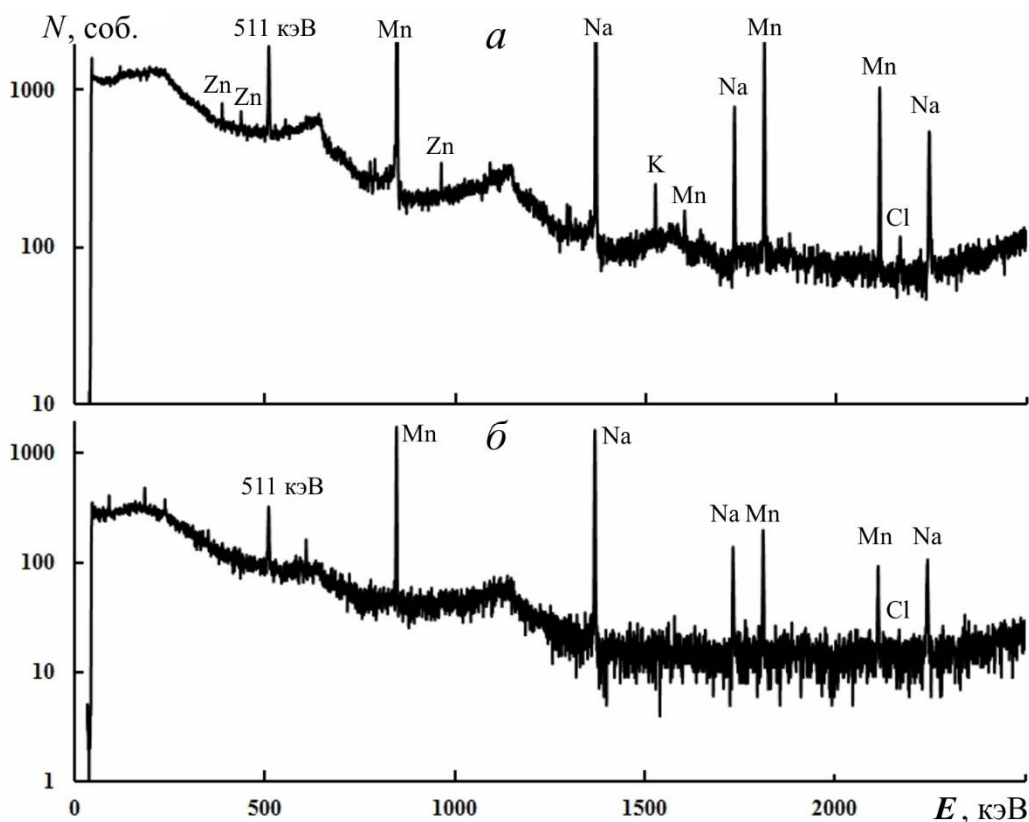


Рисунок 112 – Гамма-спектр активированного фильтра из отбеленной марли: *а* – время сбора осадков – 1 неделя, *б* – чистый фильтр. Время активации – 2 часа. Плотность потока тепловых нейтронов $\sim 10^7$ нейтрон /с·см², время измерения ~ 80000 с

Тем не менее, можно отметить наличие превышения в пробах обоих видов (рис. 112а и 113а) по сравнению с «чистыми» образцами содержания Cl, Na и Mn. Идентификация пиков в спектрах по периоду полураспада также позволяет сделать вывод о наличии в осадках следов K и Zn, а в аэрозолях – W. Достоверное подтверждение наличия в пробах следов других элементов требует разработки дополнительных методов их измерения и анализа.

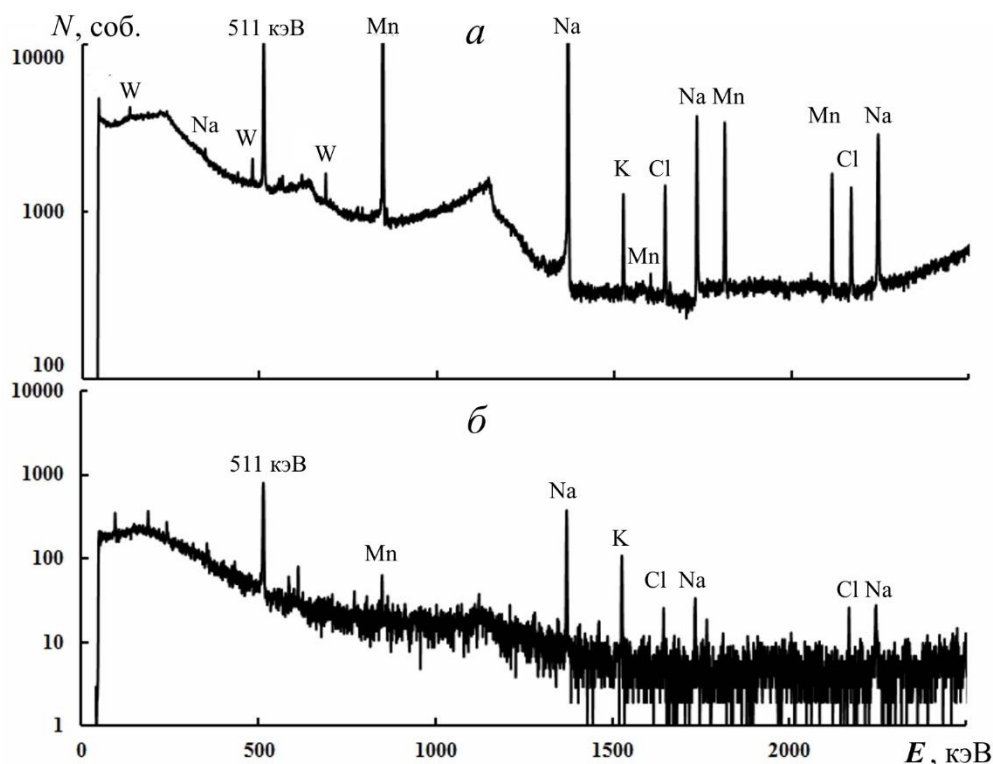


Рисунок 113. Гамма-спектр активированного фильтра из ЛСФ: *а* – время сбора осадков – 1 месяц, *б* – чистый фильтр. Время активации – 2 часа. Плотность потока тепловых нейтронов $\sim 10^7$ нейтрон/с·см², время измерения ~ 80000 с

Начаты работы по изучению спектра нейтронов фотонейтронного источника. С помощью комплекса проведены измерения методом нейтронно-активационного анализа плотности потока тепловых нейтронов внутри и вне источника. В качестве мониторов плотности потока нейтронов при этих измерениях были использованы образцы ⁶³Cu, ⁵⁵Mn, ¹¹⁵In, ⁴⁵Sc, которые облучались нейтронами в рабочей камере источника. Активационные спектры измерялись гамма-спектрометром в низкофоновой камере. Экспериментально измеренная плотность потока тепловых нейтронов в области облучения образцов изменялась в диапазоне $\sim 10^6$ – 10^8 нейтрон/см²·с в зависимости от тока пучка электронов.

Рассмотрены способы восстановления информации о форме спектра W-Be фотонейтронного источника ИЯИ РАН и вкладов в него нейтронов тепловых и эпитепловых энергий с использованием метода нейтронно-активационного анализа. Проведен сравнительный анализ сечений нейтронного захвата на различных ядрах и свертки сечений с различными энергетическими участками модельного спектра нейтронов. Отобран ряд элементов в качестве образцов для облучения нейтронами в источнике и последующего нейтронно-активационного анализа. Для этих элементов заметный вклад в измеряемые величины дают только тепловые или эпитепловые нейтроны, либо их комбинации. Проведены облучения образцов и измерения активационных спектров с использованием низкофонового гамма-спектрометра. Проведено восстановление формы спектра нейтронов источника в низкоэнергетической его части. Оценены значения плотности потока нейтронов для этих областей спектра.

10. РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-8

Научные руководители: к.ф.-м.н. Г.В.Солодухов и д.т.н. А.В.Андреев

Создание W-Be-фотонейтронного источника нейтронов на базе линейного ускорителя электронов потребовало исследований характеристик фотонейтронного источника при различных энергиях входного пучка электронов. Также расширились и требования к параметрам пучка ускорителя: диапазон энергий – 4-10 МэВ при средних токах от десятых долей мкА до 200-300 мкА при высоких требованиях на надежность, стабильность и воспроизводимость условий эксперимента.

В качестве источника электронов использован серийный промышленный низкоэнергетический ускоритель электронов ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН. Ускоритель электронов с фотонейтронным источником показан на рис. 114.



Рисунок 114. W-Be-фотонейтронный источник ИН-ЛУЭ ИЯИ РАН на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5

Для оптимального использования источника были проведены работы по модернизации линейного ускорителя электронов. В результате модернизации ускорителя ток пучка электронов увеличен с 10 до 40 – 60 мкА. Также увеличена продолжительность непрерывной работы ускорителя. В результате сложной работы по установлению оптимальных возможностей ускорителя используемые в настоящее время параметры ускорителя применительно к экспериментальным исследованиям приведены в Табл. 7.

Таблица 7. Оптимизированные параметры ускорителя электронов ЛУЭ-8-5.

Доступный диапазон изменения полной энергии электронов, МэВ	4 – 10
Импульсный ток пучка электронов, мА	350
Частота следования импульсов тока, Гц	50- 300
Длительность импульса, мкс	3.5
Импульсная мощность СВЧ-генератора (рабочая), МВт	5.8
Рабочая частота СВЧ-генератора, МГц	3201.4
Рабочая температура ускоряющей секции, С°	36.6

Разработана и реализована методика, позволяющая оперативно и с хорошим воспроизведением устанавливать заданную энергию пучка и осуществлять эту процедуру при условии многократных коротких прерываний работы ускорителя в соответствии с требованиями эксперимента. Измерение энергии пучка ускорителя проводится с использованием магнитного спектрометра, состоящего из двух 135-градусных магнитов, позволяющих повернуть пучок на 270 градусов. Градуировка магнитного поля спектрометра проведена с помощью магнитометра на основе датчика Холла. Изменение энергии в пределах 4 – 10 МэВ осуществляется путем изменения амплитуды ускоряющего поля в волноводе и тока ускоряемых электронов за счет изменения тока накала и высокого напряжения на источнике электронов.

Общая наработка ускорителя за 2017 год составила ~ 500 часов. Из них чистое время использования пучка на набор экспериментальных данных ~ 400 часов, наладка и тестирование экспериментального оборудования на пучке ~ 100 часов.

С помощью двухкоординатного твердотельно-газового детектора нейтронов на основе 3-мкм чувствительного слоя ^{10}B и газовой камеры с площадью 128 x 128 мм² измерено соотношение быстрых и тепловых нейтронов в нейтронном потоке из источника.

Для изучения возможности измерения энергетической зависимости сечений фотоядерных реакций на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 использовалась процедура измерения сечений с использованием метода квазимонохроматизации тормозного спектра фотонов. Данный метод позволяет определять сечение реакции путем измерения выхода реакции при трех фиксированных значениях энергии электронов. Процедура эквивалентна измерению сечения для фотонов с известным «квазимоноэнергетическим» спектром. Модельно рассчитанные спектры тормозных фотонов получали с использованием современных средств моделирования на базе программы GEANT-4 в применении к

конкретному эксперименту с учетом его геометрии, толщин мишеней, параметров пучка электронов и т.д. (см., например, рис. 115).

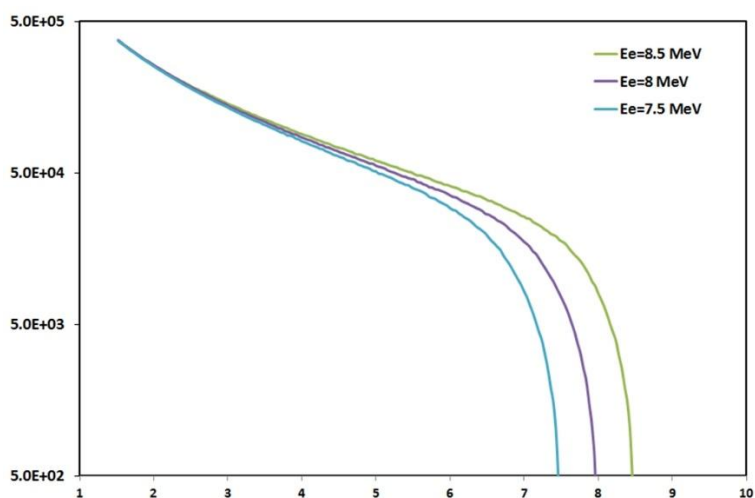


Рисунок 115. Тормозные спектры фотонов $\Phi_{7.5}$, Φ_8 и $\Phi_{8.5}$, соответствующие энергиям электронов $E_e = 7.5, 8$ и 8.5 МэВ

Для монохроматизации фотонов необходимо подобрать такие коэффициенты C , например, $C_{7.5}$, C_8 и $C_{8.5}$, при которых комбинация $C_{8.5}*\Phi_{8.5} + C_{7.5}*\Phi_{7.5} - C_8*\Phi_8$ приводила к квазимоноэнергетическому спектру фотонов с энергией ≈ 8 МэВ в пике (рис. 116).

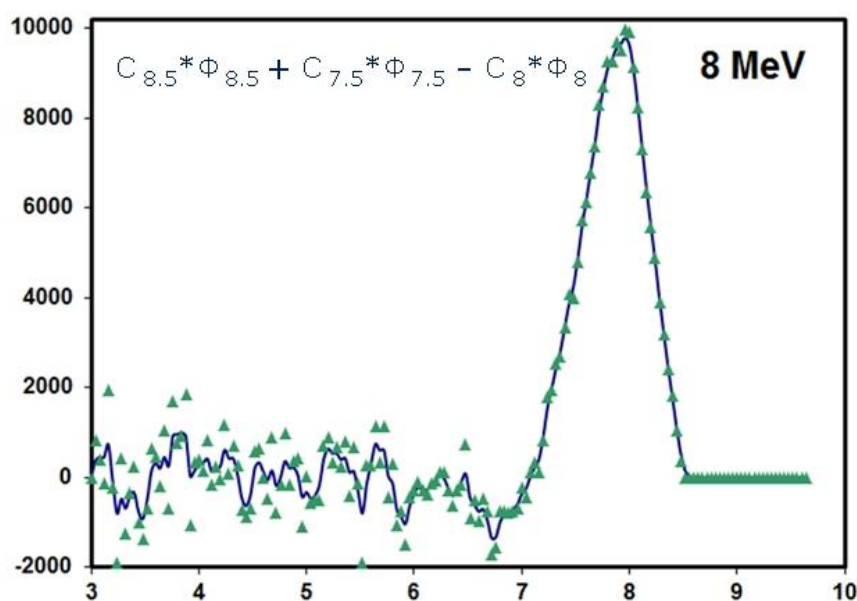


Рисунок 116. Квазимоноэнергетический спектр фотонов с энергией $E_\delta \sim 8$ МэВ и шириной ~ 0.7 МэВ; сплошная линия – сглаженный спектр

В качестве примера использования процедуры квазимонохроматизации тормозного спектра фотонов рассмотрено восстановление сечений фотоядерных реакций из экспериментальных выходов реакции под действием фотонов с тормозным спектром. Для моделирования «экспериментальных» выходов были использованы сечения возбуждения

изомера ^{111m}Cd и расчетные тормозные спектры фотонов. Как показано на рис. 117, метод работает достаточно хорошо, описывая величину и характерные особенности экспериментальных данных.

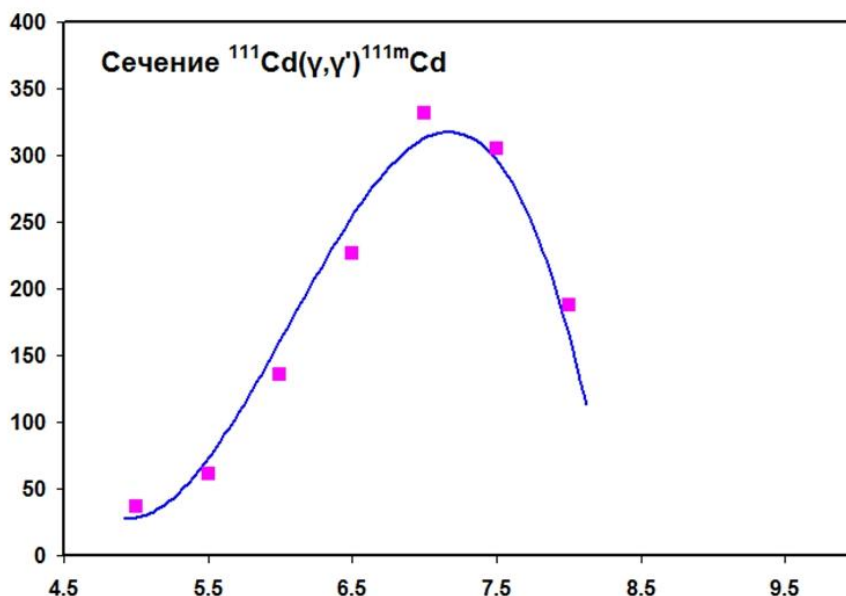


Рисунок 117 Результат восстановления энергетической зависимости сечения возбуждения изомера ^{111m}Cd : сплошная кривая – аппроксимация экспериментальных сечений

Отработана методика и проведены измерения методом наведенной активности энергетической зависимости выхода реакций $(\gamma, \gamma')^m$ на некоторых изотопах кадмия и индия при энергии «моноэнергетических» фотонов 4 – 8.5 МэВ. Исследованы факторы, влияющие на точность восстановления.

Рассмотрены способы восстановления информации о форме спектра W-Be фотонейтронного источника и вкладов в него нейтронов тепловых и эпитепловых энергий. Проведено восстановление формы спектра нейтронов источника в низкоэнергетической его части. Оценены значения плотности потока нейтронов для этих областей спектра.

Работа этапа «Автоматизация контроля режимов основных систем ускорителя ЛУЭ-8» – «Разработка техзадания на автоматизацию основных систем ускорителя» закончена разработкой блока интеграторов, в завершающей стадии находится разработка системы связи ускорителя с ЭВМ.

В рамках этапа «Исследование параметров дифрактометра тепловых нейтронов на импульсном источнике нейтронов на базе ЛУЭ ИЯИ РАН» исследовались амплитудные и временные характеристики элементов дифрактометра – позиционно-чувствительного двухкоординатного твердотельно-газового детектора нейтронов на основе чувствительного слоя ^{10}B и газовой камеры с площадью $128 \times 128 \text{ мм}^2$ и газонаполненных счетчиков на основе гелия-3. С помощью этих детекторов проводились время-пролётные измерения нейтронов фотонейтронного источника.

11. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ С ЯДРАМИ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ КОЛЛЕКТИВНЫХ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ

Научный руководитель: к.ф.-м.н. И.В.Суркова

Для анализа экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию авторами используется оптическая модель со связью каналов (ОМСК) с потенциалом Вудса-Саксона в вибрационном и ротационном пределах [1]. Для расчетов по этой модели был написан комплекс программ и получено свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета сечений рассеяния нейтронов на ядрах в модели жесткого ротатора (ROTAZ)». Комплекс программ предназначен для расчета в оптической модели со связью каналов упругого и неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением низких уровней четно-четных деформированных ядер. Коллективные состояния ядер рассматриваются в модели жесткого аксиального и неаксиального ротатора. Программы позволяют рассчитывать усредненные по энергии сечения, поляризацию, а также дифференциальные сечения, как для упругого, так неупругого рассеяния. Вклад в эти величины от реакций, идущих через составное ядро, может быть рассчитан, как с учетом, так и без учета влияния на него прямых реакций. В программах рассчитывается полная усредненная по энергии S матрица, что дает возможность вычислять коэффициенты проницаемости во всех открытых каналах без всяких предположений. Также рассчитываются силовые функции и длина потенциального рассеяния.

Подобные расчеты позволяют делать выводы в отношении применимости к описанию рассеяния нейтронов той или иной модели ядра, вычислять вклад прямых реакций и определять параметры оптического потенциала в области энергии налетающих нейтронов до 4 МэВ. Комплекс программ обеспечивает ввод массива начальных параметров модели (табличные и экспериментальные данные), расчет и вывод полученных значений. Использование этого комплекса позволило авторам расширить диапазон анализируемых нейтронных сечений для энергий нейтронов на несколько МэВ выше предыдущего рассмотрения.

Из проведенного анализа следует, что интересными для рассмотрения могут быть нейтронные сечения, полученные на ускорителе ЛУЭ-8-5 с фотонейтронным источником.

Начаты работы по подготовке к таким измерениям. Весь цикл работ подразумевает определение доступных интервалов энергий нейтронов, интенсивностей, исследование фоновых условий. Отдельным этапом работ было определение гамма и нейтронных полей (как быстрых, так и медленных) в помещении ускорителя и прилегающих к нему.

Одной из возможностей получать нейтронные сечения с достаточными для анализа характеристиками являются измерения на «квазимоноэнергетическом» пучке нейтронов.

Возможность плавного изменения энергии электронов от 4 до 9 МэВ на ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН позволяет при облучении W-мишени получать различные наборы тормозных спектров фотонов. А моделирование процессов взаимодействия электронов, фотонов и нейтронов, соответственно, с вольфрамовым конвертером, бериллиевой фотонейтронной мишенью и полиэтиленовым замедлителем W-Be-источника [2] показали возможность получения нейтронов в широкой области энергий (включая МэВ-ные энергии) при использовании тормозных фотонов с граничной энергией 4–9 МэВ. Однако энергетический спектр получаемых быстрых нейтронов широк и не позволяет исследовать энергетическую зависимость процессов, вызываемых нейтронами.

В работе [3] показана возможность получения квазимоноэнергетического спектра фотонов методом квазимонохроматизации тормозного спектра, используя тормозные спектры фотонов при различных энергиях электронов.

На рис. 118а в качестве примера представлены три энергетических спектра тормозных фотонов, получаемые при облучении W-мишени электронами с энергиями 6, 6.5 и 7 МэВ. Им соответствует квазимоноэнергетический спектр фотонов (рис. 1б) с энергией $E_\phi \sim 6.5$ МэВ и шириной на полувысоте – 0.6 МэВ.

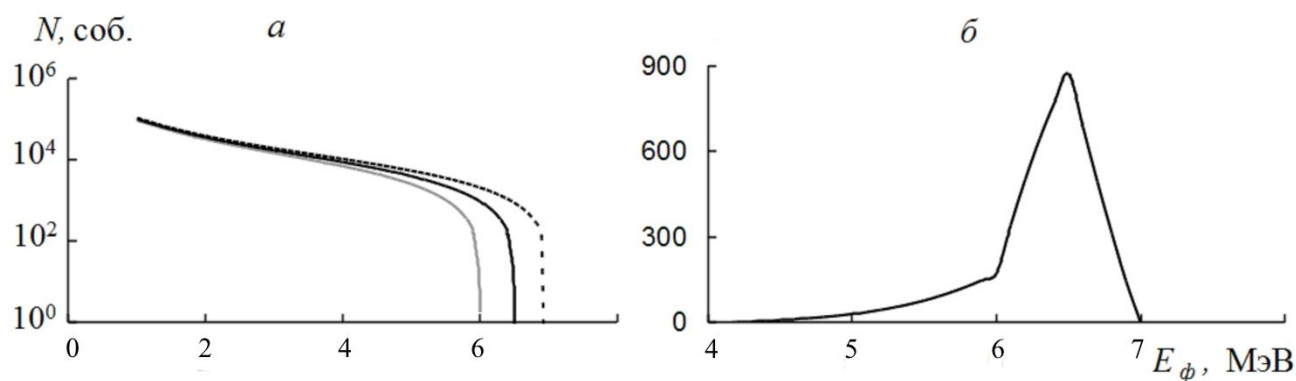


Рисунок 118. а – Тормозные спектры фотонов, соответствующие определенным энергиям электронов: $E_e - \Delta E_e = 6$ МэВ (серая сплошная линия), $E_e = 6.5$ МэВ (черная сплошная), $E_e + \Delta E_e = 7$ МэВ (пунктир); б – квазимоноэнергетический спектр фотонов с энергией $E_\phi \sim 6.5$ МэВ

Для получения нейтронов в фотонейтронном источнике используется реакция $\gamma + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be} + n$. Проведено моделирование этой реакции при энергиях фотонов, превышающих порог реакции $E_{\text{пор}} = 1.67$ МэВ. Расчеты проводились для моноэнергетического пучка фотонов с энергией в интервале 4 – 9 МэВ. На рис. 119 показаны результаты

моделирования: диаграммы «угол вылета – энергия нейтрона» для фотонов с энергиями 4 – 7 МэВ и угловая зависимость выхода нейтронов при энергии фотонов 7 МэВ.

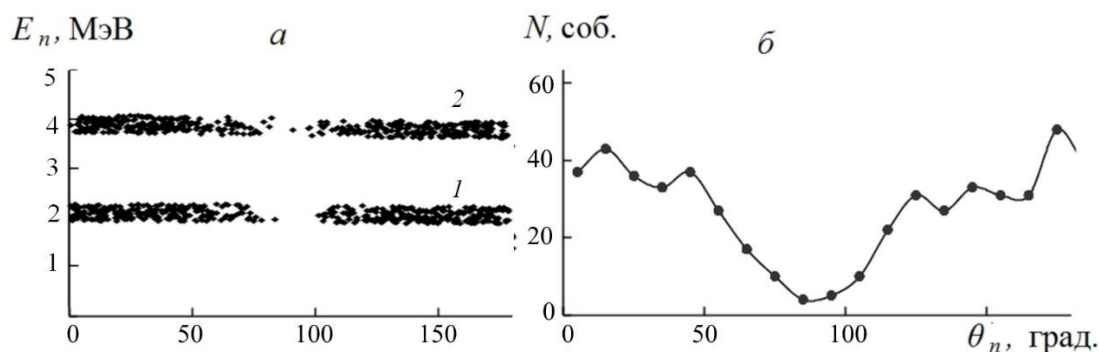


Рисунок 119. *a* – зависимость энергии нейтронов от угла их вылета при различных энергиях фотонов: 1 – $E_\phi = 4$ МэВ, 2 – $E_\phi = 7$ МэВ; *б* – угловая зависимость выхода нейтронов при энергии фотонов $E_\phi = 7$ МэВ

Из рисунка можно видеть, что нейтроны образуются в широком интервале углов и для указанных энергий фотонов могут иметь энергию в интервале $\sim 2 - 7$ МэВ. С помощью результатов моделирования и с учетом конструктивных особенностей источника можно определить оптимальный угол для выведенного пучка быстрых нейтронов.

На рис. 3 представлены результаты моделирования квазимоноэнергетических спектров нейтронов из реакции $\gamma + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^8\text{Be} + n$ при угле вылета нейтронов 150° : три варианта спектра нейтронов, рассчитанные с использованием квазимонохроматических фотонов с энергией $E_\phi = 6, 6.5$ и 7 МэВ и спектры нейтронов, рассчитанные при $E_\phi = 6$ МэВ и различном шаге по энергии электронов $\Delta E_e = 0.25$ МэВ и 1 МэВ.

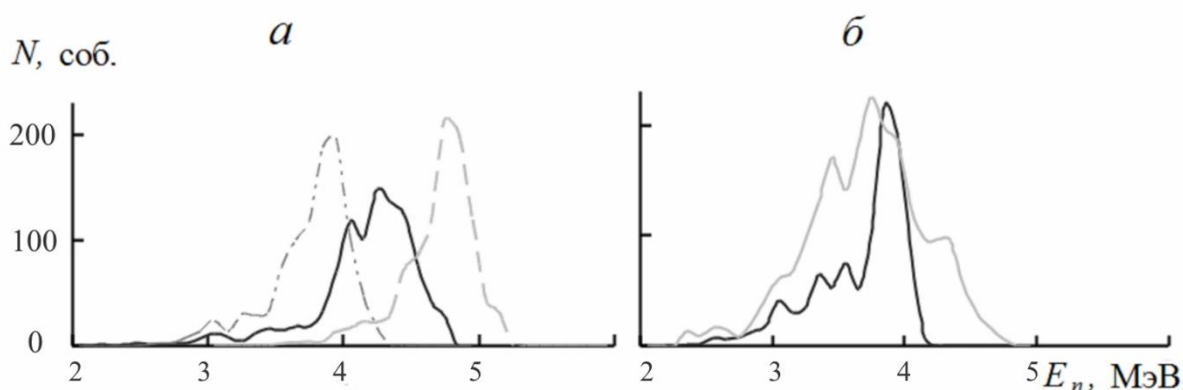


Рисунок 120. Энергетические спектры нейтронов, образующихся при облучении Ве-мишени пучками квазимонохроматических фотонов: *a* – с энергией фотонов $E_\phi = 6$ МэВ (штрих-пунктир), $E_\phi = 6.5$ МэВ (сплошная линия) и $E_\phi = 7$ МэВ (штрих); *б* – с энергией фотонов $E_\phi = 6$ МэВ и шаге $\Delta E_e = 0.25$ МэВ (черная линия) и $\Delta E_e = 1$ МэВ (серая линия)

Проведенный анализ эффективности получения квазимоноэнергетических спектров нейтронов и влияния параметров квазимонохроматизации тормозных спектров фотонов на энергетическое распределение нейтронов показал возможность получения пучка квазимоноэнергетических нейтронов на ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН.

Проведены измерения спектров нейтронов, производимых в W и Be мишенях фотонейтронного источника ускорителя ЛУЭ-8.

Были проведены измерения временных зависимостей интенсивности и энергии нейтронов во время импульса ускорителя (3.5 мкс) и в интервале между сбросами (20 мс), как без массивного замедлителя (т.н. «W-Be-фотонейтронного источника»), так и в его присутствии при разных энергиях и интенсивностях пучка электронов (рис. 121). Определена возможная геометрия для измерений типа $(n,n'\gamma)$. Из измеренных величин фона гамма-квантов, быстрых и медленных нейтронов и их распределения определено положение для размещения экспериментальной установки.

На рис. 122. показаны первые результаты одного из измерений спектра быстрых нейтронов при двух энергиях электронов (и, соответственно, фотонов из W мишени).

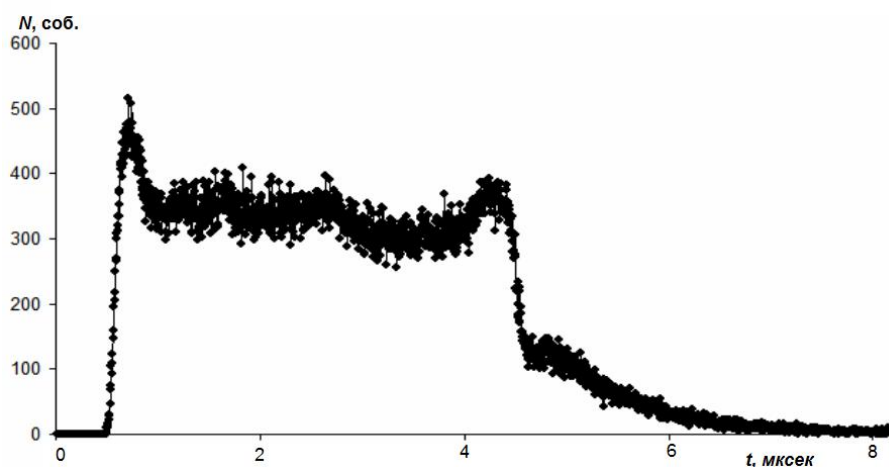


Рисунок 121. Временная зависимость интенсивности вылетающих частиц (без разделения типа) из нейтронообразующей мишени. Передний фронт измеренного распределения соответствует переднему фронту электронного импульса ускорителя

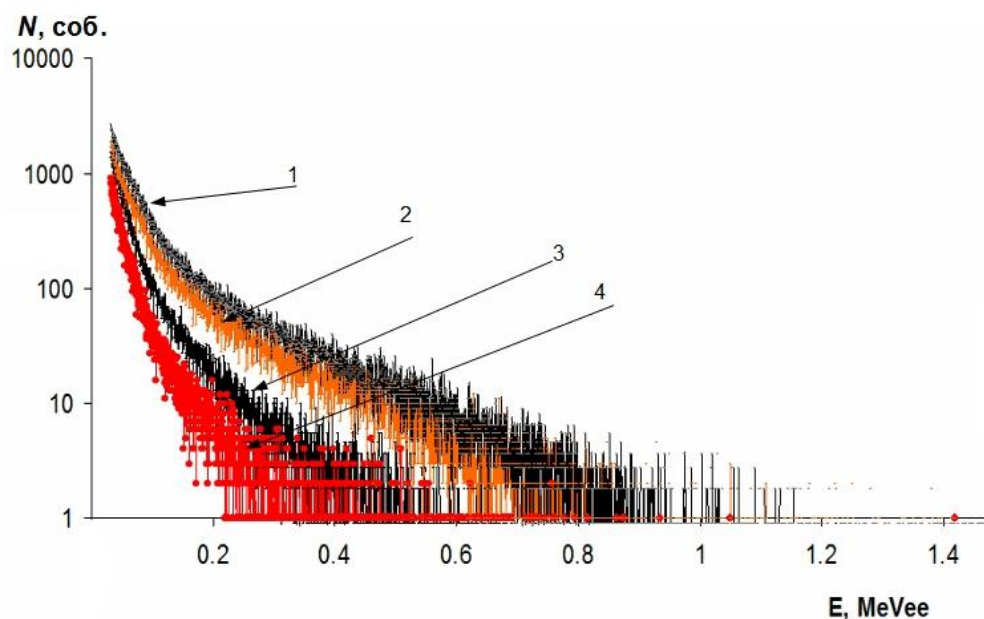


Рисунок 122. Спектры регистрируемых с помощью детектора на основе сцинтиллятора EJ301 частиц. Кривые 1 и 2 – при энергии электронов 8 и 7 МэВ соответственно без разделения типа частицы, кривые 3, 4 - то же для нейтронов. Расстояние от мишени ~10 м

Проводились работы по измерению гамма излучения от радиационного захвата замедляющихся нейтронов в материалах окружающей среды. Разработан и испытан на фотонейтронном источнике ускорителя электронов метод измерения гамма излучения от радиационного захвата нейтронов в окружающих материалах. Измерена интенсивность гамма излучения радиационного захвата замедляющихся в D_2O и H_2O мишенях нейтронов от фотонейтронного D_2O -источника на линейном ускорителе электронов (рис. 123).

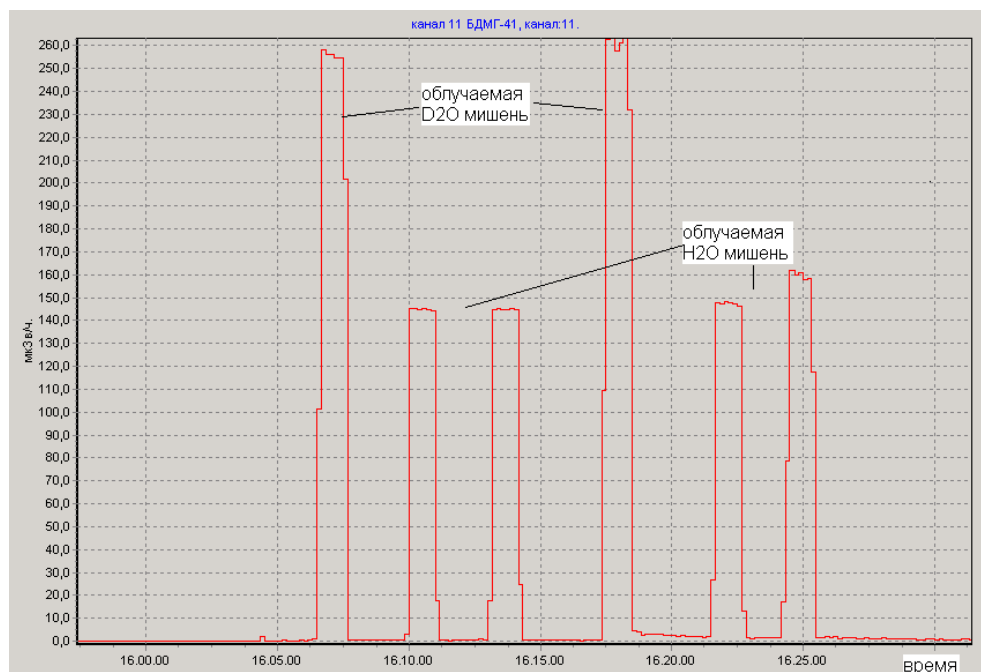


Рисунок 123. Диаграмма интенсивности гамма-фона от радиационного захвата замедляющихся в D₂O и H₂O нейтронов от D₂O-фотонейтронного источника на ускорителе электронов СЛ75-5-МТ

Разработан метод радиационного мониторинга техногенного и природного нейтронного излучения для контроля и измерения потоков нейтронов в окружающей среде. Проведены измерения нейтронного излучения вблизи линейного ускорителя протонов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д.А.Заикин и др. Изв РАН Сер Физ, 2013, т. 77. № 4, с. 449.
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. Недорезов В.Г., Конобеевский Е. С., Зуев С.В. и др. // Proc. 67 Int. Conf. "NUCLEUS-2017". Almaty. 2017. P. 88.

Результаты проведенных в 2017 году работ доложены на Международной конференции NUCLEUS 2017 и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача «Эксперимент АЛИСА (ЦЕРН)».

Важную роль в триггерной системе установки АЛИСА играет детектор T0, предназначенный для формирования триггерных сигналов нулевого уровня (LM), которые используются для мониторингирования и определения светимости, диагностики пучка. Высокая надежность, стабильность и отсутствие чувствительности к фоновым событиям сделали детектор T0 опорным детектором для настройки триггерных сигналов для всех триггерных детекторов.

Анализ работы детектора T0 в 2017 году показал, что основные его параметры, необходимые для выполнения его основных функций, продолжают соответствовать техническим требованиям эксперимента ALICE. Для обеспечения дальнейшей стабильной работы детектора T0 требуется регулярное техническое обслуживание, проведение ежегодных пусконаладочных работ и непрерывный мониторинг параметров детектора T0 в режиме «on-line» с соответствующим контролем после реконструкции событий.

В 2017 году сотрудники группы ИЯИ, МИФИ совместно с University of Jyväskylä (Финляндия) в рамках коллаборации ALICE-T0 приняли участие в круглосуточных сеансах физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и ядер ксенона и обеспечили непрерывное, круглосуточное экспертное сопровождение детектора T0 и прототипа детектора ФИТ, установленного в шахте АЛИСА. Эффективность участия детектора T0 в наборе физических данных составила 98% по времени набора данных и 95 % по участию детектора в ранах.

На установке АЛИСА идентификация частиц в промежуточном интервале поперечного импульса (от 0.5 GeV/c до 3-4 GeV/c) выполняется с использованием времяпролетной системы (T0F+T0). Важной компонентой идентификации частиц является точное определение момента столкновения пучков. В настоящий момент разрешение определения момента столкновений пучков не превышает 47 пс для протонных столкновений и не зависит от значения магнитного поля и частоты взаимодействий.

Начиная с 2012 года основным люминометром эксперимента АЛИСА является детектор T0. В качестве основного сигнала для оценки светимости использовался триггерный сигнал 0TVX (сигнал генерируется, если вершина столкновения находится в пределах ± 20 см). Знание видимого (триггерного) сечения позволяет в режиме реального времени проводить мониторинг светимости.

Одним из важнейших параметров для анализа состояния ядерной материи в момент столкновения тяжелых ядер при высоких энергиях, является эллиптический поток. В связи с

будущей модернизацией детектора T0, возникла необходимость в создании отдельного программного обеспечения (ПО) для оценки эллиптического потока с использованием детектора ФИТ.

Для проверки корректности работы ПО, выполнен повторных анализ данных сеансов Pb-Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Положительный результат данной проверки, позволил перейти к применению данного ПО на новых данных. В ходе анализа, параметр центральности определялся по субдетектору V0. В течение 2017 года методом плоскости событий проводился анализ эллиптического потока и его параметров по данным, собранным в ходе сеансов Pb-Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что разработанное ПО можно использовать при модернизации детектора T0 в детектор ФИТ.

В рамках модернизации лазерной системы калибровки детектора T0, предназначенной для настройки и калибровки временных каналов с временным разрешением порядка 50 пс осуществлено исследование характеристик импульсного лазера типа PDL-800-0B фирмы Advanced Photonics Systems с длительностью светового импульса менее 40 пс на длине волны 420 нм, что соответствует спектральному диапазону чувствительности используемого в качестве детектора ФЭУ. Исследования показали возможность использования этого лазера в T0 (в случае выхода из строя основного) и в детекторе ФИТ.

В рамках программы модернизации супердетектора АЛИСА в ЛРЯФ и КОРЭ ведутся работы по изготовлению и тестированию элементов детектора ФИТ.

Проведено моделирование центральных дифракционных взаимодействий протонов.

В рамках программы модернизации детекторных систем установки ALICE продолжены работы по исследованию возможности использования модуля TRB3 для передних сцинтилляционных детекторов AD.

В пробном сеансе при столкновении ядер ксенона показана возможность определения центральности соударений с помощью детекторов ADA и ADC, подобно тому, как в течение всего времени работы ALICE центральность определялась по величине множественности детектором V0.

Эксперимент ALICE является единственным экспериментом на БАК, в котором возможна регистрация не только нейтронов, но и протонов, вылетающих вперёд в результате периферических и ультрапериферических взаимодействий ядер. Первичный анализ данных по эмиссии нуклонов вперёд в результате столкновений ядер свинца на БАК, выполненный в 2017 году, показал принципиальную возможность изучения корреляций между вылетающими вперёд протонами и нейтронами и оценки свойств ядер-остатков, образующихся в результате

электромагнитной диссоциации ядер. В случае достоверного определения числа протонов и нейтронов, испускаемых ядрами ^{208}Pb , такой анализ позволит оценить вероятности образования определенных остаточных ядер, таких как ^{206}Pb и ^{207}Pb , которые, по причине сходного к ядрам пучка отношения заряда к массе, могут транспортироваться магнитным полем БАК на большие расстояния от точки взаимодействия и проходить сквозь систему калориметров БАК.

С помощью модели RELDIS, разработанной в предыдущие годы в ИЯИ РАН, вычислены полные сечения электромагнитной диссоциации ядер ^{129}Xe на БАК при энергии соударения на нуклон-нуклонную пару 5.44 ТэВ. Полное сечение одиночной электромагнитной диссоциации при этой энергии составило 50.6 барн, взаимной диссоциации — 0.69 барн.

Эксперимент AFTER с мишенью в форме тонкого кольца, помещенного в гало пучка, предложенный в ИЯИ РАН, может быть проведен на существующих на LHC установках (например, ALICE). Мишень может помещаться в рабочее положение с помощью специального устройства после выведения пучка. Проведен расчет светимости для различных мишеней толщиной 500 мк. Интегральная светимость для Pb пучка на мишени из W при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ ТэВ составит 0.3/нбарн для измерений в течение месяца. Рассчитаны также множественности заряженных частиц для протонного пучка и пучка свинца. Показано, что при быстротах $\eta_{\text{lab}} < 6$ множественность, полученная на фиксированных мишенях, меньше, чем полученная на коллайдере. Такие процессы могут быть измерены на установке ALICE. Ожидается также большой выход чармония в эксперименте с фиксированной мишенью.

В эксперименте DSS проведена калибровка сцинтилляционных детекторов пробегового телескопа для измерений на пучке Нуклотрона ОИЯИ по поиску тонкой структуры в сечении рождения пионов на при энергии 300 - 400 МэВ на нуклон.

Выполнено моделирование образования вторичных ядер в результате электромагнитных взаимодействий ядер свинца ^{208}Pb на БАК. Полученные результаты позволяют определить наиболее критичные для работы БАК вторичные ядра с наиболее близкими к ядрам пучка отношениями заряда к массе и относительно большими сечениями их образования.

Выполнено моделирование методом Монте-Карло на основе библиотеки Geant4 терапевтических полей протонов и ядер ^4He , ^{12}C и ^{16}O , с помощью модифицированной микродозиметрической модели исследованы их радиобиологические свойства. Полученные результаты могут быть использованы при выборе оптимального пучка в случае расположения критических к облучению органов в непосредственной близости от облучаемого объема и для оценки поперечной неоднородности полей различных ионов, используемых в

экспериментальных радиобиологических исследованиях *in vitro*.

Научно-технический уровень выполненной научно-исследовательской работы находится на уровне лучших мировых достижений в данной области.

Задача «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA61)».

В 2017г. группа ИЯИ участвовала в проведении измерений выходов заряженных частиц для реакции Xe+La энергий налетающих ионов ксенона в диапазоне от 13 - 150 АГэВ/с. Полученные данные будут использоваться для исследования фазового перехода из адронного газа в кварк-глюонную плазму и поиска критической точки, а также для анализа азимутальных потоков идентифицированных частиц, образовавшихся в этой реакции.

В 2017гг. получены также новые экспериментальные данные по рождению пионов и каонов в столкновениях протонов и пионов с импульсами 30 - 120 ГэВ/с с легкими ядрами, которые необходимы для нейтринных экспериментов в FERMILAB и для физики космических лучей.

Совместно с группой НИЯУ МИФИ были разработаны новые процедура определения центральности в Pb+Pb столкновениях с использованием корреляцию между энерговыведением в центральных модулях PSD и множественностью в TPC.

Получены первые результаты анализа прямых потоков заряженных пионов, в Pb+Pb столкновений при энергии 30 ГэВ на нуклон, измеренных в эксперименте NA61/SHINE в ноябре 2016 г. Дальнейший анализ Pb+Pb данных, уже измеренных при 30, 40 и 150 АГэВ и новых данных для этой реакции при энергии 75 АГэВ (измерении которых запланировано на 2018г.) позволит впервые детально изучить зависимость прямых и эллиптических потоков протонов и пионов от центральности столкновений для нескольких точек по энергии.

Группа ИЯИ, осуществляла в 2017г. постоянную экспертную поддержку функционирования калориметра во время сеансов, вела постоянный мониторинг процесса набора и качества получаемых данных с переднего адронного калориметра, который использовался в Xe+La эксперименте для событийного определения центральности и угла плоскости реакции.

Для обеспечения стабильной работы калориметра в сеансах 2017г. была усовершенствована система питания считывающей электроники модулей калориметра, что существенно улучшило стабильность ее работы и устранило отказы, наблюдавшиеся в предыдущей версии системы считывания.

В июне 2017г. проведен 2х недельный тестовый сеанс по калибровке адронного калориметра на пучках мюонов и исследован отклик калориметра на пучках протонов в диапазоне энергий 20 - 150 ГэВ (линейность, динамический диапазон и загрузочная способность). На основе этих данных были определены калибровочные коэффициенты для всех 442 секций калориметра, которые необходимы для восстановления выделенной энергии в калориметре и для послыбытийного анализа центральности событий.

В 2017г. группв ИЯИ РАН участвовали во всех тестовых и физических сеансах, в соответствии с утвержденной в ЦЕРН программой экспериментов коллаборации NA61/SHINE. Группа ИЯИ дежурила в регулярных сменах во время всех экспериментов 2017г. Всего группа ИЯИ в течение 2017г. отдежурила около 74 смен.

В 2017г. коллаборацией начата разработка программы экспериментов на установке NA61/ на период до 2024г. Новая программа нацелена на исследование выходов частиц с открытым очарованием (open charm), D-мезонов. Для этих экспериментов интенсивность пучков ядер свинца и скорость набора данных планируется поднять более чем на порядок, ао сравнению с интенсивностью пучка действующего эксперимента. Для этого потребуется модернизация практически всех детекторов установки. Группой ИЯИ РАН в 2017г. был разработан и подготовлен проект модернизации переднего адронного калориметра для новых экспериментов NA61/SHINE после 2020г.

Подготовлено соглашение между коллаборациями CBM, NA61 и ИЯИ об использовании модулей калориметра установки CBM, изготовленных в ИЯИ РАН, для временного использования их в модернизированном адронном калориметре установки NA61/SHINE в этих экспериментах.

8-12 Мая 2017г. силами НИЯУ МИФИ и ИЯИ РАН было организовано и проведено совещание международной коллаборации NA61/SHINE в МИФИ и ИЯИ РАН.

За 2017 год коллаборацией NA61/SHINE в соавторстве с группой ИЯИ опубликовано 3 работы по данной теме. Кроме того, группой ИЯИ опубликована 2 отдельных работы.

Сотрудниками ИЯИ в 2017г. было сделано 2 доклада на международных конференциях и 9 докладов на международных рабочих совещаниях коллаборации.

Задача «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармштадт, Германия)».

В 2017 г. в ИЯИ РАН были завершены работы по изготовлению и сборке 45 модулей переднего адронного калориметра установки CBM. Эти работы проводятся в соответствие с подписанным контрактом ФАИР-ИЯИ. Ведется тестирование модулей калориметра на

космике на оборудованном стенде. Разрабатывается методика калибровки продольных секций модулей калориметра на космике В течение 2017 г. группой ИЯИ продолжались работы по тестированию на стендах в ИЯИ РАН и в GSI различных прототипов аналоговой и считывающей электроники для переднего адронного калориметра CBM.

- Проведены измерения отклика супермодуля адронного калориметра CBM на каналах вторичных пучков протонов и пионов T9 и T10 в ЦЕРНе. Для считывания сигналов с фотодиодов S12572-010P производства Hamamatsu использовалась электроника с прямым методом считывания формы импульса (быстрый АЦП ADC64s), разработанная в ОИЯИ.

- Проведены исследования отклика одного из модулей калориметра в диапазоне энергий протонов 2 – 10 ГэВ и 80 ГэВ с фотодиодами, предварительно облученными нейтронами, для определения их радиационной стойкости, предполагается использовать такие типы фотодиодов для модулей калориметра CBM. Результаты проведенных измерений показали, что энергетическое разрешение калориметра с фотодиодами, облученными потоком нейтронов 2×10^{11} нейтронов/см² падает всего лишь на 4% по сравнению с разрешением, полученным с необлученными фотодиодами.

- Было проведено моделирование (в сотрудничестве с группой в GSI) радиационных доз и потоков нейтронов, которые ожидаются для переднего адронного калориметра на установке CBM при энергиях SIS100, в зависимости от диаметра отверстия для прямого пучка в центре калориметра. Было показано, что потоки нейтронов в местах расположения фотодетекторов в 4-х центральных модулях калориметра можно существенно уменьшить, если центральное пучковое отверстие в калориметре увеличить с существующих 60 мм до 200 мм. При этом суммарный поток нейтронов на выходе центральных модулей не будет превышать 2×10^{11} нейтронов/см², что является приемлемым уровнем для стабильной работы фотодетекторов.

В 2017 г. начаты работы по проекту mCBM в ГСИ. Исследуется возможность использования одного модуля в качестве mPSD, что позволит интегрировать считывание сигналов с этого модуля в общую систему считывания и передачу данных установки mCBM и исследовать отклик модуля калориметра при нагрузках и дозах облучения, близких к ожидаемым в эксперименте CBM.

Разработана конструкция калориметра ZDC для установки BM@N с использованием модулей калориметра установки CBM. Проведено моделирование точности определения центральности и точности определения угла плоскости реакции этим калориметром. Начата подготовка к сборке калориметра в ОИЯИ. Завершена подготовка к сеансу по измерению отклика модуля калориметра CBM на пучках углерода, аргона и криптона на установке BM@N, который планируется в феврале 2018 г.

В задаче «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)» в 2017 году завершены работы по модернизации переднего 288-канального сцинтилляционного годоскопа (Forward Wall) (замена фотоумножителей, реконструкция механической платформы). Этот годоскоп планируется использовать в эксперименте Ag+Ag при энергии налетающих ядер серебра 1.65 АГэВ на ускорителе SIS18 в 2018 году для определения центральности и угла плоскости реакции в Ag+Ag столкновениях.

Проведена сборка, тестирование и монтаж модулей для 3х секторов нового электромагнитного калориметра (ECAL) установки ХАДЕС. Электромагнитный калориметр с четырьмя полностью собранными секторами (из 6) будет использован в эксперименте Ag+Ag на действующем ускорителе SIS18 в GSI уже в 2018 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 $p > 400$ МэВ/с. В 2019 г. году планируется завершить полную сборку калориметра.

Разработана методика и получены предварительные результаты по определению центральности в столкновениях ионов золота Au+Au при энергии и налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с помощью переднего годоскопа FW (Forward Wall) установки HADES. Исследовались возможность определения центральности столкновений с помощью распределения по множественности хитов в FW годоскопе. Данный метод позволит избежать различных автокорреляций, которые могут быть достаточно велики при стандартном методе определения центральности с помощью количества хитов в TOF детекторах или MDC.

Получены предварительные результаты по анализу систематики при расчетах коллективных потоков заряженных частиц в экспериментальных данных по столкновению ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке ХАДЕС в 2012 г. Исследовались эффекты, связанные с высокой плотностью треков в центральных на измеренные величины коллективных потоков и методы их коррекции.

За 2017 год коллаборацией ХАДЕС в соавторстве с группой ИЯИ опубликовано 5 статей по данной теме. Кроме того, группой ИЯИ подготовлена в печать 1 статья.

Сотрудниками ИЯИ в 2017г. было сделан 1 доклад на международной конференции и 2 доклада на международных рабочих совещаниях коллаборации.

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

В рамках темы проведено кинематическое моделирование реакций подхвата альфа-кора из ядра ${}^6\text{He}$ или ${}^6\text{Li}$ – ${}^6\text{He}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^6\text{Li}+(nn)$ и ${}^6\text{Li}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^6\text{Li}+(np)$ с регистрацией как заряженной частицы ${}^6\text{Li}$ так и нейтрона от развала синглетного nn (np) 1S_0 состояния. Показана возможность получения информации об энергии синглетных двухнуклонных состояний, исследуя форму энергетического спектра нейтронов от распада этих состояний. Проведенное моделирование определило необходимые параметры планируемого эксперимента. Методика детектирования нейтронов в эксперименте на пучке радиоактивных ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^8\text{He}$ опробована в сеансе на циклотроне У-400 в ЛФЯР ОИЯИ. Показана возможность выделения нейтронных событий от событий регистрации заряженных частиц и гамма-квантов.

В рамках темы начато исследование кластерной структуры ядра ${}^9\text{Be}$ в реакциях передачи дейтрона и квазисвободного рассеяния дейтрона на кластерах, существующих в исследуемом ядре. Результаты моделирования показали, что каждому каналу реакции соответствует своя специфическая кинематика, позволяющая выделить события связанные с реакцией на различных кластерах. Исследование проводится при энергии налетающих дейтронов 15 МэВ в НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцина. Получены предварительные результаты исследования угловой зависимости реакций ${}^9\text{Be}(d,d){}^9\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(d,t){}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(d,p){}^{10}\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}(d,\alpha){}^7\text{Li}$ с возбуждением основных и низколежащих возбужденных уровней ядер ${}^{8-10}\text{Be}$ и ${}^7\text{Li}$.

В задаче «Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров» с помощью активационно-измерительного комплекса, включающего W-Be-фотонейтронный источник нейтронов и низкофоновый гамма-спектрометр проведены измерения с использованием гамма-активационного и нейтронно-активационного анализа. Отработана методика измерений. Измерены выходы фотоядерных реакций с возбуждением изомерных состояний ядер кадмия и индия: ${}^{111}\text{Cd}(\gamma,\gamma'){}^{111m}\text{Cd}$, ${}^{113}\text{In}(\gamma,\gamma'){}^{113m}\text{In}$, ${}^{115}\text{In}(\gamma,\gamma'){}^{115m}\text{In}$ при энергии фотонов до 8 МэВ. Рассмотрены возможности радиационного гамма-спектрометрического анализа проб атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы и изучения с помощью НАА содержания и состава нерадиоактивных элементов. Для этого были разработаны методика и оборудование для сбора проб атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы. Получены временные распределения активности естественно-радиоактивных изотопов U и Th рядов, Be-7 и K-40. Отмечена корреляция в поведении активностей Be-7 и K-40 со временем. Проведен нейтронно-активационный анализ проб, отобранных на фильтрующие материалы. Отмечено содержание в них заметных следов Cl, K, Na и Mn, а также следов металлов: Zn и W. Начаты работы по изучению спектра нейтронов фотонейтронного источника. С помощью

комплекса проведены измерения методом нейтронно-активационного анализа плотности потока тепловых нейтронов внутри и вне источника. Рассмотрены способы восстановления информации о форме спектра W-Be фотонейтронного источника ИЯИ РАН и вкладов в него нейтронов тепловых и эпитепловых энергий с использованием метода нейтронно-активационного анализа. Проведено восстановление формы спектра нейтронов источника в низкоэнергетической его части. Оценены значения плотности потока нейтронов для этих областей спектра.

Результаты проведенных в 2017 году работ доложены на Международной конференции NUCLEUS 2017 и др.

Задача «Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8».

Создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Исследованы характеристики фотонейтронного источника при различных энергиях входного пучка электронов. Разработана и реализована методика, позволяющая оперативно и с хорошим воспроизведением устанавливать заданную энергию пучка пределах 4 – 10 МэВ и осуществлять эту процедуру при условии многократных коротких прерываний работы ускорителя в соответствии с требованиями эксперимента. Для изучения возможности измерения энергетической зависимости сечений фотоядерных реакций на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 использовалась процедура измерения сечений с использованием метода квазимонохроматизации тормозного спектра фотонов и отработана методика и проведены измерения методом наведенной активности энергетической зависимости выхода реакций $(\gamma, \gamma')^m$ на некоторых изотопах кадмия и индия при энергии «моноэнергетических» фотонов 4 – 8.5 МэВ. Ведутся работы по автоматизации контроля режимов основных систем ускорителя ЛУЭ-8 и исследованию параметров дифрактометра тепловых нейтронов на импульсном источнике нейтронов на базе ЛУЭ ИЯИ РАН.

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

Результаты работы доложены на Международных конференциях NUCLEUS 2017 и ICPPA - 2017 и др.

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

Продолжены работы по описанию нейтронных данных для большого количества четно-четных изотопов. Проанализирован и обсчитан большой объем информации по параметрам квадрупольной деформации ядер. Усовершенствовано программное обеспечение. Начаты работы по подготовке измерительного комплекса для получения нейтронных данных. Проведены предварительные измерения спектров нейтронов на W-Be-фотонейтронном источнике на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Определены фоны в экспериментальном зале. Проводятся исследования полей гамма и нейтронного излучений от рассеяния и радиационного захвата нейтронов в материалах окружающей среды. Отрабатывается методика нейтронных измерений на пучках с большой скважностью. Предполагается измерение нейтронных сечений для определенных изотопов и продолжение описания полученных данных с помощью упомянутой выше методики.

ПУБЛИКАЦИИ

1. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТУ АЛИСА (ЦЕРН)

Неколлаборационные публикации:

1. T. L. Karavicheva on behalf of the ALICE Collaboration, “The Fast Interaction Trigger detector for the ALICE Upgrade”, J. Phys.: Conf. Ser. 2017, V. 798, P. 012186, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012186>
2. D.A. Finogeev, V.A. Grigoriev, V.A. Kaplin, O.V. Karavichev, T.L. Karavicheva, A.S. Konevskikh, A.B. Kurepin, A.N. Kurepin, V.A. Loginov, A.I. Mayevskaya, Yu. A. Melikyan, I.V. Morozov, D.V. Serebryakov, A.I. Shabanov, M. Slupecki, A.A. Tikhonov, W.H. Trzaska, “Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT”, J. Phys.: Conf. Ser. 2017, V. 798, P. 012168, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012168>
3. А.Б.Курепин, Н.С.Топильская «Проект эксперимента AFTER с фиксированной мишенью на пучках коллайдера LHC для физики адронов и столкновений тяжелых ионов», Физика элементарных частиц и атомного Ядра (ЭЧАЯ), 2017, Т.48 №5, С.671-676.
4. A.B. Kurepin, N.S. Topilskaya “Fixed target project AFTER at the LHC beams for Heavy Ion and Hadron Physics”, Physics of Particles and Nuclei, 2017, V. 48, No 5, PP. 776-778.
5. A.Kurepin, N.Topilskaya « Heavy ion collisions in a fixed target mode at the LHC beams», EPJ Web of Conferences, 2017, V. 138, P. 03009, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201713803009>
6. S. Dewey, L. Burigo, I. Pshenichnov, I. Mishustin, M. Bleicher, “Lateral variations of radiobiological properties of therapeutic fields of H-1, He-4, C-12 and O-16 ions studied with Geant4 and microdosimetric kinetic model“, Phys.Med.Biol., 2017, V. 62, P. 5884, <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa75b2>
7. У.А.Дмитриева, И.А.Пшеничнов, «Моделирование образования вторичных ядер в результате электромагнитных взаимодействий ядер свинца ^{208}Pb на БАК», Физтех-школа Фундаментальной и Прикладной Физики. Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Составители М.В. Милов, С.О. Русскин, Е.Ю. Чиркина и др., М.: МФТИ, 2017. - 177 с., ISBN 978-5-7417-0650-3, стр.299-301

Публикации в составе коллаборации АЛИСЕ:

1. Measurement of deuteron spectra and elliptic flow in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ TeV at the LHC By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5222-x> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.10, 658.
2. Searches for transverse momentum dependent flow vector fluctuations in Pb-Pb and p-Pb

collisions at the LHC By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.).

[https://doi.org/10.1007/JHEP09\(2017\)032](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2017)032) JHEP 1709 (2017) 032.

3. Measuring K⁰S K[±] interactions using Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.09.009> Phys.Lett. B774 (2017) 64-77.

4. Linear and non-linear flow modes in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.07.060> Phys.Lett. B773 (2017) 68-80.

5. Flow dominance and factorization of transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at the LHC By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.162302> Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.16, 162302.

6. Azimuthally differential pion femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Dagmar Adamova et al.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.222301> Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.22, 222301.

7. Production of muons from heavy-flavour hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.03.049> Phys.Lett. B770 (2017) 459-472.

8. Production of π^0 and η mesons up to high transverse momentum in pp collisions at 2.76 TeV By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5144-7> <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4890-x> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.5, 339, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 586.

9. Measurement of D-meson production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5090-4> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.8, 550.

10. Energy dependence of forward-rapidity J/ ψ and $\psi(2S)$ production in pp collisions at the LHC By ALICE Collaboration (Shreyasi Acharya et al.). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4940-4> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.6, 392.

11. K⁰(892) and $\phi(1020)$ meson production at high transverse momentum in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.95.064606> Phys.Rev. C95 (2017) no.6, 064606.

12. Production of $\Sigma^\pm(1385)$ and $\Xi^0(1530)$ in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV By ALICE Collaboration (Dagmar Adamova et al.). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4943-1> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.6, 389.

13. Insight into particle production mechanisms via angular correlations of identified

particles in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5129-6> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.8, 569.

14. Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.07.017> Phys.Lett. B772 (2017) 567-577.

15. W and Z boson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV By ALICE

Collaboration (Jaroslav Adam et al.). [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2017\)077](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2017)077) JHEP 1702 (2017) 077.

16. Determination of the event collision time with the ALICE detector at the LHC By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11279-1>

Eur.Phys.J.Plus 132 (2017) no.2, 99.

17. Measurement of the production of high-pT electrons from heavy-flavour hadron decays in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.05.060> Phys.Lett. B771 (2017) 467-481.

18. Evolution of the longitudinal and azimuthal structure of the near-side jet peak in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.034904> Phys.Rev. C96 (2017) no.3, 034904.

19. Anomalous evolution of the near-side jet peak shape in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.102301> Phys.Rev.Lett. 119 (2017) no.10, 102301.

20. Measurement of electrons from beauty-hadron decays in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

[https://doi.org/10.1007/JHEP07\(2017\)052](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2017)052) JHEP 1707 (2017) 052.

21. J/ψ suppression at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.12.064> Phys.Lett.

B766 (2017) 212-224.

22. Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.). <https://doi.org/10.1038/nphys4111>

Nature Phys. 13 (2017) 535-539.

23. Measurement of azimuthal correlations of D mesons and charged particles in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV and p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV

By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4779-8> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.4, 245.

24. Charged-particle multiplicities in proton–proton collisions at $\sqrt{s}=0.9$ to 8 TeV

By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-4571-1> Eur.Phys.J. C77 (2017) no.1, 33.

25. ϕ -meson production at forward rapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 5.02$ TeV and in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.01.074> Phys.Lett. B768 (2017) 203-217.

26. Centrality dependence of high-pT D meson suppression in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV By ALICE Collaboration (Jaroslav Adam et al.).

[https://doi.org/10.1007/JHEP06\(2017\)032](https://doi.org/10.1007/JHEP06(2017)032) [https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2015\)205](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2015)205) JHEP 1511 (2015) 205, Addendum: JHEP 1706 (2017) 032.

Доклады на совещаниях коллаборации ALICE в 2017 году:

1. Update on new T0+ simulations , Alla Maevskaya , Tatiana Karavicheva, FIT Collaboration Meeting 6-04-2017

2. FIT update on prototype read-out, Tatiana Karavicheva, FIT Collaboration Meeting 6-04-2017

3. FIT readout GBT design progress, Dmitry Finogeev , , FIT Collaboration Meeting 6-04-2017

4. FIT readout GBT design progress, Dmitry Finogeev , , FIT Collaboration Meeting 4-05-2017

5. Update on electronics, Dmitry Serebryakov , Tatiana Karavicheva , FIT Collaboration Meeting 1-06-2017

6. FIT readout GBT design progress, Dmitry Finogeev, FIT Collaboration Meeting 1-06-2017

7. FIT/O2 Brainstorming, T.Karavicheva, ALICE review meeting ,26-06-2017

8. FIT concept and performance ,T. Karavicheva, FIT EDR meeting, 21 -06-2017

9. Update of electronics and readout , T. Karavicheva, FIT EDR meeting, 21 -06-2017

10. Laser calibration system, T. Karavicheva , FIT EDR meeting, 21 -06-2017

11. FIT concept and performance , T. Karavicheva , FIT EDR meeting, 21 -06-2017

12. Mechanics, integration and cabling , T. Karavicheva , FIT EDR meeting, 21 -06-2017

Доклады на международных конференциях:

1. Т. Каравичева, Быстродействующие черенковские детекторы для триггерной и времяпролетной систем супердетектора АЛИСЕ Большого адронного коллайдера ЦЕРН, конференция «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», Десятые Черенковские чтения, Москва, 18-04-2017

2. I.A. Pshenichnov, U.A. Dmitrieva, «Excitation and decay of relativistic nuclei in

ultraperipheral collisions studied with RELDIS and other models», Приглашенный доклад на международной конференции EMMI Workshop «Challenges in photon induced interactions», г. Краков, Польша, 5 - 8 сентября 2017 г.

3. Н.С.Топильская, А.Б.Курепин "Study of heavy-ion and proton interactions with nuclei on the LHC beams with fixed target", The 3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, ICPPA'17, 2-5 October 2017, Moscow.

Доклад на всероссийской конференции:

1. У.А.Дмитриева, И.А.Пшеничнов, Моделирование образования вторичных ядер в результате электромагнитных взаимодействий ядер свинца ^{208}Pb на БАК 60-я Всероссийская научная конференции МФТИ, Долгопрудный, МФТИ, ноябрь 2017.

2. А.И. Шабанов, Резонанс Ропера в дифракционных исследованиях в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере, 60-я Всероссийская научная конференции МФТИ, Долгопрудный, МФТИ, ноябрь 2017.

2. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ В АДРОН-ЯДЕРНЫХ И ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НА УСКОРИТЕЛЕ SPS В ЦЕРН (ЭКСПЕРИМЕНТ NA61)»

1. Measurement of meson resonance production in $\pi^+ + \text{C}$ interactions at SPS energies, NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U.), ... E.V. Andronov, O. Busygina, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kurepin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Sadovsky, I. Selyuzhenkov, A. Taranenko, ..., et al.), Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 626 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5184-z

2. Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, p and p^- spectra in proton-proton interactions at 20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS, NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U.), ... O. Busygina, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kurepin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Sadovsky, I. Selyuzhenkov, A. Taranenko, V.V. Vechernin, ... et al.), Eur.Phys.J. C77 (2017) no.10, 671 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5260-4

3. Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in inelastic p + p interactions at the CERN Super Proton Synchrotron, NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U. (main)), ... O. Busygina, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kurepin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Sadovsky, I. Selyuzhenkov, Taranenko, ... et al.), Eur.Phys.J. C77 (2017) no.2, 59 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4599-x

4. Hadron calorimeter (PSD) with new photo-detectors (MPPC) in NA61 experiment at CERN, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, A. Kurepin (Moscow, INR), S. Morozov, O. Petukhov (Moscow, INR & Moscow Phys. Eng. Inst.), I. Selyuzhenkov (Moscow Phys. Eng. Inst. & Darmstadt, GSI), A. Taranenko (Moscow Phys. Eng. Inst.). 2017. 4 pp. J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012073 DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012073

5. Hadron calorimeter (Projectile Spectator Detector - PSD) of NA61/SHINE experiment at CERN M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov (Moscow, INR), A. Senger (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH (GSI), Darmstadt, Germany) (for NA61/SHINE Collaboration) Submitted to Journal of Physics: Conference Series

3. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЖАТОЙ БАРИОННОЙ МАТЕРИИ НА УСТАНОВКЕ CBM В GSI (ДАРМШТАДТ, ГЕРМАНИЯ)».

1. Challenges in QCD matter physics --The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR CBM Collaboration (T. Ablyazimov (Dubna, JINR),..., 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,..., *et al.*). Eur.Phys.J. A53 (2017) no.3, 60 DOI: 10.1140/epja/i2017-12248-y e-Print: arXiv:1607.01487 [nucl-ex] |

2. The PSD supermodule response study at proton beam energies 2-5 GeV at CERN test beams D. Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, N. Karpushkin, S. Morozov and A. Reshetin Submitted to Journal of Physics: Conference Series

3. Radiation hardness of Silicon Photomultipliers for CBM@FAIR, NA61@CERN and BM@N experiments V. Mikhaylov^{a,b}, F. Guber^c, A. Ivashkin^c, A. Kugler^a, V. Kushpil^a, S. Morozov^c, O. Svoboda^a, P. Tlustý^a Nuclear Physics Institute, Czech Academy of Sciences, Řež, Czech Republic ^b Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Prague, Czech Republic ^c Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences Accepted at NIM A, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.066>

4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ ВЕКТОРНЫХ МЕЗОНОВ В АДРОН-ЯДЕРНЫХ И ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НА УСТАНОВКЕ HADES (GSI, ГЕРМАНИЯ)»

1. A facility for pion-induced nuclear reaction studies with HADES. HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI),..., M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, T.Karavicheva,

A. Kurepin, A. Lebedev, S. Morozov, O. Petukhov, A. Reshetin, A. Sadovsky, E. Usenko, ..., *et al.*). 2017. 23 pp. Published in Eur.Phys.J. A53 (2017) no.9, 188 DOI: 10.1140/epja/i2017-12365-7

2. Analysis of the exclusive final state $npe+e^-$ in quasi-free np reaction HADES

Collaboration (J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) ,..., M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, T. Karavicheva, A. Kurepin, A. Lebedev, S. Morozov, O. Petukhov, A. Reshetin, A. Sadovsky, E. Usenko, ..., *et al.*). Mar 24, 2017. 12 pp. Published in Eur.Phys.J. A53 (2017) no.7, 149 DOI: 10.1140/epja/i2017-12341-3 e-Print: arXiv:1703.08575 [nucl-ex]

3. Deep sub-threshold $\{\phi\}$ production and implications for the K^+/K^- freeze-out in

Au+Au collisions HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch, ..., M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, T. Karavicheva, A. Kurepin, A. Lebedev, S. Morozov, O. Petukhov, A. Reshetin, A. Sadovsky, E. Usenko, ..., *et al.*). Mar 24, 2017. 6 pp. e-Print: arXiv:1703.08418

4. $\Delta(1232)$ Dalitz decay in proton-proton collisions at $T=1.25$ GeV measured with HADES at GSI

HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) ,..., M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, T. Karavicheva, A. Kurepin, A. Lebedev, S. Morozov, O. Petukhov, A. Reshetin, A. Sadovsky, E. Usenko, ..., *et al.*). Mar 22, 2017. 12 pp. Published in Phys.Rev. C95 (2017) no.6, 065205 DOI: 10.1103/PhysRevC.95.065205

5. Inclusive Λ production in proton-proton collisions at 3.5 GeV HADES Collaboration (J.

Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) ,..., M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, T. Karavicheva, A. Kurepin, A. Lebedev, S. Morozov, O. Petukhov, A. Reshetin, A. Sadovsky, E. Usenko, ..., *et al.*). Nov 3, 2016. 10 pp. Published in Phys.Rev. C95 (2017) no.1, 015207 DOI: 10.1103/PhysRevC.95.015207

6. Tests of the Electromagnetic Calorimeter for HADES Experiment at GSI T Galatyuk, M

Golubeva, F Guber, A Ivashkin, A Kugler, S Morozov¹, O Petukhov, A Reshetin, A Rost, A Shabanov, O Svoboda, P Tlusty Submitted to Journal of Physics: Conference Series

4. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ЭКСПЕРИМЕНТ MPD/NICA»

1. Study of nuclear fragmentation at MPD/NICA M.B. Golubeva, A.P. Ivashkin, A.B.

Kurepin (Moscow, INR). 2017. 4 pp. Published in EPJ Web Conf. 138 (2017) 11001

2. Forward hadron calorimeter at MPD/NICA M. Golubeva (Moscow, INR) et al.. 2017. 4

pp., 11 authors Published in J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012074

3. The construction and parameters of Forward Hadron Calorimeter (FHCAL) at MPD/NICA D.Finogeev, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Izvestny, S.Morozov and O.Petukhov Submitted to Journal of Physics: Conference Series

6. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, ДИНАМИКА ЯДЕРНЫХ И ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, ФИЗИКА РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ»

Статьи в реферируемых журналах (включая работы, принятые к печати)

1. V.Sokhoyan, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Determination of the scalar polarizabilities of the proton using beam asymmetry Σ_3 in Compton scattering. Eur. Phys. J. A, v. 53, No. 2 (2017) 14.

2. V.L.Kashevarov, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov et al. Study of η and η' photoproduction at MAMI. Phys. Rev. Lett. 118, Iss. 21, 212001 (2017).

3. M.Dieterle, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of the polarization observable E and helicity-dependent cross sections in single π^0 photoproduction from quasi-free nucleons. Physics Letters B 770 (2017) 523–531.

4. L. Witthauer, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Helicity-dependent cross sections and double-polarization observable E in η photoproduction from quasi-free protons and neutrons. Phys. Rev. C 95, No. 5, 055201 (2017).

5. P.Adlarson, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decay at MAMI. Phys. Rev. C 95, Iss. 2, 025202 (2017).

6. P.Adlarson, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ and $\eta \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decays with the A2 setup at MAMI. Phys. Rev. C 95, Iss. 3, 035208 (2017).

7. G.M.Gurevich, V.P.Lisin. Measurement of the Proton Spin Polarizabilities at MAMI. Physics of Particles and Nuclei, v 48, No. 1 (2017) 111–116.

8. 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 (in print).

9. L. Z. Dzhilavyan, A. M. Lapik, V. G. Nedorezov, and B. A. Tulupov. Separation of Contributions of Isovector $E2$ and $E1$ Giant Resonances in Direct and Inverse Reactions with Real and Virtual Photons. Physics of Particles and Nuclei, 2017, Vol. 48, No. 1, pp. 81–88.].

10. Л.З. Джилавян, В.Г. Недорезов. Об исследованиях реакции $(\gamma, \gamma')^m$ на среднетяжелых ядрах вблизи фотонейтронных порогов. Препринт ФИАН (в печати).

11. А.В. Русаков, К.А. Иванов, Н.А. Борисов, И.Н. Цымбалов, Д.А. Горлова, А.М. Лапик, А.С. Ларькин, В.П. Лисин, И.М. Мордвинцев, А.Н. Мушкаренков,

В.Г. Недорезов, А.Л. Полонский, А.Б. Савельев-Трофимов, А.А. Туринге, «Электронный магнитный спектрометр для экспериментов на тераваттном фемтосекундном лазере». Приборы и техника эксперимента, 2017, № 5, с. 85–89.

12. Д.А.Горлова, В.Г.Недорезов, К.А.Иванов, А.Б.Савельев, А.А.Туринге, И.Н.Цымбалов. К возможности генерации позитронов низких энергий на электронных ускорителях с энергией пучка несколько МэВ и на тераваттных лазерах. Quantum Electronics 47 (6) 522 – 527 (2017).

13. А. В. Андреев, Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, В. Г. Недорезов. О возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника. Известия РАН. Серия Физическая, том 81, № 6, с. 824–827 (2017).

14. Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. Н. Лифанов, М. В. Мордовской, В. Г. Недорезов / Исследование радиационно-защитных свойств материалов с использованием метода γ -поглощения в широком диапазоне энергий γ -квантов // Известия РАН. Серия физическая, 2017, том 81, № 6, с. 828–830.

15. В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. Л. Полонский, А. А. Туринге, Возбуждение изомерных состояний ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In фотонами с энергией до 8 МэВ. Ядерная физика, 80, № 5, 423–426 (2017).

16. L. Z. Dzhilavyan*, A. M. Lapik, V. G. Nedorezov, and B. A. Tulupov, Разделение вкладов изовекторных E2 и E1 гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами. ЭЧАЯ 48, 1, 1-8, (2017).

17. В. Г. Недорезов, А. Б. Савельев-Трофимов. Ядерная фотоника, Ядерная физика и инжиниринг, 7, № 6, 1–8 (2017).

18. И. Н. Цымбалов, Р. В. Воклов, Н. В. Еремин, К. А. Иванов, В.Г.Недорезов, А. А. Пасхалов, А. Л. Полонский, А. Б. Савельев, Н. М. Соболевский, А. А. Туринге, С. А. Шуляпов. Исследование реакции $D(\gamma, n)H$ вблизи порога с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения. Ядерная физика, 80, 3, 1-5 (2017). Индекс – 0.914

19. С. В. Зуев, В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, А. А. Туринге. Разработка метода измерений сечений фотоядерных реакций с использованием модельно рассчитанных спектров квазимоноэнергетических фотонов, Ядерная физика, в печати .

20. А.А.Туринге, В.Г.Недорезов, А.Б.Савельев. Изучение фотоядерных реакций на ускорителе электронов и фемтосекундном лазере. ЭЧАЯ, в печати (2017).

21. A.A. Turinge, A.M. Lapik, A.N. Mushkarenkov, V.G. Nedorezov, N.V. Rudnev.
Emission of d, t, ^3He and α -particles from ^{12}C nuclei excited by intermediate energy photons. in EPJ Web Conf. 138 (2017) 01005.
22. A.A. Turinge, A.M. Lapik, A.N. Mushkarenkov, V.G. Nedorezov, N.V. Rudnev.
Fragmentation of light nuclei by intermediate energy photons. Phys.Part.Nucl. 48 (2017) no.1, 95-101 .
23. Иванов К. А., Цымбалов И. Н., Лапик А. М., Полонский А. Л., Русаков А. В., Туринге А. А., Иванов О. П., Савельев-Трофимов А. Б., Недорезов В. Г. Измерение рентгеновских спектров фемтосекундной лазерной плазмы с помощью детектора Medipix. ЭЧАЯ, принято в печать (2017).
24. S. A.P. Bauer, A. Lapik, A. Mushkarenkov, V. Nedorezov, N. Rudnev e.a.
Commissioning and initial experimental program of the BGO-OD experiment at ELSA. EPJ Web Conf. 130 (2016) 07013.
25. T. Zimmermann A. Lapik, A. Mushkarenkov, V. Nedorezov, N. Rudnev *et al.*
Polarised Photon Beams for the BGO-OD Experiment at ELSA, JPS Conf.Proc. 10 (2016) 032003.
26. T.C. Jude, A. Lapik, A. Mushkarenkov, V. Nedorezov, N. Rudnev, Strangeness Photoproduction at the BGO-OD Experiment BGO-OD Collaboration, JPS Conf.Proc. 10 (2016) 032002.
27. Г.С. Алешин? Р.А. Алиев, С.С. Бельшев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, С.Н. Калмыков, А.А. Кузнецов, , А.Б. Приселкова, В.В. Ханкин. Возможности фотоядерного получения медицинского радионуклида ^{67}Cu . Радиохимия (в печати).
28. Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. Модельное описание фотоядерного $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ активационного детектирования углерода. Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14, № 5(210). С. 1–8.

Доклады на конференциях и школах

1. Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Недорезов В.Г., Пономарев В.Н., Поташев С.И., Солодухов Г.В. / Измерение энергетического распределения и методика оперативной перестройки энергии пучка электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 при исследованиях на нейтронном источнике ИН-ЛУЭ ИЯИ РАН // Международная конференция «Ядро-2017» 67-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алматы, Казахстан, 12-15 сентября 2017г.
2. И.В. Мешков, С.П.Кузнецов, С.И.Поташев, Ю.М.Бурмистров, С.Х.Караевский, С.В.Зуев, Г.В.Солодухов / Исследование зависимости выхода нейтронов на вольфрамовой

мишени от энергии электронов ускорителя луэ-8 с помощью детекторов на основе гелия-3 и бора-10 // Международная конференция «Ядро-2017» 67-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алматы, Казахстан, 12-15 сентября 2017г.

3. V.Nedorezov, E.Konobeevski, S.Zuyev, G.Solodukhov, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Turinge / Study of photonuclear reactions using a quasi-monoenergetic photon beam of LUE-8-5 accelerator // International session-conference "Physics of fundamental interactions" dedicated to 50th anniversary of Baksan Neutrino Observatory Nalchik, Kabardino-Balkaria June 6–8, 2017

4. Nedorezov V.G. Pigmy resonance in soft nuclei measured through excitation of spin isomers», пленарный доклад. Int/Conf. «Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory (SSNET'17 Conference)» . 5 – 11 ноября 2017 г., Франция, Сакле,

5. Туринге А.А. Недорезов В. Г. , А.Б.Савельев, «Изучение фотоядерных реакций вблизи порога на ускорителе электронов и фемтосекундном лазере». Секционный доклад. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». 6 - 8 июня 2017 г. Нальчик,

6. Измерение рентгеновских спектров фемтосекундной лазерной плазмы с помощью детектора Medipix. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». 6 - 8 июня 2017 г. Нальчик, пленарный доклад.

7. В. Г. Недорезов, А. Б. Савельев-Трофимов. Ядерная фотоника. «X – Черенковские чтения», ФИАН, 2017, пленарный доклад.

8. V.Nedorezov, E.Konobeevski, S.Zuyev , «Development of methods of quasi-monochromatization of bremsstrahlung phonon spectrum for measuring cross sections photonuclear reaction near the threshold» Международная конференция «Ядро-2017» : 67-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алматы, Казахстан, 12-15 сентября 2017г, Секционный доклад.

Препринты

1. V.L.Kashevarov, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov et al. Study of η and η' photoproduction at MAMI. arXiv:1701.04809v1 [nucl-ex].

2. L. Witthauer, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Helicity-dependent cross sections and double-polarization observable E in η photoproduction from quasi-free protons and neutrons. arXiv:1704.00649v1 [nucl-ex].

3. L. Witthauer, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Insight into the Narrow Structure in η Photoproduction on the Neutron from Helicity-Dependent Cross Sections. arXiv:1702.01408 [nucl-ex].

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. arXiv:1709.04230.

5. M.Dieterle, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of the polarization observable E and helicity-dependent cross sections in single π^0 photoproduction from quasi-free nucleons. arXiv:1705.07342.

Патенты

Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Латышева Л.Н., Мордовской М.В., Пономарёв В.Н., Солодухов Г.В., Соболевский Н.М. «Фотонейтронный источник». Патент РФ на изобретение № 2 634 330, G21G 4/02, 01.02.2017

7. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НУКЛОНОВ С МАЛОНУКЛОННЫМИ СИСТЕМАМИ И ЛЁГКИМИ ЯДРАМИ НА ПУЧКАХ МОСКОВСКОЙ МЕЗОННОЙ ФАБРИКИ»

Статьи вышедшие:

1. В. В. Мицук, М.В. Мордовской Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO ТРУДЫ МФТИ. 2017. Том 9. № 4. Стр. 43-49.
2. E Konobeevsky, A Kasparov, M Mordovskoy, S Zuyev, V Lebedev and A Spassky Study of n-n correlations in $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012076.
3. E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky Determination of Energy of n n-Singlet Virtual State in $d+{}^2\text{H} \rightarrow p+p+n+n$ Reaction Few-Body Systems, 58 (2017) 017-1272-8.
4. 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, том 81, № 6, с. 753–757.
5. С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский Оптимизация спектров коррелирующих наблюдаемых в многочастичных реакциях Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2017. №3. С. 195–201.

Статьи, принятые в печать:

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-развала Ядерная физика (Принята в печать).

2. 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 (Принята в печать).

Патенты

1. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. «Программа для кинематического моделирования экспериментов по изучению реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии (DBKin)». Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017661947 (25.10.2017)
2. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. «Программа для оптимизации спектров коррелирующих наблюдаемых (SpCorr)». Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017662450 (08.11.2017).

Препринты:

3. Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Kukulin V.I., and Pomerantsev V.N. / New estimation for neutron-neutron scattering length: charge symmetry and charge independence breaking revisited / arXiv:1703.00519v1 [nucl-th].

Доклады на конференциях:

4. Е. Konobeevski, А. Kasparov, V. Kukulin, V. Lebedev, M. Mordovskoy, V. Pomerantsev, A. Spassky, S. Zuyev Determination of low-energy parameters of nn interaction in few-nucleon reactions Международная конференция «Ядро-2017» 67-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алматы, Казахстан, 12-15 сентября 2017г.
5. Е. Konobeevski, V. Zavarzina, S. Zuyev, A. Kasparov, A. Kurlovich, V. Mitsuk A possibility of studying neutron-neutron correlation in halo nuclei Международная конференция «Ядро-2017» 67-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алматы, Казахстан, 12-15 сентября 2017г.
6. В.В. Мицук, М.В. Мордовской Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO. Физика элементарных частиц и космология. III Межинститутская молодежная конференция. 27-28 апреля 2017 г. МФТИ (ГУ), Московская область, г. Долгопрудный.
7. Е. Konobeevski, А. Kasparov, V. Lebedev, M. Mordovskoy, A. Spassky, S. Zuyev Study of nn-interaction in nd- and dd-reactions International seminar ISINN- 2017 Dubna, Russia, May 22 – 26, 2017.
8. Е. Konobeevski, А. Kasparov, V. Lebedev, M. Mordovskoy, A. Spassky, S. Zuyev Study of Charge Symmetry Breaking Effect in dd- and Nd-Breakup Reactions Доклад на Межд.

сессии-конф. Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». 6 - 8 июня 2017 г. Нальчик, КБР.

9. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. Метод оптимизации спектров коррелирующих наблюдаемых в ядерных реакциях LXX Международная конференция «Герценовские чтения – 2017» Санкт-Петербург, Россия, 10-14 апреля 2017 г.

8. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ЯДЕР С ЯДРАМИ ПРИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЯХ»

Статьи вышедшие:

- 1 В. В. Мицук, М.В. Мордовской Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO ТРУДЫ МФТИ. 2017. Том 9. № 4. Стр. 43-49.
- 2 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, том 81, № 6, с. 753–757.

Статьи, принятые в печать:

- 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 (Принято в печать).

Патенты

- 1 Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. «Программа для кинематического моделирования экспериментов по изучению реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии (DBKin)». Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017661947 (25.10.2017)
- 2 Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. «Программа для оптимизации спектров коррелирующих наблюдаемых (SpCorr)». Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017662450 (08.11.2017).

Доклады на конференциях

- 1 Е. Konobeevski, V. Zavarzina, S. Zuyev, A. Kasparov, A. Kurlovich, V. Mitsuk A possibility of studying neutron-neutron correlation in halo nuclei Международная конференция «Ядро-2017» 67-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Алматы, Казахстан, 12-15 сентября 2017г.
- 2 В.В. Мицук, М.В. Мордовской Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO Физика элементарных частиц и космология. III Межинститутская молодежная конференция. 27-28 апреля 2017 года. МФТИ (ГУ), Московская область, г. Долгопрудный.
- 3 Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. Метод оптимизации спектров коррелирующих наблюдаемых в ядерных реакциях LXX Международная конференция «Герценовские чтения – 2017» Санкт-Петербург, Россия, 10-14 апреля 2017.
- 4 Мицук В.В., Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В. Исследование энергетических уровней легких ядер в $d-{}^9\text{Be}$ взаимодействии – Тезисы доклада - VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 16-21 апреля 2018 г, МИФИ, Москва.

Заявки на гранты

- 1 Заявка на грант РФФИ 2018, 18-12-00489 «Экспериментальное исследование кластерной структуры легких ядер в квазисвободных реакциях» рук. Е.С.Конобеевский

- 2 Заявка на грант РФФИ 2018, 18-32-00944 «Экспериментальное исследование кластерной структуры ядра ${}^9\text{Be}$ в реакциях квазисвободного рассеяния и передачи дейтрона» Афонин А.А. (рук.), Каспаров А.А., Мицук В.В.

9. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АППАРАТУРЫ НИЗКОФОНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕРМАНИЕВЫХ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОВ»

Статьи вышедшие:

- 1 А. В. Андреев, Ю. М. Бурмистров, С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской, В. Г. Недорезов Возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника Известия РАН. Серия физическая, 2017, том 81, № 6, с. 824–827.
- 2 В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. Л. Полонский, А. А. Туринге Возбуждение изомерных состояний ${}^{111\text{m}}\text{Cd}$, ${}^{113\text{m}}\text{In}$, ${}^{115\text{m}}\text{In}$ фотонами с энергией до 8 МэВ Ядерная физика, 2017, том 80, № 5, с. 423 –426.

Статьи, принятые в печать:

- 1 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 (Принято в печать).
- 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 (Принято в печать).

Доклады на конференциях

- 1 Андреев А.В., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Плетников Е.В. Радиационный гамма-спектрометрический анализ проб атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 315.
- 2 Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В., Плетников Е.В. Изучение с помощью нейтронно-активационного анализа состава нерадиоактивных элементов в пробах атмосферных аэрозолей и наземных выпадений из атмосферы International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 313.
- 3 Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. Изучение возможности восстановления теплового и эпитеплового спектра нейтронов фотонейтронного источника иран по данным нейтронно-активационного анализа International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 77.

- 4 Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. Возможность восстановления тепловой и эпитепловой частей спектра нейтронов фотонейтронного источника методом нейтронно-активационного анализа 60-я Научная конференция МФТИ 20-25 ноября 2017, Долгопрудный.

10. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-8»

Статьи вышедшие:

- 1 S Potashev, Yu Burmistrov, A Drachev, S Karaevsky, E Konobeevski and S Zuyev Two-dimensional solid state gaseous detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012160.
- 2 В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. Л. Полонский, А. А. Туринге Возбуждение изомерных состояний $^{111\text{m}}\text{Cd}$, $^{113\text{m}}\text{In}$, $^{115\text{m}}\text{In}$ фотонами с энергией до 8 МэВ Ядерная физика, 2017, том 80, № 5, с. 423 –426.
- 3 С. Х. Караевский, С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, А. А. Афонин, В. И. Разин Двумерные детекторы тепловых и холодных нейтронов размерами 120×120 мм и 380×380 мм с активным слоем из бора-10 Научное приборостроение, 2017, том 27, № 1, с. 10–18.
- 4 С.И. Поташев, В.П. Заварзина, А.А. Афонин Описание экспериментальных данных малоуглового рассеяния нейтронов на сплаве NiCrAl в рамках квантовой механики и в классической модели полидисперсных шаров Краткие сообщения по физике ФИАН №9, 2017 с. 38-45.

Статьи, принятые в печать:

- 1 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 The possibility of detecting fast neutrons in a solid-gas detector based on a ^{10}B layer IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series (in print).
- 2 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 (направлено в печать).

- 3 С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, Е. С. Конобеевский, И. В. Мешков, С. В. Зуев, В. Н. Марин Применение детектора с активным слоем ^{10}B для регистрации тепловых и быстрых нейтронов Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования (направлено в печать).

Препринты:

- 1 С. Х. Караевский, С. И. Поташев Модуль формирования и распределения синхроимпульса ускорителя с оптической развязкой для установок регистрации нейтронов Препринт ИЯИ РАН 1433/2017, 2017 г.
- 2 В. Н. Марин, С. И. Поташев Модуль программируемых временных ворот для регистрации нейтронов в заданном интервале энергий Препринт ИЯИ РАН 1434/2017, 2017 г.

Патенты

- 1 Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Латышева Л.Н., Мордовской М.В., Пономарёв В.Н., Солодухов Г.В., Соболевский Н.М. «Фотонейтронный источник». Патент РФ на изобретение № 2 634 330, G21G 4/02, 01.02.2017.

Заявки на гранты

- 1 ПРИБОРОСТРОЕНИЕ 2018 «Создание опытного образца источника нейтронов с формированием спектра в широкой области от тепловых до МэВ-ных энергий)» Конобеевский Е.С. (рук.).

Доклады на конференциях

- 1 Недорезов В.Г., Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Бурмистров Ю.М., Пономарев В.Н., Поташев С.И., Солодухов Г.В., Туринге А.А. Разработка метода квазимонохроматизации тормозного спектра для измерения сечений фотоядерных реакций вблизи порога International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 88.
- 2 Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Недорезов В.Г., Пономарев В.Н., Поташев С.И., Солодухов Г.В. Измерение энергетического распределения пучка электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН International Conference “NUCLEUS 2017” (67th

- Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 77.
- 3 Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Недорезов В.Г., Пономарев В.Н., Поташев С.И., Солодухов Г.В. Методика оперативной перестройки энергии пучка электронов ускорителя при исследованиях на нейтронном источнике ИН-ЛУЭ ИЯИ РАН International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 76.
 - 4 Поташев С.И., Зуев С.В., Мешков И.В., Бурмистров Ю.М., Конобеевский Е.С., Караевский С.Х. Анализ данных, измеренных с помощью детектора нейтронов на основе бора-10 и счетчика с гелием-3 на фотонейтронном источнике нейтронов ИЯИ РАН International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 127.
 - 5 Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Караевский С.Х. Точность определения координат методом деления заряда в позиционно-чувствительном детекторе тепловых нейтронов на основе бора-10 International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 91.
 - 6 Мешков И.В., Кузнецов С.П., Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Караевский С.Х., Зуев С.В., Солодухов Г.В. Исследование зависимости выхода нейтронов на вольфрамовой мишени от энергии электронов ускорителя ЛУЭ-8 с помощью детекторов на основе гелия-3 и бора-10 International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 116.
 - 7 V.Nedorezov, E.Konobeevski, S.Zuyev, G.Solodukhov, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Turinge Study of photonuclear reactions using a quasi-monoenergetic photon beam of LUE-8-5 accelerator International session-conference "Physics of fundamental interactions“ dedicated to 50th anniversary of Baksan Neutrino Observatory Nalchik, Kabardino-Balkaria June 6–8, 2017.

- 8 С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, Е. С. Конобеевский, И. В. Мешков, С. В. Зуев, В. Н. Марин Исследование характеристик позиционно - чувствительного детектора нейтронов с активным слоем ^{10}B . V Конференция по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРомец 2017". 20-22 сентября 2017 г. Гатчина, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
- 9 S.Potashhev, Yu.Burmistrov, A. Drachev, S.Karaevsky, A.Kasparov, E.Konobeevski, I.Meshkov, S.Zuyev, A.Afonin, V.Marin A possibility of neutron registration in broad energy range using hybrid solid state gas detector based on ^{10}B layer. The 3rd international conference on particle physics and astrophysics. ICPPA – 2017, October 2 – 5, 2017, Moscow, MEPHI.

11. ПУБЛИКАЦИИ ПО ЗАДАЧЕ: «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ С ЯДРАМИ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ КОЛЛЕКТИВНЫХ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ»

Статьи, принятые в печать:

- 1 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 (направлено в печать).

Патенты

- 1 Мордовской М.В., Осипчук И.И., Суркова И.В. «Программа расчета сечений рассеяния нейтронов на ядрах в модели жесткого ротатора (ROTAZ)». Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017661014 (02.10.2017).

Доклады на конференциях

- 1 Мордовской М.В., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Мицук В.В., Суркова И.В., Скоркин В.М. Возможности измерения нейтронных сечений с использованием фотонейтронного источника линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 International Conference “NUCLEUS 2017” (67th Meeting on Nuclear Spectroscopy and Atomic Nucleus Structure), September 12-15, Almaty. 2017. Book of Abstracts, p. 120.
- 2 С.В. Зуев, Е.С. Конобеевский, В.В. Мицук, М.В. Мордовской Моделирование квазимоноэнергетического спектра нейтронов, получаемых на фотонейтронном источнике линейного ускорителя электронов 60-я Всероссийская

научная конференция МФТИ 20–26 ноября 2017 года, Школа-семинар «Фундаментальные взаимодействия и космология», МФТИ (ГУ), Моск. обл., г. Долгопрудный.

- 3 Skorkin V. Neutron monitor the environment near the proton accelerator using a scintillation detectors ZnS(Ag)/LiF and SiPM sensors Стенд. докл. на 25-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-25). Dubna, Russia, May 22-26, 2017. <http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-25/program.html>.
- 4 Skorkin V. Radiation research of a photoneutron reaction to deuterium in the treatment of medical accelerator SL75 Стенд. докл. на 25-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-25). Dubna, Russia, May 22-26, 2017.
- 5 Vladimir Skorkin Neutron monitoring the polygon of IRC “Pamir-Chakaltaya” for radiation safety control Доклад на Межд. сессии-конф. Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». 6 - 8 июня 2017 г. Нальчик, КБР. <http://icssnp.inr.ac.ru/ru/program>.