

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

УДК 539.1, 539.12, 621.384.6, 61

Рег. № АААА-А16-116022510108-7

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

Л.В. Кравчук

«31» января 2020 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АААА-А16-116022510108-7

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

(промежуточный за 2019 год)

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

И.И. Ткачев

«31» января 2020 г.

Москва 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Зав. отделом, академик РАН,
д.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

И.И. Ткачев
(введение, заключение)

Исполнители:
В. н.с., д.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

Э.Я. Парьев
(раздел 16)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

Е.С. Конобеевский
(раздел 10, 11, 12, 13)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

В.Г. Недорезов
(раздел 7, 8, 9)

И.о. Зав. лаб., к.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

Т.Л. Каравичева
(раздел 1)

В. н.с., к.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

Ф.Ф. Губер
(раздел 2, 3, 4, 6)

В. н.с., д.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

Р. М. Джилкибаев
(раздел 14)

К.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

А. П. Ивашкин
(раздел 5)

К.ф.-м.н.



31.01.2020

подпись, дата

Е. С. Голубева
(раздел 15)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 199 с., 127 рис., 5 табл.

Ключевые слова: Кварк-глюонная материя, большой адронный коллайдер (БАК), ЦЕРН, столкновения ядер сверхвысоких энергий, супердетектор АЛИСА, детекторы T0, ФИТ, триггерная система, ультрапериферические столкновения, ФЭУ, черенковский счётчик, временное разрешение, электроника, формирователь, усилитель, линия задержки, амплитудное разрешение, множественность заряженных частиц, плоскость реакции, светимость, фоновые события, электромагнитные взаимодействия ядер, нуклон, фотон, мезон, NN- и PP-взаимодействие, влияние 3N-сил, длина рассеяния, виртуальное состояние, спектрометрия нуклонов, легкие гало ядра, кластерная структура, неупругое рассеяние, развал возбужденного состояния, нейтронные сечения, нейтронные детекторы, быстрые и медленные нейтроны обобщенная оптическая модель со связью каналов, магические числа, нейтронно-активационный анализ гамма-спектрометр, низкофоновая камера, фотонейтронный источник нейтронов, активационно-измерительный комплекс, атмосферные аэрозоли и осадки, фотоядерные реакции, мюон, редкие распады мюона, нарушение лептонных чисел.

Отчёт содержит основные результаты фундаментальных и прикладных работ, выполненных согласно государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2019 год.

Работы проводились в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

1. Задача «Исследование ядро-ядерных взаимодействий на установке АЛИСЕ на встречных пучках ускорителя LHC CERN»

Объектом исследования являются взаимодействия протонов при энергии в системе центра масс $\sqrt{s}=7$ ТэВ, взаимодействия $^{208}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}$ при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ ТэВ, характеристики детектора ФИТ-T0 во время его работы в Run 4 с учетом добавления в состав ALICE калориметра FoCal, МКП-ФЭУ различных производителей, подсистема ФИТ, электромагнитная диссоциация (ЭМД) ядер ^{208}Pb и других ядер на LHC и на проектируемом коллайдере FCC-hh, эффективность регистрации с помощью передних детекторов установки АЛИСА нуклонов, вылетающих в результате ЭМД ядер ^{208}Pb на LHC.

Цель работы – анализ физических данных по протон-протонным столкновениям при энергии в системе центра масс $\sqrt{s}=7$ ТэВ, измерение распределений Σ^0 и анти- Σ^0 по поперечному импульсу, соотношения между выходами Σ^0 и анти- Σ^0 гиперонов и Λ

гиперона, анализ физических данных по столкновениям $^{208}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}$ при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ ТэВ, обеспечение стабильного разрешения времени взаимодействия на уровне 20 пс с помощью данных детектора T0, анализ данных по выходам Σ^0 и Λ гиперонов в реальных и моделированных столкновениях ядер свинца, контроль реконструкции реальных и смоделированных данных, определение полных сечений по Ван дер Меер сканам, Монте-Карло моделирование процессов эмиссии нейтронов и протонов от ЭМД ядер ^{208}Pb и транспорт нуклонов в установке АЛИСА с помощью ALIROOT для вычисления поправки на эффективность регистрации нуклонов с помощью Zero Degree Calorimeters (ZDC).

Были изучены характеристики детектора ФИТ-T0 во время его работы в Run 4 с учетом добавления в состав ALICE калориметра FoCal и изменения по этой причине положения ФИТ-T0 относительно его положения в Run 3. Проведено исследование характеристик МКП-ФЭУ различных производителей с ALD-покрытием и без него.

В рамках работы измерены с помощью ZDC сечения вылета определенного количества нейтронов и протонов в результате ЭМД ядер ^{208}Pb , обработаны данные специальных сеансов по изучению электромагнитной диссоциации ядер ^{208}Pb при $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ ТэВ, проведенных на установке АЛИСЕ в конце 2018 года в дополнение к данным при той же энергии, но полученным в 2015 году в обычных сеансах.

Были проведены вычисления соотношений между вероятностями адронных и электромагнитных взаимодействий различных ядер на LHC и проектируемом коллайдере FCC-hh, выбраны оптимальные массы сталкивающихся ядер.

Сотрудники ИЯИ РАН приняли участие в рабочих совещаниях АЛИСА (АЛИСА weeks, АЛИСА PP meetings, АЛИСА Off-line meetings, АЛИСА Physics weeks, FIT meetings, FIT design review meetings, UPC meetings, UD meetings), совещаниях Physics Beyond Colliders.

2. Задача «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте NA61 на ускорителе SPS в ЦЕРН»

В 2018 г. программным комитетом ЦЕРН была одобрена новая физическая программа эксперимента NA61/SHINE после 2021 г, которая включает в себя исследование образования D-мезонов в столкновениях ядер свинца при энергии 150 ГэВ. Исследование выходов этих частиц, которые образуются на начальном этапе столкновениях ядер свинца, является хорошим инструментом для исследования свойств новой формы сильно взаимодействующей ядерной материи, образующейся в этих столкновениях. Новая физическая программа включает также продолжение экспериментов по измерению выходов заряженных адронов в адрон-ядерных реакциях

для нейтринной физики и выходов фрагментов в ядерных реакциях для физики космических лучей.

Для выполнения этой программы на установке NA61/SHINE в ЦЕРН в 2019 г. начата модернизация практически всех детекторных систем этой установки, которая необходима для проведения экспериментов после 2021 г. при увеличении более чем в 10 раз интенсивности пучка ионов свинца и скорости срабатывания триггера.

Группа ИЯИ РАН отвечает в коллаборации за модернизацию переднего адронного калориметра PSD. В 2019 г. выполнены следующие работы по модернизации переднего адронного калориметра установки NA61/SHINE:

- Завершена разработка проекта модернизации переднего адронного калориметра PSD.
- Выполнены работы по полному демонтажу существующего калориметра и сборке двух новых калориметров – основного калориметра MPSD с пучковым отверстием в центре и небольшого переднего калориметра FPSD без пучкового отверстия.
- Проведены работы по замене всех фотодетекторов на новые MPPC производства Hamamatsu.
- Проведена модернизация аналоговой электроники, установка и тестирование новой считывающей DRS4 электроники калориметра FPSD.

В 2019 г. по данному проекту опубликовано 7 статей в реферируемых журналах, представлены 4 доклада на международных конференциях.

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

Знаменательным событием для коллаборации ХАДЕС в 2019 г. стала публикация в журнале Nature Physics статьи «Probing dense baryon-rich matter with virtual photons» (см. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0583-8>), соавторами которой является и группа ученых из Института ядерных исследований РАН. В этой статье обсуждаются результаты эксперимента на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи, которая образуется в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс на нуклон-нуклонную пару 2.4 ГэВ. Методом дилептонной спектроскопии измерено спектральное распределение электрон-позитронных пар, которое почти экспоненциально падает в зависимости от реконструированной массы в области до 1 ГэВ. Впервые показано, что источником наблюдаемого избыточного электромагнитного излучения в области масс электрон-позитронных пар 0.2 – 0.6 ГэВ в центральных столкновениях ядер золота при данной энергии является локально термализованная плотная ядерная материя. Измеренная

температура составляет 72 МэВ, что более чем в 100 миллионов раз превышает температуру на поверхности Солнца. Барионная плотность этой ядерной материи, согласно предсказаниям различных транспортных моделей примерно в 3 раза превышает плотность обычных ядер. Наблюдаемое усиление электромагнитного излучения в этой области масс электрон-позитронных пар подтверждает предположение о сильном уширении ρ – мезона в горячей и плотной ядерной среде, которое может быть связано с частичным восстановлением нарушенной киральной симметрии.

В статье отмечается, что свойства горячей и плотной ядерной материи, которая образуется в процессе столкновения ядер при достаточно низких энергиях (порядка нескольких ГэВ) близки к свойствам материи, образующейся при слиянии двух нейтронных звезд, а также к свойствам внутренних областей отдельных нейтронных звезд, которые рассчитываются в различных астрофизических моделях. Таким образом, сделан интересный и важный вывод о том, что свойства материи нейтронных звезд могут изучаться на Земле в ядро-ядерных экспериментах при достаточно умеренных энергиях столкновений.

В настоящее время большой интерес вызывают исследования свойств плотной барионной ядерной материи при энергиях налетающих ядер в несколько ГэВ. Достаточно сказать, что помимо экспериментов на установке ХАДЕС, такие эксперименты ведутся на действующих установках BM@N в ОИЯИ, NA61 в ЦЕРН, STAR в Брукхэйвенской лаборатории в США. В рамках Мегапроектов ФАИР (Дармштадт, Германия) и НИКА (Дубна, Россия) сооружаются новые экспериментальные установки CBM и MPD, соответственно на ФАИР и на коллайдере НИКА, в сооружение которых принимают участие ученые ИЯИ РАН.

ХАДЕС является также единственным большим экспериментом в ГСИ, который проводит физические эксперименты на модернизированном ускорителе SIS18 в рамках объявленной программы ФАИР-фаза-0.

В 2019 г. состоялся физический сеанс эксперимента Ag+Ag на ускорителе SIS18 при энергиях налетающих ядер серебра 1.58 и 1.23 АГэВ, на который было выделено значительное пучковое время (88 смен). Программным комитетом ГСИ выделено также 87 смен для проведения измерений на пучке пионов в 2020 г. Однако, по ряду технических причин этот эксперимент, скорее всего, состоится не ранее 2021 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.

В 2019 г. группой ИЯИ РАН были выполнены работы по подготовке ряда детекторных систем установки в ходе подготовки к физическому сеансу на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи в реакции $\text{Ag}+\text{Ag}$ на ускорителе SIS18 при энергиях налетающих ядер серебра 1.58 и 1.23 АГэВ, который состоялся весной 2019 г. В частности:

- выполнена работа по подготовке переднего годоскопа на установке ХАДЕС к физическому сеансу на пучке ионов серебра, проведена проверка работоспособности всех 288 сцинтилляционных детекторов этого годоскопа, проведена замена неработающих ФЭУ и выполнена калибровка детекторов годоскопа на космических мюонах и на пучке ионов серебра во время сеанса;
- разработан, изготовлен новый пучковый годоскоп. Он впервые был использован во время физического сеанса на пучке ионов серебра;
- обеспечивалось дежурство в сменах во время физического сеанса, экспертный контроль работы переднего годоскопа, пучкового годоскопа и электромагнитного калориметра, выполнена калибровка переднего годоскопа на пучке ионов серебра, выполнялся он-лайн мониторинг и анализ полученных данных.
- продолжена работа по созданию и запуску новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978-канального электромагнитного калориметра ECAL. К началу сеанса 2019 г. были полностью собраны четыре сектора ECAL с 163 модулями в каждом секторе и проведено их тестирование на космическом излучении. ECAL впервые был использован в физическом сеансе 2019 г. К концу 2019 г. был собран, протестирован и установлен на ХАДЕС пятый сектор калориметра. Электромагнитный калориметр позволит существенно расширить возможности ХАДЕС и провести измерения выходов π^0 и η -мезонов, а также улучшить идентификацию электронов и позитронов при импульсах больше 400 МэВ/с как в эксперименте ХАДЕС на ускорителе SIS18, так и на будущем ускорителе SIS100 (FAIR).

В 2019 г. коллаборацией ХАДЕС в соавторстве с группой ИЯИ РАН опубликовано 11 статей по данной теме в рецензируемых журналах и представлены 3 доклада на международных конференциях.

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

ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации CBM за разработку, изготовление и подготовку переднего адронного калориметра (PSD - Projectile Spectator Detector). Этот калориметр предназначен для определения таких глобальных

характеристик как центральность и угол плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях с кинетическими энергиями пучка в диапазоне 3.3 - 12 ГэВ/нуклон в экспериментах на установке CBM на сильноточном ускорителе SIS100 комплекса ФАИР. Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Baryonic Matter) на ускорительном комплексе ФАИР направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи в сверхплотном состоянии, которая образуется в ядро-ядерных столкновениях при энергиях ядер до 12 АГэВ.

В 2019г. получены следующие основные результаты:

- Выполнены работы по механической интеграции модуля калориметра mPSD в установку mCBM. Один модуль калориметра доставлен из ИЯИ в GSI вместе с соответствующей его подставкой и установлен на установке mCBM.
- Проведены работы по интеграции электроники ADC64@PANDA в систему сбора и передачи данных mCBM для считывания сигналов с модуля переднего адронного калориметра mPSD. Разработано новое программное обеспечение для этой электроники и для электроники передачи данных, позволяющее считывать и передавать данные с mPSD по заданному протоколу в общую систему сбора данных mCBM. Так же было разработано программное обеспечения для мониторинга и распаковки переданных данных. Эти выполненные работы позволяют синхронно с другими детекторными системами этой установки считывать и передавать данные с mPSD в предстоящих сеансах 2020г. на установке mCBM.
- В 2019 году в GSI на установке mCBM были проведены первые успешные тесты платы ADC64@PANDA для сбора сигналов с модуля калориметра на пучке на пучках ионов серебра.

Полученные результаты докладывались сотрудниками группы ИЯИ РАН в 2019 г. на 7 международных конференциях: VCI2019 - The 15th Vienna Conference on Instrumentation, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019), FAIRness 2019, FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, NICA days 2019, 21th iWORiD - The International Workshop on Radiation Imaging Detectors; CHEF2019 - Calorimetry for the High Energy Frontier 2019.

Результаты работ докладывались на совещаниях коллаборации CBM и mCBM в GSI (9 докладов) и опубликованы в 2019 г. в 6 статьях в реферируемых журналах.

5. Задача «Эксперимент MPD/NICA»

Физическая программа мегапроекта НИКА (Дубна, Россия) направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи с большой плотностью, в частности фазовой диаграммы ядерной материи и возможных фазовых переходов. С этой целью создается комплекс сверхпроводящих ускорительных колец, на котором будут производиться столкновения тяжелых ионов при энергиях $\sqrt{s} = 4 - 11$ ГэВ на нуклон-нуклонную пару. Такие столкновения будут изучаться с помощью Многоцелевого Детектора MPD (Multi Purpose Detector) — установки, разработанной специально для поиска возможных фазовых переходов, смешанной фазы и критической точки ядерной материи. На ускорительном комплексе NICA планируется изучать сильно взаимодействующую ядерную КХД материю при умеренных температурах и максимальной барионной плотности — в промежуточной области фазовой диаграммы. Одним из важнейших детекторов установки MPD является передний адронный калориметр FHCaI, предназначенный для измерения геометрии и начальных условий в событиях столкновений тяжелых ионов, а именно, центральности и ориентации плоскости реакции.

ИЯИ РАН отвечает за создание переднего адронного калориметра FHCaI в сотрудничестве с Лабораторией физики высоких энергий, ЛФВЭ ОИЯИ. В 2019 г. ИЯИ РАН продолжал работу по созданию переднего адронного калориметра и подготовке к будущим экспериментам на установке MPD.

В 2019 году получены следующие результаты:

1. Полностью изготовлены все 90 индивидуальных модулей адронного калориметра.
2. Проведено тестирование всех продольных секций модулей с помощью космических лучей. Измерены абсолютные световыходы продольных секций модулей калориметра.

Выполнялись следующие работы:

1. Разрабатывались алгоритмы измерения геометрии ядро-ядерных столкновений с помощью переднего адронного калориметра.
2. Разрабатывалась методика интеграции переднего адронного калориметра в полную экспериментальную установку MPD.

В 2019 г. полученные результаты опубликованы в четырех статьях в реферируемых журналах. Было представлено шесть докладов на международных конференциях. Результаты работ были многократно представлены сотрудниками ИЯИ РАН в докладах на рабочих совещаниях коллаборации MPD/NICA.

6. Задача «Эксперимент BM@N»

В ИЯИ РАН разрабатываются и изготавливаются два ключевых детектора для измерения геометрии ядро-ядерных столкновений: передний адронный калориметр и передний годоскоп, которые предназначены для регистрации невзаимодействующих фрагментов налетающих ядер, называемых спектаторами.

В 2019 г. в ИЯИ РАН изготовлены все необходимые модули адронного калориметра, разработана и изготовлена аналоговая электроника для калориметра. Силами ИЯИ РАН в экспериментальной зоне BM@N собран передний адронный калориметр. Установлена аналоговая и считывающая цифровая электроника. Детектор готов к тестированию и энергетической калибровке на космических лучах.

Параллельно разрабатывается передний кварцевый годоскоп, предназначенный для регистрации тяжелых фрагментов налетающих ядер вблизи оси пучка. Изготовлен и протестирован на пучке электронов прототип годоскопа.

В 2019 г. опубликовано четыре статьи в реферируемых журналах. Результаты работ по тематике BM@N были доложены на семи международных конференциях.

7. Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий ядер и нуклонов в широкой области энергий на ускорителях электронов»

Объектом исследования являются барионная спектроскопия и структура нуклонов, в том числе спиновая структура.

Цель работы — проведение экспериментов по фоторождению мезонов на пучке поляризованных монохроматических (меченых) гамма-квантов с использованием поляризованных и неполяризованных мишеней и детектора продуктов реакции с 4π геометрией.

Выполнены измерения сечений фоторождения нейтральных каонов и π^0 -мезонов на нейтроне, получены новые данные о динамике реакций и структуре нуклонных резонансов в области энергий до 1 ГэВ.

Проведены методические работы по подготовке эксперимента по фоторождению странных мезонов.

8. Задача «Изучение механизмов фотоядерных реакций в области энергий вблизи порога»

Объектом исследования являются механизмы возбуждения ядер реальными и виртуальными фотонами в области пикма резонанса, образование запаздывающих нейтронов от фотоделения ядер актинидов вблизи порогов фотонейтронных реакций.

Цель работы — проведение экспериментов на линейном ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН.

На линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН проведена модернизация и достигнуто уникальное для ускорителей данного класса энергетическое разрешение (лучше 1%) в широком диапазоне энергий. С помощью метода наведенной активности получены новые экспериментальные данные о возбуждении спиновых изомеров ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In реальными и виртуальными фотонами вблизи порога (в области пигми резонанса). Измерения проведены с использованием низкофоновой камеры с германиевым детектором высокого разрешения. Впервые установлено, что в отличие от теоретических предсказаний отношение сечений возбуждения ядер реальными и виртуальными фотонами резко падает при низких энергиях, что указывает на изменение мультипольности фотопоглощения в области пигми резонанса. Впервые получены экспериментальные данные по образованию короткоживущих ядер (с периодом полураспада $\sim(1-2)$ мс) – предшественников испусканию запаздывающих нейтронов – при фотоделении ядер ^{238}U при максимальной энергии тормозных фотонов ~ 10 МэВ. При этом наряду с измерениями скоростей счета проведены также измерения спектров образующихся запаздывающих нейтронов. В рамках полумикроскопической модели выполнен цикл теоретических исследований по описанию изоскалярных мультипольных резонансов в ядре ^{208}Pb .

9. Задача «Исследование фотоядерных реакций на фемтосекундных лазерах»

Объектом исследования являются фотоядерные реакции, а также методы их исследования с использованием сверхмощных фемтосекундных лазерных систем.

Цель работы — создание лазерно-плазменного ускорителя электронов, разработка методов измерения параметров электронного пучка, в том числе с использованием фотоядерных реакций, измерение сечений фоторасщепления ядер вблизи порога, изучение коэффициента конверсии при рождении электрон - позитронных пар.

Разработана и собрана экспериментальная установка, позволяющая проводить эксперименты по взаимодействию фемтосекундного излучения релятивистской интенсивности с заранее приготовленной плазмой. Получена генерация коллимированного (в пределах 0.05 рад) пучка электронов с экспоненциальным спектром с наклоном 2 МэВ. Достигнута максимальная энергия электронов около 10 МэВ при заряде пучка в десятки пКл при мощности лазера 5×10^{18} Вт/см². Собраны и отлажены приборы для измерения параметров ускоренных электронов, включая магнитный спектрометр и цилиндр Фарадея. Разработана методика оценки заряда электронного пучка по выходу нейтронов в фотоядерной реакции $\text{Be}(\gamma, n)$, которая свободна от генерируемых плазмой наводок и нечувствительна к низкоэнергетичным электронам. Проведено моделирование эксперимента по генерации позитронов при энергии электронов до

10 МэВ по программе GEANT4 и получены предварительные данные по коэффициенту конверсии ($\sim 10^{-5}$). Выполнен анализ литературных данных по коэффициентам конверсии в широком диапазоне энергий электронов (от 10 до 1000 МэВ).

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

Цель работы – экспериментальное исследование нуклон-нуклонного и трехнуклонного взаимодействия и эффектов нарушения зарядовой симметрии. Для проверки предлагаемой гипотезы о зависимости извлекаемых параметров NN -взаимодействия от относительной скорости разлета NN -пары (синглета) и третьей частицы (влияние $3N$ -сил) запланированы исследования реакций nd - и dp -развала для различных энергий.

В апреле 2019 г. на канале РАДЭКС линейного ускорителя ИЯИ РАН исследована реакция $n + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p$ при энергии нейтронов 60 МэВ. Был проведен кинематически полный эксперимент, в котором регистрировались в совпадении два нейтрона, вылетающие в узком конусе углов относительно направления движения их центра масс, измерены энергии каждого нейтрона и угол между ними. Для определения энергии виртуального nn -уровня E_{nn} (длины рассеяния a_{nn}) экспериментальная зависимость выхода реакции nd -развала сравнивается с результатами моделирования, зависящими от E_{nn} . При этом моделирование проводилось в широкой области значений E_{nn} от 0.07 МэВ до 0.24 МэВ. Далее минимизировалось значение χ^2 для экспериментальных и теоретических (моделированных) точек. При этом минимальное значение χ^2_{min} определяет величину E_{nn} и соответственно a_{nn} . Полученное значение $a_{nn} = -16.3 \pm 0.5$ Фм, так же, как и экспериментальные значения длины рассеяния из других работ, хорошо аппроксимируются функцией $a_{nn} = b \cdot \exp(-V/c) + a$, при этом первый член отвечает за вклад $3N$ -сил, зависящий от скорости разлета nn -пары и третьей частицы (V) в разных экспериментах, а постоянный член определяет асимптотическое значение a_{nn} и должен быть свободным от вклада $3N$ -сил. В результате χ^2 -анализа экспериментальных данных определено значение параметра $a \equiv a_{nn}(V/c \rightarrow 1) = -15.9 \pm 0.15$ Фм. Таким образом, установлено, что влияние $3N$ -сил в реакциях с тремя нуклонами в конечном состоянии (nnp) приводит к изменению величин параметров nn -взаимодействия, извлекаемых в этих реакциях. Можно предположить, что и значения протон-протонной длины рассеяния a_{pp} и энергии виртуального 1S_0 уровня E_{pp} , извлеченные из экспериментов с тремя или четырьмя частицами в конечном состоянии, будут отличаться от значений, полученных в свободном pp -рассеянии. Для проверки этого предположения в ИЯИ РАН проводится исследование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$. В этой реакции в промежуточном состоянии

возможно взаимодействие pp -пары с нейтроном, что может отразиться на величинах извлекаемых низкоэнергетических параметров (a_{pp} и E_{pp}). В 2019 г. проведено кинематическое моделирование реакции $d + {}^1\text{H} \rightarrow p + p + n$, создана экспериментальная установка и система сбора информации. В ноябре 2019 г. получены предварительные экспериментальные данные для реакции $dp \rightarrow ppn$ при энергии первичных дейтронов 15 МэВ на циклотроне У-120 НИИЯФ МГУ.

11. 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. 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 ${}^5\text{He}$. Для определения кластерной структуры возбужденных состояний ядра ${}^9\text{Be}$ предложен эксперимент с регистрацией неупругорассеянных частиц (α или d) в совпадении с частицей, испускаемой при распаде этих состояний.

Проведено кинематическое моделирование реакции неупругого рассеяния дейтронов и альфа-частиц на ядрах ${}^9\text{Be}$. Результаты моделирования показывают, что регистрация рассеянной частицы (дейтрона или альфа-частицы) в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния ${}^9\text{Be}$ с определением энергетического спектра «развальной» частицы позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний. Создана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать рассеянные заряженные частицы в совпадении с нейтронами или гамма-квантами от распада возбужденных состояний легких ядер. Для разделения нейтронных и гамма-сигналов используется метод n - γ разделения по форме импульса.

Экспериментальное исследование проводится при энергии налетающих дейтронов 15 МэВ в НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцина. Создан и опробован вариант экспериментальной установки, позволяющий детектировать рассеянные альфа-частицы в совпадении с распадной частицей. Экспериментальные спектры были получены в двух режимах – инклюзивном с регистрацией рассеянных альфа-частиц и в эксклюзивном с регистрацией в совпадении альфа-частиц и частиц во втором плече (гамма-квантов или/и нейтронов). Показано, что во втором случае нерезонансный фон значительно подавлен, и можно выделять события, соответствующие определенным возбужденным состояниям ядра ${}^9\text{Be}$, и при достаточной статистике получать энергетические спектры нейтронов от

развала различных возбужденных состояний. Как показали результаты моделирования, в этом случае возможно определение кластерной структуры этих состояний.

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

Цель работы – исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Продолжены работы по анализу имеющихся экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию для изотопов в широкой области массовых чисел в рамках оптической модели со связью каналов. В рамках модели исследовались промежуточные структуры в рассеянии быстрых нейтронов на изотопах Se. В двухфоновном варианте модели исследовалась спиновая зависимость p -волнового рассеяния нейтронов на сферических ядрах. Проведены исследования возможности вывода нейтронов из фотонейтронного источника, формирования пучка соответствующих нейтронов, разработаны методики и созданы установки для нейтронных измерений. Проведены измерения спектров нейтронов, производимых в Be мишени фотонейтронного источника ускорителя ЛУЭ-8. Проведены измерения геометрии пучка медленных и тепловых нейтронов с использованием различных детекторов.

13. 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 (НАА) с улучшенными метрологическими характеристиками с использованием новых ядерно-физических установок. В результате исследований впервые создана новая ядерно-физическая установка – активационно-измерительный комплекс на базе W-Be фотонейтронного источника ИЯИ РАН на серийном промышленном электронном ускорителе ЛУЭ-8-5 и низкофоновом гамма-спектрометре. С помощью комплекса проведены измерения и отработана методика изучения фотоядерных реакций по фотовозбуждению спиновых изомеров Pt, Lu, Ir, Hf и Ta фотонами в области пороговой энергии. Сравнивались активационные спектры, полученные при облучении образцов Pt, Lu, Ir, Hf и Ta тормозными фотонами и тепловыми нейтронами. Показано, что спектры Pt и Ta позволяют однозначно выделить состояния, образованные в (γ, γ') и (n, γ) реакциях, что делает эти ядра возможными кандидатами для изучения фотоядерных реакций с возбуждением изомерных состояний.

Также проводилась отработка методики измерения содержания рения в рудных породах. Существующие химические методики характеризуются неоднозначностью в определении содержания рения из-за конкурирующих с ним проявлений других элементов. Имеется необходимость в разработке независимых методов анализа ренийсодержащих пород. Пробы ренийсодержащих пород облучались нейтронами фотонейтронного источника. Измерения γ -активности образцов проводились с использованием низкофонового гамма-спектрометра. Анализ активационных гамма-спектров указывает на возможность однозначного определения рения на фоне сопутствующих элементов, что делает нейтронно-активационный анализ предпочтительным для определения содержания рения.

14. Задача «Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «Mu2e»»

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы сохранения лептонных квантовых чисел. Обнаружение связи между семействами лептонов будет свидетельством существования новых физических явлений вне рамок Стандартной модели.

Цель работы - поиск процесса конверсии мюона на ядре, идущего с нарушением закона сохранения лептонных чисел с уровнем чувствительности ($Br \approx 10^{-17}$) превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение, в международном эксперименте Mu2e проводимом в FNAL (Chicago) США. Основная идея эксперимента предложена (1989 г.) и разработана сотрудниками института ядерных исследований. Повышение уровня чувствительности в эксперименте Mu2e на пять порядков может привести к обнаружению новых взаимодействий, порождаемых новыми тяжелыми частицами с массами ≈ 1000 ТэВ, которые невозможно получить в ближайшем будущем на ускорителях.

Основная цель группы ИЯИ РАН заключается в разработке новой концепции эксперимента (3in1), позволяющей поиск трех редких распадов $\mu \rightarrow e$ конверсии, $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$ на одной установке. Разработка и изготовление электроники, предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех. В качестве детекторов рассматриваются: кристаллы LYSO, NaI, CsI, лавинные фотодиоды (APD), фото-электронные умножители (ФЭУ) и нейтронные газовые He3 счетчики.

15. Задача «Создание оптико-каскадной модели, описывающей поглощение ядром медленного антинейтрона, для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций»

В моделях Великого Объединения и некоторых расширениях Стандартной модели могут существовать процессы с изменением барионного числа на 2 единицы ($\Delta B = \pm 2$). Тогда становится возможным переход нейтрона в антинейтрон и обратно, т.е. нейтрон-антинейтронные осцилляции. Поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций является одним из важнейших направлений современной физики, ведущих к пониманию явлений, лежащих за рамками Стандартной модели.

16. Задача «Исследование подпорогового рождения легких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях. Осцилляции частиц в поглощающей среде»

В рамках подхода, использующего ядерную спектральную функцию, современные экспериментальные данные о сечениях соответствующих элементарных процессов, исследована в инклюзивных фотон- и эксклюзивных фотон- и протон-ядерных реакциях модификация свойств (например, масс или реальной части ядерного скалярного потенциала) η' -, J/ψ мезонов и Λ гиперонов в ядерной среде при обычной ядерной плотности. Получены предсказания для абсолютных (и относительных) сечений рождения этих частиц в данных реакциях в различных сценариях изменения их масс в ядерной материи, часть из которых сравнена с имеющимися экспериментальными данными. В частности, из этого сравнения извлечена величина реальной части η' -ядерного оптического потенциала (или сдвига массы η' - мезона) при импульсе η' мезона порядка 0.5 ГэВ/с. Сделаны важные выводы о возможности экспериментального наблюдения экзотических ядерных систем, состоящих из связанных η' – мезонов и обычных нуклонов, модификации свойств J/ψ – мезонов на ускорительных комплексах FAIR и CEBAF, а также о возможности получения надежной информации о импульсной зависимости Λ гиперон-ядерного потенциала из анализа новых данных по рождению $\Lambda K(+)$ пар в pA-реакциях при энергии 2.83 ГэВ. Подготовлен к публикации обширный обзор, показывающий современное состояние (главным образом экспериментальных) исследований в области мезон (K^+ , K^0 , K^- , η , η' , ω , ϕ , J/ψ , D) – ядерных взаимодействий при относительно малых энергиях.

В теории осцилляций частиц важнейшим разделом является эффект поглощения частиц.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	1
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	17
ВВЕДЕНИЕ	21
1. Исследование ядро-ядерных взаимодействий на установке АЛИСЕ на встречных пучках ускорителя LHC CERN.....	36
1.1. Работы по детекторным системам T0 и ФИТ	36
1.1.1. Определение момента столкновения пучков для время-пролетной системы с использованием детектора T0	36
1.2. Изучение характеристик детектора ФИТ-T0 для работы в будущем Run 4 на БАК	38
1.3. Исследование характеристик насыщения и восстановления МКП-ФЭУ с ALD-покрытием.....	41
1.3.1. О ресурсе работы МКП-ФЭУ в составе ФИТ.....	41
1.3.2. Тестирование МКП-ФЭУ с ALD-покрытием и без него.....	42
1.3.3. Выводы по результатам тестирования.....	45
1.4. Сборка детектирующей подсистемы ФИТ-T0-C.....	46
1.4.1. Компоненты ФИТ-T0-C, спроектированные в ИЯИ РАН, и оптимизация расположения МКП-ФЭУ.....	46
1.4.2. Очистка компонент и сборка ФИТ-T0C	48
1.5. Вычисление сечений электромагнитной диссоциации лёгких, средних и тяжёлых ядер на БАК и FCC-hh.....	55
1.5.1. Соотношения между вероятностями адронных и электромагнитных взаимодействий ядер на БАК и FCC-hh.....	55
1.5.2. Парциальные сечения ЭМД ядер ^{115}In и ^{208}Pb на FCC-hh	56
1.5.3. Влияние неопределённостей сечений фотоядерных реакций на ядре ^{129}Xe на точность вычислений сечений ЭМД.....	57
1.6. Образование Σ^0 и анти- Σ^0 в протон-протонных столкновениях при энергии в центре масс 7 ТэВ в эксперименте АЛИСА.....	59
1.7. Участие в обработке данных по Ван дер Меер сканам, проведённым в ноябре 2018 года на пучках свинца	60
2. Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте NA61 на ускорителе SPS в ЦЕРН	64
2.1. Передние адронные калориметры установки NA61/SHINE	64
2.1.1. Модернизация экспериментальной установки NA61/SHINE	64

2.1.2.	Обоснование модернизации существующего PSD.....	64
2.1.3.	Проект модернизации PSD для эксперимента NA61/SHINE	66
2.1.4.	Работы по модернизации PSD, выполненные в 2019 г.....	70
2.2.	Доклады на конференциях и школах	75
3.	Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия).....	77
3.1.	Экспериментальная установка ХАДЕС	77
3.2.	Подготовка и обеспечение работы переднего годоскопа FW в физическом сеансе 2019 г. на установке ХАДЕС	79
3.3.	Разработка и тестирование нового кварцевого пучкового годоскопа (QFH) на сеансе эксперимента ХАДЕС в марте 2019 года.....	81
3.4.	Подготовка электромагнитного калориметра ECAL к сеансу на установке ХАДЕС и экспертный контроль его работы во время физического сеанса 2019 г.....	84
3.5.	Анализ экспериментальных данных, полученных на установке ХАДЕС	87
3.5.1.	Изучение свойств ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях на малых межнуклонных расстояниях, соответствующих высокой барионной плотности	87
3.6.	Список выступлений на международных совещаниях и конференциях по тематике ХАДЕС	89
4.	Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI.....	90
4.1.	Адронный калориметр установки CBM.....	90
4.2.	Проведение работ по подготовке тестирования отклика модуля адронного калориметра в технических сеансах в 2019-2020 г. на пучке mCBM.....	92
4.3.	Считывающая электроника mPSD и её интеграция в систему сбора данных mCBM	94
4.4.	Список выступлений на международных совещаниях и конференциях по тематике CBM в 2019 г.	99
5.	Эксперимент MPD/NICA.....	102
5.1.	Передний адронный калориметр установки MPD/NICA	102
5.2.	Список выступлений на международных конференциях за 2019 г.	105
6.	Эксперимент BM@N	106
6.1.	Список выступлений на международных совещаниях и конференциях по тематике BM@N в 2019 г.....	117
7.	Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий ядер и нуклонов в широкой области энергий на ускорителях электронов	118
7.1.	Измерения сечений фоторождения нейтральных каонов и π^0 -мезонов на нейтроне	118
7.1.1.	Измерение сечений фоторождения нейтральных каонов на нейтроне.....	118
7.1.2.	Измерение сечений фоторождения π^0 -мезонов на нейтроне	118
8.	Изучение механизмов фотоядерных реакций в области энергий вблизи порога.....	120

8.1. Изучение механизмов возбуждения спиновых изомеров ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In реальными и виртуальными фотонами вблизи порога (в области пикма резонанса) методом наведенной активности	120
8.2. Изучение образования короткоживущих ядер – предшественников испусканию запаздывающих нейтронов с периодом полураспада $\sim(1-2)$ мс на ядре ^{238}U	121
8.3. Разработка нового фотоядерного метода идентификации радиоактивных и вредных материалов в крупно тоннажных контейнерах	121
8.4. Теоретическое описание гигантских резонансов в ядрах в рамках полумикроскопической модели	121
9. Исследование фотоядерных реакций на фемтосекундных лазерах	122
9.1. Установка для проведения экспериментов по ускорению электронов в лазерной плазме	122
9.2. Измерение заряда электронного пучка с использованием реакции фоторасщепления	124
9.3. Результаты эксперимента по генерации электронного пучка.....	125
9.4. Моделирование эксперимента по генерации позитронов на фемтосекундной лазерной системе.....	126
10. Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики.....	129
10.1. Определение низкоэнергетических параметров pn -взаимодействия в реакции $nd \rightarrow pnn$	129
10.2. Определение энергии pp -синглетного виртуального уровня в реакции $d + ^1\text{H} \rightarrow p + p + n$	134
10.3. Доклады на конференциях.....	137
11. Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях.....	139
11.1. Моделирование реакции неупругого рассеяния дейтронов и альфа-частиц	139
11.2. Совпадательный эксперимент $^9\text{Be}(\alpha, an)X$ при энергии 30 МэВ.....	141
11.3. Доклады на конференциях.....	144
12. Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы.....	146
12.1. Изучение пространственного распределения нейтронов вблизи выхода нейтронного канала фотонейтронного источника	146
12.2. Доклады на конференциях.....	152
13. Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров.....	154
13.1. Фотовозбуждение спиновых изомеров Pt, Lu, Ir, Hf и Ta фотонами в области пороговой энергии.....	154
13.2. Измерение содержаний рения в рудных породах	157
13.3. Доклады на конференциях.....	162

14. Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «Mu2e»	163
14.1. Состояние эксперимента Mu2e в 2019 году	163
15. Создание оптико-каскадной модели, описывающей поглощение ядром медленного антинейтрона, для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций	166
16. Исследование подпорогового рождения легких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях. Осцилляции частиц в поглощающей среде ...	168
16.1. Модель подпорогового рождения частиц на ядрах и её результаты.....	168
16.1.1. Структура ядерной материи на малых расстояниях	168
16.1.2. Околопороговое рождение η' мезонов в $\pi^- A$ реакциях	168
16.1.3. Околопороговое рождение $\Lambda(1520)$ гиперонов в пион-ядерных реакциях	170
16.1.4. Изучение Λ гиперон-ядерного взаимодействия.....	171
16.2. Осцилляции частиц в поглощающей среде.....	172
ПУБЛИКАЦИИ.....	185

ВВЕДЕНИЕ

Проблема построения универсального уравнения состояния ядерной материи, которое бы описывало не только ядра в основном состоянии и ядра, обладающие небольшой энергией возбуждения, но и переход адронной материи в состояние деконфайнмента — горячую кварк-глюонную плазму, является одной из сложнейших проблем современной физики атомного ядра и релятивистской ядерной физики. С этой проблемой тесно связана проблема изучения свойств адронов в ядерной среде в зависимости от её температуры и плотности, исследование отличий этих свойств от характеристик адронов в вакууме. Обе эти проблемы требуют комплексного всестороннего подхода, состоящего в проведении экспериментов на разнообразных ускорительных установках, при низких и высоких энергиях взаимодействий протонов, адронов и фотонов с ядрами, ядер с ядрами, с помощью детекторов, основанных на различных физических принципах, взаимно дополняющих друг друга. Решение этих проблем невозможно также без разработки комплекса новых современных моделей, описывающих взаимодействия релятивистских ядер, частиц с ядрами при низких и высоких энергиях.

Сказанное выше объясняет включение в программу исследований ИЯИ РАН "Физика атомного ядра, релятивистская ядерная физика" (№ 0031-2019-0004) проведение целого ряда экспериментов и одновременно разработки нескольких теоретических моделей.

В 2019 году сотрудники ИЯИ РАН продуктивно работали в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК), (Задача №1), эксперименте NA61/SHINE (Задача №2), эксперименте HADES (Задача №3) проводя исследования протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействия, где были собраны и обработаны огромные массивы новых уникальных данных. В частности, получены данные о сечениях рождения и распределениях по поперечному импульсу, скорости и множественности адронов при энергиях столкновений ядер более 5 ТэВ на нуклон в зависимости от центральности столкновения. Получены разнообразные экспериментальные данные, которые могут быть связаны с образованием кварк-глюонной плазмы в ядро-ядерных взаимодействиях, включая множественности вторичных заряженных частиц, выходы нейтронов и протонов-спектаторов, изучены их зависимости от центральности столкновения, от энергии и масс сталкивающихся ядер. Подготовлены пакеты программ для анализа экспериментальных данных протон-протонных и ядро-ядерных взаимодействий для определения моментов столкновения пучков, плоскости реакции, центральности взаимодействий, множественности событий. Исследованы

триггерные возможности детекторного устройства ФИТ установки ALICE. Разработана программа для моделирования этого устройства как части системы ALICE. Выполнено моделирование электромагнитной диссоциации в столкновениях других ядер на LHC, помимо ядер свинца. Исследовано рождение дилептонов в адрон-ядерных реакциях на установке HADES, найдена связь сих выходов с образованием кварк-глюонной плазмы. Завершена модернизация калориметра, выполнена его интеграция в систему сбора информации NA61.

Все три эксперимента ALICE, NA61/SHINE и HADES представляют собой примеры успешно работающих больших международных коллабораций с определяющими вкладами российских ученых. Одновременно с этим велась подготовка новых экспериментов — CBM (Задача №4), MPD/ NICA (Задача №5) и его предшественника BM@N (Задача №6). Завершена сборка модулей переднего адронного калориметра для экспериментов MPD/NICA и BM@N.

Успешно выполнялись работы и на российских установках, целиком силами российских ученых с определяющим вкладом ИЯИ РАН. Выполнено прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер вблизи порога (Задача №7), в том числе с использованием фемтосекундного лазерно-плазменного источника МЛЦ МГУ (Задача №9). Для объяснения природы коллективных возбуждений ядер различной мультипольности исследованы свойства гигантских резонансов в ядрах, включая околопороговые «пигми» резонансы. Разработано теоретическое описание гигантских резонансов в ядрах в рамках полумикроскопической модели (Задача №8). Исследованы взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики, определены низкоэнергетические параметров np -взаимодействия в реакции нейтронов с дейтронами (Задача №10). Кластерная структура ядер ^8Be , ^9Be , ^{10}Be была исследована при облучении ^9Be дейтронами с энергией в десятки МэВ (Задача №11). В Задаче №12, которая тесным образом связана с Задачами №10 и №11, исследовались взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Это позволило изучить пространственное распределение нейтронов вблизи выхода нейтронного канала фотонейтронного источника. В Задаче №13 разработаны методы и аппаратура низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров. Сотрудниками ИЯИ РАН была разработана новая концепция эксперимента, позволяющего вести поиск трех редких распадов $\mu \rightarrow e$ конверсии, $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$ на одной установке (Задача №14). Для этого эксперимента проводилась разработка и изготовление электроники,

предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех.

Большое значение имели работы теоретиков по созданию оптико-каскадной модели, описывающей поглощение ядром медленного антинейтрона для экспериментов по поиску нейтрон- антинейтронных осцилляций (Задача №15) и по разработке новой модели для описания рождения на ядрах η , J/ψ , D-мезонов, а также Λ -гиперонов в фотон-, пион- и в протон-ядерных реакциях в околопороговой области энергий, учитывающей модификацию свойств этих частиц в ядерной среде (Задача №16). Разработанная модель была успешно применена для анализа результатов эксперимента NADES (Задача №3). Изучались осцилляции частиц в поглощающей среде.

1. Задача «Исследование ядро-ядерных взаимодействий на установке АЛИСЕ на встречных пучках ускорителя LHC CERN»

В настоящем отчёте представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ядро-ядерных столкновений на БАК, полученные в мегаэксперименте АЛИСА при непосредственном активном участии российских институтов. Также представлены выполненные российскими институтами в 2019 г. работы по детекторным системам T0, 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.

Результаты работы, выполненной в 2019 г., 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).

2. Задача «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте NA61 на ускорителе SPS в ЦЕРН»

Институт ядерных исследований участвует в международном эксперименте NA61/SHINE в ЦЕРНе, совместно с учёными из других 33 институтов из 14 стран мира. В

2018 году на установке NA61/SHINE, которая расположена на выведенном пучке протонов и ядер на супер протонном синхротроне SPS, завершена программа экспериментов по измерению выходов заряженных частиц в столкновениях легких и тяжелых ядер при энергиях налетающих частиц в диапазоне энергий от 13 до 150 АГэВ [1, 2]. Программа NA61/SHINE в течение 2011 - 2018 гг. была направлена, в основном, на исследование свойств плотной и горячей ядерной материи, поиск и исследование начала деконфайнмента, поиск критической точки фазового перехода из обычной ядерной материи в кварк-глюонную плазму. При таких энергиях в области столкновения двух ядер на очень короткое время образуется ядерная материя с температурой в десятки тысяч раз превышающую температуру Солнца и плотностью в несколько раз превышающую плотность обычной ядерной материи. Предполагается, что при таких условиях ядерная материя существует в форме кварк-глюонной плазмы и состоит из свободных кварков, а переносчиками взаимодействия между кварками являются глюоны. Предполагается, что такая форма ядерной материи существует внутри нейтронных звезд и единственной возможностью исследования свойств этой материи на Земле являются эксперименты по столкновению тяжёлых ядер. Следует отметить, что интерес к исследованиям свойств этой необычной формы ядерной материи со стороны мирового научного сообщества огромен. Параллельно с экспериментами NA61/SHINE ведутся эксперименты в этой же области энергий ядер в Брукхейвенской лаборатории в США на установке STAR на коллайдере RHIC, а при более высоких энергиях в ЦЕРНе – на установке АЛИСЕ на Большом Адронном Коллайдере (БАК). Для этой же цели сооружаются новые ускорительные комплексы NICA (ОИЯИ, Дубна) и FAIR (GSI, Darmstadt, Germany), что позволит расширить диапазон энергии сталкивающихся ядер.

Кроме того, программа экспериментов на NA61/SHINE включала измерения сечений выхода заряженных адронов в адрон-ядерных реакциях для нейтринной физики и для физики космических лучей.

В 2018г. программным комитетом ЦЕРН была одобрена новая физическая программа эксперимента NA61/SHINE после 2021 года, которая включает в себя исследование образования D-мезонов в столкновениях ядер свинца при энергии 150 АГэВ. Исследование выходов этих частиц, которые образуются на начальном этапе столкновениях ядер свинца, является хорошим инструментом для исследования свойств новой формы сильно взаимодействующей ядерной материи, образующейся в этих столкновениях. Новая физическая программа включает также продолжение экспериментов по измерению выходов заряженных адронов в адрон-ядерных реакциях

для нейтринной физики и выходов фрагментов в ядерных реакциях для физики космических лучей.

Для выполнения этой программы на установке NA61/SHINE в ЦЕРН в 2019г. начата модернизация практически всех детекторных систем этой установки, которая необходима для проведения экспериментов после 2021 г. при увеличении более чем в 10 раз интенсивности пучка ионов свинца и скорости срабатывания триггера.

Группа ИЯИ РАН отвечает в коллаборации за модернизацию переднего адронного калориметра PSD. В 2019 г. выполнены описываемые ниже работы по модернизации переднего адронного калориметра установки NA61/SHINE.

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

В 2019 г. коллаборация ХАДЕС, в которую входит и группа ученых из ИЯИ РАН, отметила 25-летие с момента своего образования. За эти годы на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС был выполнен целый ряд экспериментов по исследованию свойств ядерной материи при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе. Физическая программа этих экспериментов направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. При нулевой температуре и больших барионных плотностях ядерной материи 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.

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.

В 2019 г. состоялся физический сеанс эксперимента Ag+Ag на ускорителе SIS18 при энергиях налетающих ядер серебра 1.58 и 1.23 АГэВ, на который было выделено пучковое время (88 смен). Группа ИЯИ РАН участвовала в подготовке к этому физическому сеансу, в обработке и анализе экспериментальных данных.

Группа ИЯИ РАН выполнила работы по подготовке переднего годоскопа установки ХАДЕС к физическому сеансу, была проведена проверка работоспособности всех 288 сцинтилляционных детекторов этого годоскопа и выполнены работы по замене ряда неработающих ФЭУ. Проведена калибровка детекторов годоскопа на космических мюонах и на фрагментах ядер серебра в начале сеанса. Был также разработан и изготовлен прототип кварцевого пучкового годоскопа, который был установлен в пучковом отверстии сцинтилляционного годоскопа и использован при наборе физических данных.

Группа ИЯИ РАН, в сотрудничестве с чешской и немецкими группами, ведется работа по созданию и запуску новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978-канального электромагнитного калориметра (ECAL). К началу физического сеанса 2019 г. были полностью собраны 4 сектора ECAL со 163 модулями в каждом секторе и проведено их тестирование на космическом излучении. На созданном группой ИЯИ РАН испытательном стенде в ГСИ продолжались тестовые измерения и калибровка модулей для 5-го сектора ECAL, который был установлен на ХАДЕС в конце 2019 г. Измерения проводились как на космическом излучении, так и световых импульсах от LED-оптической системы. Впервые, частично собранный электромагнитный калориметр ECAL использовался в физическом эксперименте. Электромагнитный калориметр позволит существенно расширить экспериментальные возможности установки ХАДЕС и провести измерения выходов π^0 и η -мезонов, а также улучшить идентификацию электронов и позитронов при импульсах больше 400 МэВ/с как в эксперименте ХАДЕС на ускорителе SIS18, так и на будущем ускорителе SIS100 (FAIR).

В 2019 г. в журнале Nature Physics опубликована статья коллаборации ХАДЕС «Probing dense baryon-rich matter with virtual photons» (см. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0583-8>), соавторами которой является группа ученых из Института ядерных исследований РАН. В этой статье представлены результаты эксперимента на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи, которая образуется в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс сталкивающихся нуклонов 2.4 ГэВ. Впервые показано, что источником наблюдаемого избыточного электромагнитного излучения в области масс электрон-позитронных пар 0.2 – 0.6 ГэВ в центральных

столкновениях ядер золота при данной энергии является локально термализованная плотная ядерная материя. Наблюдаемое усиление электромагнитного излучения в этой области масс электрон-позитронных пар подтверждает предположение о сильном уширении ρ – мезона в горячей и плотной ядерной среде, которое может быть связано с частичным восстановлением нарушенной киральной симметрии.

Сотрудниками ИЯИ РАН и НИЦ КИ-ИТЭФ было в 2019 г. были сделаны предложения о возможном расширении исследований на ХАДЕСе, направленные на изучение в ядро-ядерных столкновениях свойств ядерной материи на малых (< 1 ферми) межнуклонных расстояниях, соответствующих высокой барионной плотности, т.е. большой величине барионного химического потенциала μ . Было также предложено изучить модификации ширины тяжелого гиперона $\Lambda(1520)$ в ядерной среде в реакциях взаимодействия π^- мезонов с импульсом 1.7 ГэВ/с с ядрами углерода и вольфрама. Для этого предложено использовать уже имеющуюся статистику $3 \cdot 10^8$ событий в выполненном ранее эксперименте на установке ХАДЕС по столкновениям пионов с ядрами углерода и вольфрама. В 2020 году планируется получить первых оценки ширины $\Lambda(1520)$ в ядерной среде.

Далее в данном разделе приведены основные результаты, полученные с участием группы ИЯИ РАН в 2019 г.

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

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Baryonic Matter) на ускорительном комплексе ФАИР направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи в сверхплотном состоянии, которая образуется в ядро-ядерных столкновениях при энергиях ядер до 12 АГэВ. В отличие от экспериментов на коллайдерах RHIC и LHC, где фазовая диаграмма КХД изучается при очень высоких температурах и очень низкой барионной плотности, программа экспериментов на установке CBM будет направлена на исследования экстремальных состояний ядерной материи и фазового перехода к кварк-глюонной плазме при высокой барионной плотности в ядро-ядерных столкновениях. Важнейшими направлениями будет поиск границы между фазами барионной и кварк-глюонной материей, поиск критической точки, поиск признаков начала восстановления киральной симметрии и многое другое.

Практически весь набор наблюдаемых величин, включая множественности заряженных частиц, распределения частиц по поперечным импульсам, пособытийные флуктуации и др., изучается в ядро-ядерных реакциях в зависимости от центральности

столкновений, которая характеризует плотность энергии, достигаемой в этих реакциях. Для определения коллективных потоков идентифицированных адронов, которые несут информацию о состоянии ядерной материи в процессе столкновения, необходимо также событийное определение плоскости реакции. Для определения центральности и угла плоскости реакции в эксперименте CBM будет использоваться передний адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectile Spectator Detector [3].

5. Задача «Эксперимент MPD/NICA»

Физическая программа мегапроекта НИКА (Дубна, Россия) направлена на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи с большой плотностью, в частности фазовой диаграммы ядерной материи и возможных фазовых переходов. С этой целью создается комплекс сверхпроводящих ускорительных колец, на котором будут производиться столкновения тяжелых ионов при энергиях $\sqrt{s} = 4 - 11$ ГэВ на нуклон-нуклонную пару. Для изучения ядро-ядерных столкновений на НИКА создается Многоцелевой Детектор MPD (Multi Purpose Detector), который нацелен на изучение свойств плотной и горячей ядерной материи, например, на исследование фазовых переходов, смешанной фазы, на получение уравнения состояния ядерной материи в её экстремальных состояниях. Эксперимент MPD обладает близким к 4π аксептансом. Детектор разработан для детектирования заряженных адронов, электронов, фотонов, получаемых при столкновениях тяжёлых ионов при высокой светимости коллайдера NICA.

Одним из важнейших детекторов установки MPD является передний адронный калориметр FHCaI, предназначенный для измерения геометрии событий столкновений тяжелых ионов: центральности и ориентации плоскости реакции.

ИЯИ РАН отвечает за создание переднего адронного калориметра FHCaI в сотрудничестве с Лабораторией физики высоких энергий, ЛФВЭ ОИЯИ. В 2019 г. ИЯИ РАН продолжал работу по созданию переднего адронного калориметра и подготовке к будущим экспериментам на установке MPD.

6. Задача «Эксперимент BM@N»

Эксперимент BM@N является первой стадией мегапроекта НИКА и предназначен для исследования сильновзаимодействующей материи в ядро-ядерных столкновениях в эксперименте с фиксированной мишенью при энергии налетающих ядер до 4.5 ГэВ. Основные физические задачи эксперимента – исследования рождения странных и векторных мезонов в ядерной среде, подпорогового рождения гиперонов, азимутальных корреляций и потоков адронов, поляризационных эффектов, уравнения состояния ядерной

материи. При изучении ядро-ядерных взаимодействий необходимо определение геометрии столкновений - центральности и плоскости реакции.

7. Задача «Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий ядер и нуклонов в широкой области энергий на ускорителях электронов»

В последние годы изучение электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии, России и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Современные эксперименты, включая настоящую работу, в этой области проводятся с использованием поляризованных пучков фотонов, поляризованных мишеней и поляриметров продуктов реакции. Прецизионное измерение сечений фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах и их спиновых асимметрий, выполняемое с применением новейших методик, позволяет получать уникальную информацию о динамике реакций, спиновых структурных функциях и формфакторах нуклонов, а также о свойствах нуклонных резонансов. Особое внимание уделяется изучению фоторождения странных мезонов.

8. Задача «Изучение механизмов фотоядерных реакций в области энергий вблизи порога по методу наведенной активности»

В последние годы в мире заметно возрос интерес к изучению фотоядерных реакций вблизи порога. Актуальность таких исследований связана с возможностью получения новых фундаментальных знаний о природе ядерной материи, а также возможностью решения различных прикладных задач. Среди новых фундаментальных направлений важную роль играет исследование коллективных возбуждений ядер (пигми – резонансов) в ядрах, у которых согласно теоретической интерпретации проявляются новые моды колебаний типа тороидальных, компрессионных, “ножничных” и др. Цель настоящего исследования состояла в изучении механизмов возбуждения спиновых изомеров ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In реальными и виртуальными фотонами вблизи порога (в области пигми резонанса) методом наведенной активности. Объектом исследований является также образование запаздывающих нейтронов от фотоделения ядер-актинидов вблизи порогов фотонейтронных реакций. Решается актуальная задача по исследованию образования короткоживущих ядер – предшественников испусканию запаздывающих нейтронов с периодом полураспада $\sim(1-2)$ мс. Дополнительно на основе моделирования по программе GEANT-4 разработан новый фотоядерный метод идентификации радиоактивных и опасных веществ в крупнотоннажных контейнерах, который может иметь большое прикладное значение. Экспериментальные исследования сопровождаются теоретическими

разработками по описанию гигантских резонансов в ядрах в рамках полумикроскопической модели.

9. Задача «Исследование фотоядерных реакций на фемтосекундных лазерах»

Существенную новизну в исследование фотоядерных реакций в последние годы внесли разработки новых методов на основе мощных импульсных фемтосекундных лазеров. В результате такие исследования стали междисциплинарными и включают себя не только ядерную физику, но также физику плазмы и новых методов ускорения. Актуальность темы связана также с решением прикладных задач в области обеспечения безопасности, защиты от терроризма, ядерного нераспространения. В результате оформилось новое научное направление под названием «Ядерная фотоника», которое сейчас активно развивается на Западе.

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

Одной из важных проблем ядерной физики является принцип зарядовой независимости ядерных сил, сформулированный В. Гейзенбергом в 1932 г. По определению зарядовая независимость – это инвариантность относительно любого вращения в изоспиновом пространстве. Зарядовая симметрия означает, что в синглетном 1S_0 состоянии протон-протонное и нейтрон-нейтронное взаимодействия после вычитания электромагнитных эффектов являются слегка различными. В современном понимании зарядовая симметрия ядерных сил связана с разностью масс u - и d -кварков и электромагнитным взаимодействием между кварками. Наиболее очевидный и важный случай проявления этого эффекта – нейтрон-протонная разница масс. Особую роль в определении меры нарушения зарядовой симметрии ядерных сил 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 нейтрон-нейтронного (a_{nn}) и протон-протонного (a_{pp}) взаимодействия велики по абсолютной величине и весьма чувствительны к небольшим различиям nn - и pp -потенциалов.

Точные экспериментальные данные о длинах рассеяния и их различии позволяют получить количественную оценку нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил $\Delta a_{НЗС} = a_{pp} - a_{nn}$. Длина протон-протонного рассеяния была определена с высокой точностью из экспериментов по прямому рассеянию протона на протоне, и ее современное значение $a_{pp} = -7.8149 \pm 0.0029$ Фм приведено в [1]. Это экспериментальное

значение включает вклад кулоновского взаимодействия. Если удалить кулоновское pp -взаимодействие, то полученное значение $a_{pp}^{NN} = -17.3 \pm 0.4$ Фм принимается в настоящее время как ядерная часть длины pp -рассеяния [2].

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 двух нейтронов, имеющих малую относительную энергию. В [3,4] высказано предположение, что разброс значений a_{nn} (от -16 до -22 Фм), полученный в реакциях с тремя частицами в конечном состоянии [5–12], может быть связан со значительным влиянием $3N$ -сил.

По мнению авторов дибарионной модели [13, 14], в таких реакциях может возникнуть новый механизм – обмен скалярным мезоном между нуклоном и дибарионом (синглетом). Такое дополнительное взаимодействие может привести к изменению значений a_{nn} и E_{nn} , извлекаемых из реакции с двумя нейтронами в конечном состоянии. Степень этого изменения может зависеть от относительной скорости фрагментов – nn -пары и протона, и для ее оценки в [3, 4] был введен некий кинематический фактор R , от которого может зависеть дополнительное $3N$ взаимодействие.

Рассмотрим реакцию $n + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p$, в которой в промежуточном состоянии разлетаются nn -пара и заряженный фрагмент (p). Скорость разлета фрагментов можно рассчитать по кинематике двухчастичной реакции $n + {}^2\text{H} \rightarrow (nn) + p$. Выберем произвольный интервал времени t (выбор определенного значения t не имеет значения из-за очевидного масштабирования) и определим расстояние R , на которое разлетятся фрагменты за это время. Поскольку скорость разлета фрагментов в различных экспериментах, проведенных при различных энергиях налетающих частиц, различна, то и параметр R будет различаться. Можно предположить, что чем больше параметр R , тем быстрее nn -пара вылетает из области $3N$ -взаимодействия и тем меньше влияние $3N$ сил на величины извлекаемых параметров nn -взаимодействия – длины рассеяния и энергии виртуального состояния, и таким образом можно игнорировать вклад $3N$ -сил в интерпретацию результатов для a_{nn} (или E_{nn}) в данном эксперименте. Отметим, что наибольшее значение параметра $R = 8.3$ Фм соответствует эксперименту по извлечению длины рассеяния в реакции nd -развала при энергии первичных нейтронов 40 МэВ [11].

Для проверки предлагаемой гипотезы о зависимости извлекаемых параметров NN -взаимодействия от относительной скорости разлета NN -пары (синглета) и третьей частицы (влияние $3N$ -сил) запланированы исследования реакций nd - и dp -развала для различных энергий.

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

Изучение кластерной структуры легких слабосвязанных ядер является актуальной задачей, привлекающей внимание экспериментаторов и теоретиков. Особый интерес вызывает единственный стабильный изотоп ядер бериллия – ${}^9\text{Be}$, кластерную структуру которого можно рассматривать как состоящую из двух альфа-частиц, дополненную нейтроном. В настоящее время изучение кластерной структуры ядер является актуальной задачей. Ядра бериллия привлекают внимание экспериментаторов и теоретиков из-за своей ярко выраженной кластерной структуры. Единственный стабильный изотоп ядер бериллия – ${}^9\text{Be}$ имеет ярко выраженную кластерную структуру, состоящую из двух альфа-частиц, дополненную нейтроном. При этом возбужденные состояния ${}^9\text{Be}$ могут распадаться либо прямо на две альфа-частицы и нейтрон, либо через промежуточные состояния с нестабильными ядрами ${}^8\text{Be} + n$ или ${}^5\text{He} + \alpha$ [1–3]. Таким образом, двухчастичные конфигурации ${}^8\text{Be} + n$ и ${}^5\text{He} + \alpha$, наряду с конфигурацией $\alpha + \alpha + n$, могут играть важную роль при описании кластерной структуры возбужденных состояний ${}^9\text{Be}$.

Исследования кластерной структуры ${}^9\text{Be}$ ведутся в течение длительного времени, однако необходимость получения количественных данных о вероятности развала возбужденных состояний через различные кластерные каналы имеется до сих пор [1–5]. В рамках темы будет исследована 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.

Для определения кластерной структуры возбужденных состояний ${}^9\text{Be}$ предлагается исследование неупругого рассеяния дейтронов и альфа-частиц с возбуждением различных состояний с регистрацией как рассеянной частицы (дейтрон или альфа-частица), так и частицы от развала этих состояний (нейтрон или альфа-частица). Выбор дейтронов и альфа-частиц в качестве ядер-снарядов обусловлен их простейшей структурой, что позволяет упростить изучение механизмов ядерных реакций и получать информацию о структуре ядра мишени, а из-за достаточно малых энергий порогов развала через каналы ${}^8\text{Be} + n$, $\alpha + \alpha + n$ и ${}^5\text{He} + \alpha$ многие возбужденные состояния ${}^9\text{Be}$ могут разваливаться с испусканием нейтронов и альфа-частиц.

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

Интерес к получению нейтронных данных остается значительным, связанным в основном с потребностью данных при разработке ядерных реакторов нового поколения.

Поэтому и получение нейтронных данных, их анализ и систематизация остаются актуальными.

Были проведены расчеты и измерения с целью определения оптимальных условий для получения необходимых нейтронных данных для быстрых нейтронов на фотонейтронном источнике ускорителя ЛУЭ-8. Для решения подобных задач с использованием медленных и тепловых нейтронов проведены исследования возможности вывода нейтронов из фотонейтронного источника, формирования пучка соответствующих нейтронов, разработаны методики и созданы установки для нейтронных измерений.

13. 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. Такие установки также являются эффективными средствами для решения и других задач прикладного и фундаментального значения, в частности для изучения фотоядерных реакций в области возбуждения пигмиди-резонансов.

14. Задача «Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «Mu2e»»

Институт ядерных исследований РАН участвует в совместном международном эксперименте Mu2e (FNAL, США) по поиску процесса $\mu \rightarrow e$ конверсии с уровнем чувствительности превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение на данный процесс.

Современная теория элементарных частиц не может предсказать процесс наиболее чувствительный к поиску нарушения лептонных чисел. Поиск трех редких мюонных процессов ($\mu \rightarrow e$ конверсии, $\mu \rightarrow e\gamma$ и $\mu \rightarrow eee$), чувствительных к трем возможным новым взаимодействиям лептон-кварк, лептон-фотон и лептон-лептон, на базе одной установки повышает вероятность открытия новых физических явлений связанных с нарушением лептонных чисел.

15. Задача «Создание оптико-каскадной модели, описывающей поглощение ядром медленного антинейтрона, для экспериментов по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций»

Возможны два направления поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций. Одним из них является поиск осцилляций в высокоинтенсивных нейтронных пучках от ядерных реакторов или нейтронных пучках сильноточных ускорителей. Недавно предложен новый эксперимент по поиску осцилляций на нейтронном пучке ESS (European Spallation Source, LUND, Швеция). В настоящее время идет создание установки по поиску $n \rightarrow \bar{n}$ осцилляций на реакторных ультра-холодных нейтронах (UCN) на реакторе WWR-M (ПИЯФ, Гатчина). Теоретически возможно превращение нейтрона в антинейтрон в ядре. Однако такие переходы значительно подавлены по сравнению с $n \rightarrow \bar{n}$ переходами в вакууме. В больших подземных детекторах это подавление компенсируется огромным количеством нейтронов, доступных для исследования. В настоящее время идет подготовка эксперимента по поиску $n \rightarrow \bar{n}$ переходов в ядре ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ на большом жидкоаргоновом детекторе DUNE.

Ключевым моментом в создании экспериментальных установок по поиску осцилляций является численное моделирование с целью повышения эффективности регистрации основных событий и подавления фонов. Признаком перехода нейтрона в антинейтрон является аннигиляция образовавшегося антинейтрона на стенках ловушки (UCN, Гатчина) или детектора (ESS). Из оценки величины периода осцилляции $\tau_{\bar{n}n} \gtrsim 10^8 \text{с}$ следует очень малая величина ожидаемого эффекта: ($\lesssim 10^{-18}$). Поэтому эксперимент должен обладать максимальной возможной эффективностью регистрации очень редких антинейтронов, а для этого необходима подробная эксклюзивная информация о процессе аннигиляции медленных антинейтронов на ядрах. В основе такого генератора событий аннигиляции должна лежать теоретическая модель, достоверно описывающая сложный процесс поглощения антинейтрона ядром-мишенью.

16. Задача «Исследование подпорогового рождения легких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях. Осцилляции частиц в поглощающей среде»

Изучение рождения псевдоскалярных мезонов (заряженных каонов, η и η' мезонов), легких векторных мезонов (ρ , ω , ϕ), мезонов с “открытым” и “скрытым” чармом (D , J/ψ), а также гиперонов при взаимодействии ядер и элементарных проб (протонов, пионов, фотонов) с ядрами стало предметом весьма интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в последние годы. Основным интерес к данным реакциям был обусловлен возможностью изучения в них ренормализации свойств этих частиц,

предсказываемой различными теоретическими моделями (киральной теорией возмущений, релятивистскими среднеполевыми подходами, подходами, основанными на использовании эффективных длин рассеяния, и т.д.), в горячей/плотной ядерной материи. Знание этих свойств является крайне важным, в частности, для понимания таких фундаментальных вопросов теории сильных взаимодействий-квантовой хромодинамики, (КХД), астрофизики и адронной физики как наличие киральной симметрии (приближенной) у лагранжиана КХД и ее частичное восстановление не только в плотной ядерной среде, но уже и при обычных ядерных плотностях, строение необычных звездных объектов-нейтронных звезд и их динамические и статические характеристики, короткодействующая часть нуклон-нуклонного потенциала. Свидетельством актуальности проблемы являются проводимые и планируемые эксперименты в области “in-medium physics” во всех ведущих физических центрах мира.

Осцилляции частиц описывались потенциалом. В случае поглощающей среды использовался оптический потенциал. В важнейшем случае сильного поглощения он не справедлив.

1. Исследование ядро-ядерных взаимодействий на установке АЛИСЕ на встречных пучках ускорителя LHC CERN

1.1. Работы по детекторным системам T0 и ФИТ

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

Одним из важнейших способов идентификации заряженных частиц на установке АЛИСА в промежуточном диапазоне поперечного импульса от 0.5 ГэВ/с до 4 ГэВ/с является времяпролётный метод. Эта задача в основном выполняется с использованием временных измерений, которые основаны на точном определении момента столкновения пучков, длине пути, импульсе и времени прихода треков к детектору Time-of-Flight (TOF). Момент столкновения пучков может определяться как детектором T0 (t_{ev}^{T0}), так и самим детектором TOF (t_{ev}^{TOF}). Наиболее эффективно детектор T0 используется для p-p взаимодействий и периферических ядро-ядерных взаимодействиях. На рисунке Рисунок 1 показана эффективность определения момента столкновения пучков в зависимости от центральности взаимодействия $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ при энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ. Видно, что комбинация детекторов T0 и TOF позволяет идентифицировать частицы времяпролётным методом вплоть до самых периферических взаимодействий с центральностью больше 80%.

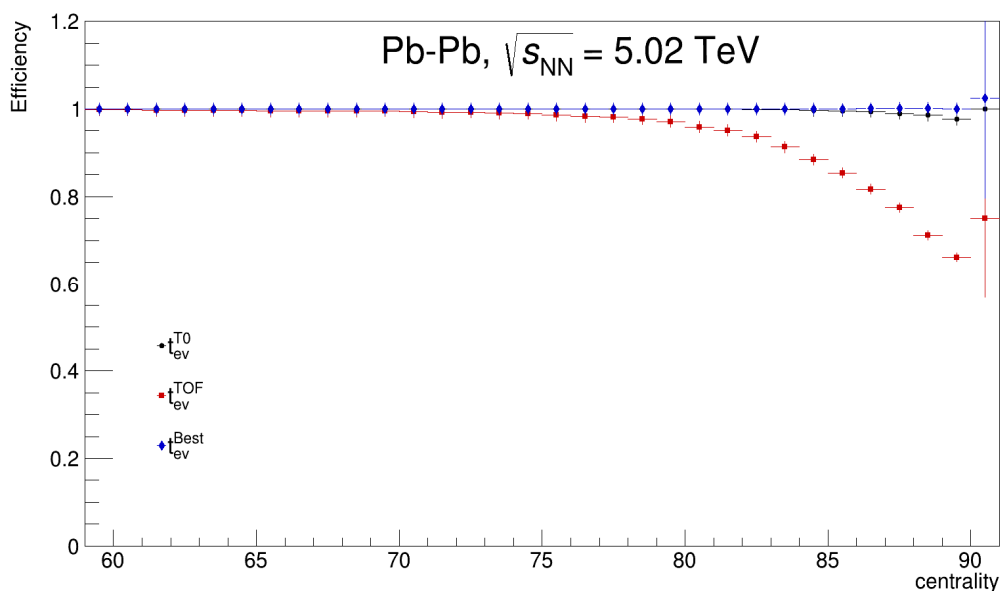


Рисунок 1 – Эффективность определения момента столкновения пучков как функция центральности при энергии в системе центра масс $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ столкновений $\sqrt{s_{NN}}=5.02$

ТЭВ. Черные точки показывают эффективность t_{ev}^{T0} , красные квадраты - t_{ev}^{TOF} , синие ромбы — комбинацию T0 и TOF

На рисунке Рисунок 2 показано, как формируется время столкновения для взаимодействий протонов с энергией $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и взаимодействий протон-свинец с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ в зависимости от множественности событий: синие ромбы относятся к событиям, в которых используется комбинация детекторов T0 и TOF, красные квадраты — только TOF, чёрные точки — к событиям, в которых момент столкновения определялся только детектором T0 в любой комбинации: T0A, T0C или их совпадения, а также эффективность каждой компоненты. Видно, что наибольший вклад детектора T0 приходится на события с числом треков меньше 15.

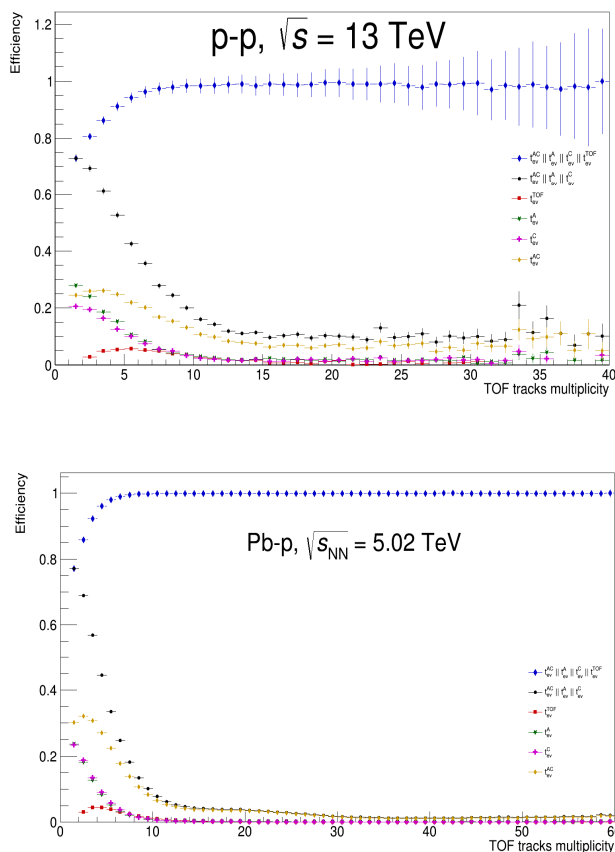


Рисунок 2 – Эффективность определения момента столкновения пучков протонов с энергией $\sqrt{s} = 13$ ТэВ (слева) и момента столкновения p-Pb с энергией $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ (справа) с помощью различных компонент комбинации детекторов T0 и TOF

В ноябре 2018 супердетектор АЛИСА успешно работал на набор физических данных по столкновениям $^{208}\text{Pb} - ^{208}\text{Pb}$ при рекордно высокой энергии в системе центра масс на нуклонную пару $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. Физический анализ данных выполнялся уже в 2019 году и показал стабильное разрешение времени взаимодействия на уровне 20 пс.

Программа автоматического мониторинга разрешения и центрирования t_{ev}^{T0} включена в общую систему контроля качества данных и публикуется на странице <http://aliquat0.web.cern.ch/aliquat0> в конце каждого цикла реконструкции данных. Результаты реконструкции реальных и симулированных данных постоянно контролируются.

1.2. Изучение характеристик детектора ФИТ-Т0 для работы в будущем Run 4 на БАК

Для работы во время Run 4 супердетектор АЛИСА планируется дополнить передним электромагнитным и адронным калориметром (FoCal). FoCal представляет собой мелкоячеистый Si-W калориметр, предназначенный для регистрации вторичных частиц в интервале псевдобыстрот $3.2 < \eta < 5.8$. FoCal позволит изучать распределение партонов (глюонов) при малых значениях скейлинговой переменной x путем измерением прямых фотонов. Он существенно усилит возможности АЛИСЫ по измерению незаряженных мезонов, фотонов и джетов.

FoCal предполагается разместить на расстоянии 7 м от точки взаимодействия. По этой причине детектор ФИТ-Т0 планируется сдвинуть для устранения перекрытия с аксептансом нового калориметра. В 2019 году были выполнено моделирование указанной геометрии АЛИСА с целью определения того, как повлияет увеличение расстояния от вершины взаимодействия до ФИТ-Т0 на качество триггерных сигналов ФИТ-Т0, на разрешение момента столкновения и пространственное положение вершины.

В настоящее время на трубе ионопровода на расстоянии 4 м находится вакуумный насос. В верхней части рисункаРисунок 3 подробно изображён детектор ФИТ и ионопровод так, как они заданы в системе моделирования и обработки данных AliRoot в настоящее время. В нижней части рисунка детектор ФИТ расположен вокруг трубы, разрабатываемой для дополненного передним калориметром супердетектора АЛИСА. В этой системе ионопровода убраны все массивные детали, вызывающие поток вторичных частиц.

Для изучения влияния положения детектора на его характеристики было проведено моделирование по методу Монте-Карло 10000 взаимодействий пучков протонов с энергией 13 ТэВ. Моделирование проводилось посредством системы AliRoot, при этом стандартная труба ионопровода была заменена на специально разработанную для Run 4. Сравнивались характеристики для 3-х положений детектора FT0-A: стандартное — 333 см, 640 см и 700 см от точки взаимодействия. Положение детектора со стороны С не менялось и составляло 82 см. Анализ результатов показал, что такие характеристики, как

эффективность триггера и разрешение момента и вершины взаимодействия, одинаковы для всех исследованных положений детектора.

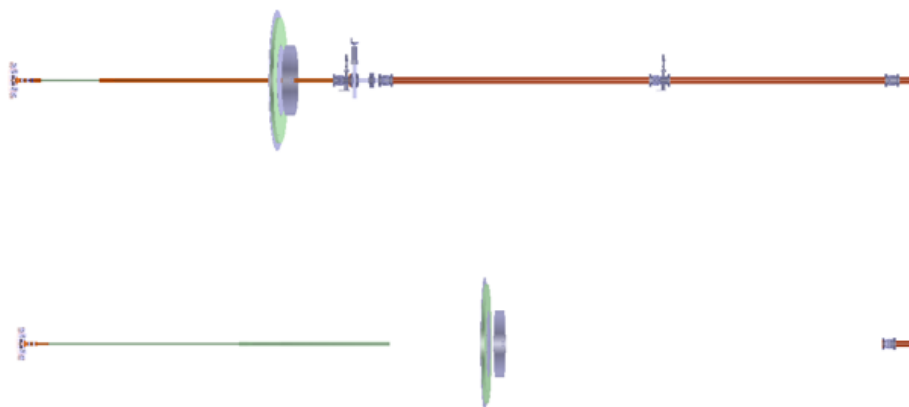


Рисунок 3 – Детектор ФИТ и ионпровод: сверху — используемая в настоящее время геометрия, внизу — новая геометрия, разработанная специально для АЛИСЫ, дополненной передним калориметром. Часть компонентов новой геометрии представлена схематически

На рисункеРисунок 4 показана эффективность выработанных детектором ФИТ-T0 триггеров А&С и А или С как функция количества первичных частиц для положения детектора со стороны А: 333 см, 640 см и 700 см от точки взаимодействия. Видно, что при увеличении расстояния эффективность ФИТ-T0 практически не меняется.

На рисункеРисунок 5 показано разрешение момента и вершины взаимодействия как функции множественности событий взаимодействия протонов при $\sqrt{s}=13$ ТэВ. Разрешение момента столкновения (правая панель) меняется от 20 пс для событий с 100 первичными частицами до 5 пс, когда множественность первичных частиц достигает 1000 для всех исследованных положений. Точность определения вершины взаимодействия для ФИТ-T0-А на 333 см составляет 3-4 мм и не зависит от множественности, в то время как детектор, расположенный на расстоянии 640-700 см улучшает разрешение с 5 мм до 1.5 мм по мере увеличения числа первичных частиц.

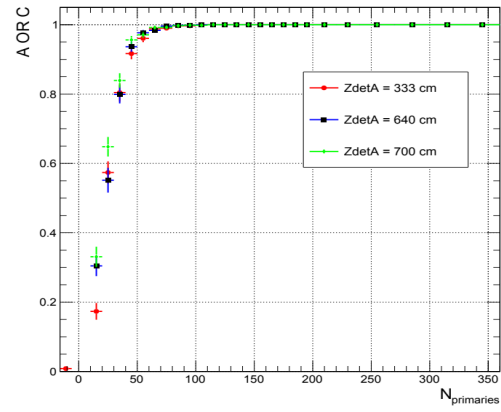
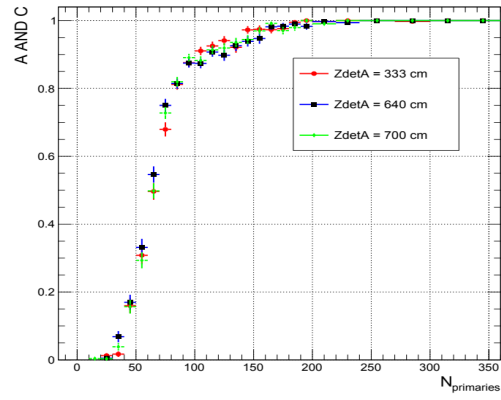


Рисунок 4 – Эффективность ФИТ-Т0 триггеров А&С (слева) и А или С (справа) в зависимости от множественности событий взаимодействия протонов при $\sqrt{s}=13$ ТэВ. Красные кресты соответствуют положению FT0А 333 см, синие - 640 см, зеленые — 700 см.

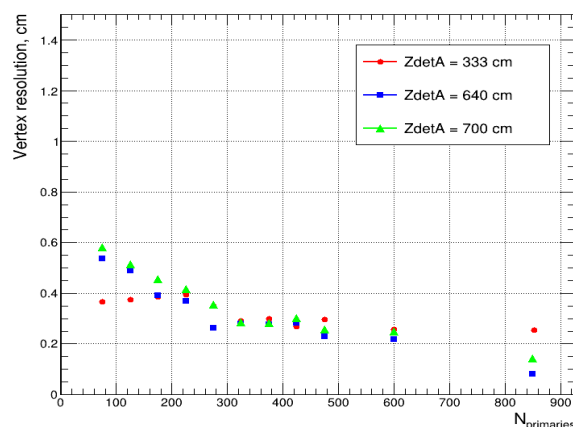
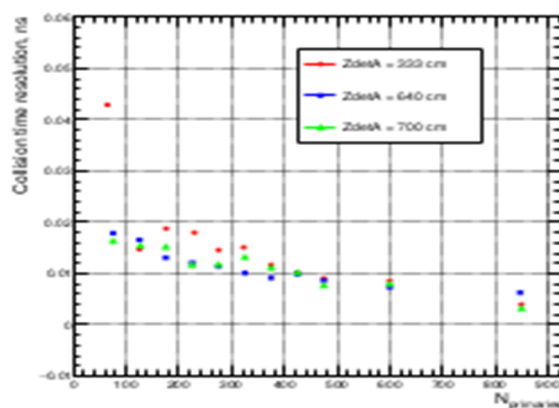


Рисунок 5 – Разрешение момента взаимодействия (слева) и вершины взаимодействия (справа) как функции множественности событий взаимодействия протонов при $\sqrt{s}=13$ ТэВ. Красные кресты соответствуют положению FT0A 333 см, синие – 640 см, зеленые — 700 см

1.3. Исследование характеристик насыщения и восстановления МКП-ФЭУ с ALD-покрытием

1.3.1. О ресурсе работы МКП-ФЭУ в составе ФИТ

В течение долгого времени основным недостатком фотоумножителей на микроканальных пластинах (МКП-ФЭУ) являлся их небольшой ресурс работы, на 3-4 порядка меньший ресурса работы классических ФЭУ [1, 2]. Это являлось существенным препятствием для широкого применения МКП-ФЭУ в экспериментах в области физики высоких энергий.

Некоторое время назад, для увеличения ресурса работы МКП-ФЭУ были предложены методики длительной очистки МКП лучом электронов (“electron scrubbing”), улучшение качества вакуума, а также использование технологии атомно-слоевого осаждения (ALD) различных веществ на поверхность МКП. В результате, ресурс работы

современных МКП-ФЭУ без ALD-покрытия микроканалов может достигать 0,5-1 Кл/см², при использовании ALD-технологии - ~20 Кл/см² [2, 3]. Это позволяет применять МКП-ФЭУ во множестве экспериментов, таких, как ATLAS Forward Proton детектор [4], TORCH детектор для модернизации эксперимента LHCb [5], DIRC детекторы эксперимента PANDA [3], TOP-детекторы эксперимента BELLE-II [2] и DIRC детектор будущего Электрон-Ионного Коллайдера [6]. Кроме того, в силу ряда геометрических, радиационных и электромагнитных ограничений, МКП-ФЭУ являются единственным типом фотоумножителей, подходящих для использования в черенковской подсистеме детекторного устройства ФИТ-T0 эксперимента ALICE [7].

В 2018 году, в ходе исследования характеристик МКП-ФЭУ семейства Planacon (производство Photonis Inc., США) для применения в детекторе ФИТ, нашей группой наблюдался необычно низкий (~10 нА/см²) уровень токового насыщения двух образцов МКП-ФЭУ с ALD-покрытием [8]. Кроме того, для этих же устройств впервые наблюдалось чрезвычайно большое время восстановления усиления после достижения токового насыщения – более 1 часа вместе характерной величины ~10³ с. Аналогичные устройства без ALD-покрытия имели стандартные характеристики (предел токового насыщения ~0.8 мкА/см² и малое время восстановления), что привело к возникновению подозрений на взаимную связь между обнаруженными проблемами и использованием ALD-покрытия.

Надёжное подтверждение этой информации важно не только для других научных групп, занятых разработкой перечисленных выше детекторов, но и для создания и дальнейшего обслуживания детектора ФИТ эксперимента ALICE: согласно расчётам [Ошибка! Источник ссылки не найден.], требуемый ресурс работы восьми наиболее загруженных ФЭУ в ФИТ-T0 составляет ≥ 0.5 Кл/см² в случае реализации стандартного сценария работы эксперимента, и ~2.5 Кл/см² в случае расширенного сценария. При этом известно, что коэффициент умножения МКП-ФЭУ семейства Planacon, планируемых к использованию в ФИТ-T0, уменьшается на 25% при достижении 0,5 Кл/см². Таким образом, после завершения третьего сеанса работы ЛHC, может возникнуть необходимость замены некоторых, наиболее загруженных МКП-ФЭУ в детекторе ФИТ.

1.3.2. Тестирование МКП-ФЭУ с ALD-покрытием и без него

Экспериментальное исследование, проведённое в ЦЕРН в апреле 2019 года, предполагало измерение предела токового насыщения и времени восстановления двух МКП-ФЭУ с ALD-покрытием, произведённых независимыми компаниями Hamamatsu Photonics K.K. (Япония) и Photech, Ltd. (Великобритания), вдобавок к уже имеющимся данным о МКП-ФЭУ производства Photonis. Так же был протестирован и образец МКП-

ФЭУ без ALD-покрытия, чтобы проверить возможное влияние методики измерения на полученные результаты. Тестируемые фотоумножители с ALD-покрытием были предоставлены коллегами из экспериментов ATLAS и BELLE-II. В качестве референсного ФЭУ без ALD-покрытия был использован один из фотоумножителей, закупленных для использования в детекторе ФИТ-T0 эксперимента ALICE. Основные технические параметры исследованных МКП-ФЭУ сведены в таблице Таблица 1.

Таблица 1 – Основные параметры тестируемых МКП-ФЭУ

№ устройства	1	2	3
Модель	R10754-07-M16	PMT253	XP85002/FIT-Q
Производитель	Hamamatsu	Photek	Photonis
Диаметр микроканалов	10 μm	15 μm	25 μm
Наличие ALD-покрытия	да	да	нет
Размер чувствительной области	23×23 мм ²	53×53 мм ²	53×53 мм ²
Сопротивление МКП	105 МΩ	14.9 МΩ	14 МΩ
Полное напряжение питания	1600 В	3000 В	1285 В
Ненасыщенный коэффициент умножения	5×10 ⁴	2×10 ⁵	1.5×10 ⁴
Интенсивность световых импульсов (зарегистрированные ф.э./импульс/см ²)	90	5×10 ²	2×10 ³
Плотность тока восстановления МКП	1.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	4.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	2.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Размер чувствительной области независимого канала считывания	5.3×5.3 мм ²	6.6×6.6 мм ²	26.5×26.5 мм ²
Серийный номер	KT0714	A1171005	9002140

Измерения проводились в соответствии с методикой, описанной в [8]. В качестве источника света использовался генератор коротких (<50 пс) лазерных импульсов с длиной волны 440 нм. Для регистрации и первичной обработки сигналов использовался цифровой осциллограф LeCroy WR8104. Для определения величины среднего анодного тока при котором происходит насыщение амплитуды сигнала на 10%, частота засветки в ходе измерений варьировалась от малых (10...20 Гц) до больших (0,3...3 МГц) величин.

Последующая проверка времени восстановления производилась путём измерения амплитуды сигнала до и после мгновенного перехода от высокой частоты засветки (≥ 0.3 МГц, фаза 1 на рисунке Рисунок) к низкой частоте (≤ 100 Гц, фаза 2 на рисунке Рисунок). В таблице Таблица 2 указана длительность каждой из фаз для протестированных устройств, а также величина падения напряжения на МКП в начале фазы 1 и в течение фазы 2.

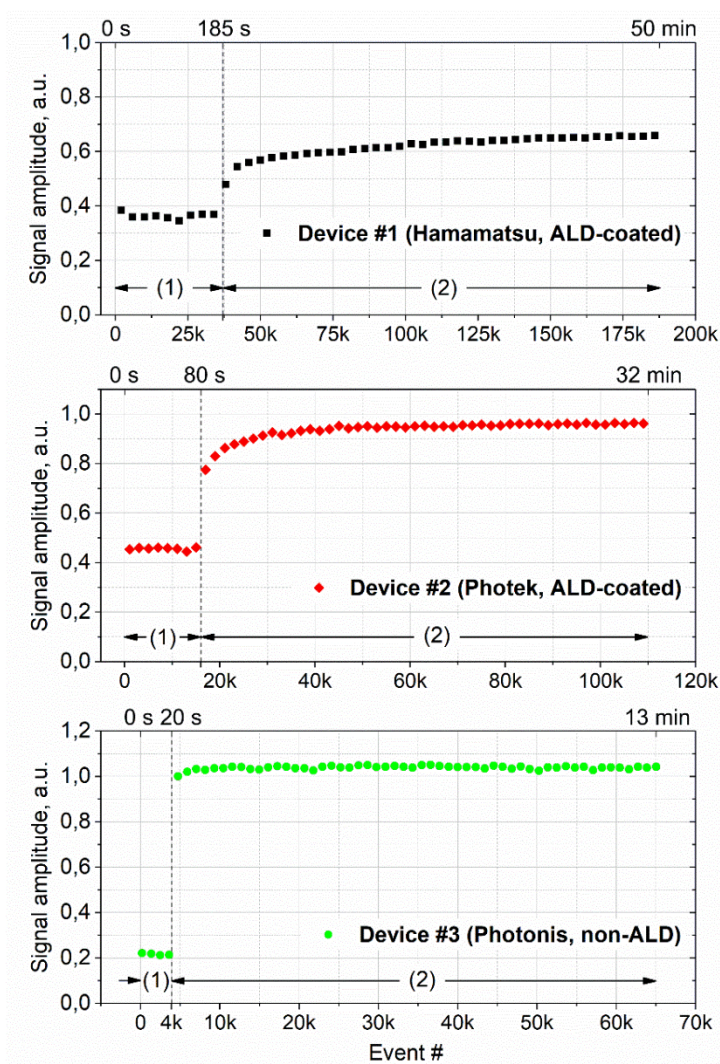


Рисунок 6 – Относительная величина сигнала МКП-ФЭУ, нормированная на показания референсного ФЭУ по мере проведения теста

Таблица 2 – Характеристики восстановления МКП-ФЭУ

№ устройства	1	2	3
Продолжительность фазы 1	185 с	80 с	20 с
Продолжительность фазы 2	50 мин	32 мин	13 мин

Изначальное падение напряжения на МКП ($U_{\text{МСП}}$)	834 В	1700 В	1016 В
$U_{\text{МСП}}$ в ходе фазы 2	834 ± 0.5 В	1691 ± 1 В	1016 ± 0.5 В

В результате, наблюдались следующие характеристики восстановления исследуемых устройств:

- коэффициент умножения устройства #1 восстановился только до 65% от оригинальной величины через 50 минут работы в ненасыщенном режиме. При этом, величина падения напряжения на МКП вернулась к первоначальному значению менее, чем через 1 секунду,
- коэффициент умножения устройства #2 восстановился до 95% от первоначальной величины в течение 10 минут. 5% разница в величине коэффициента умножения очевидно связана с незначительным снижением $U_{\text{МСП}}$, которое, вероятно, было вызвано прогревом МКП,
- коэффициент умножения устройства #3 восстановился до 103% от первоначальной величины мгновенно (менее, чем за величину периода засветки). 3% превышение коэффициента умножения не связано с изменением падения напряжения на МКП – его природа не ясна, но, возможно, связана с эффектами локального прогрева внутренней структуры прибора.

1.3.3. Выводы по результатам тестирования

Наблюдавшийся ранее неожиданно низкий предел токового насыщения МКП-ФЭУ семейства Planacon с ALD-покрытием [8] оказался не характерен для аналогичных устройств других производителей. Однако, проведённое исследование показало универсальность проблемы чрезвычайно большого времени восстановления МКП-ФЭУ с ALD-покрытием вне зависимости от других внутренних параметров устройств и фирмы-производителя. Это является важным научным результатом, на который следует обратить внимание ряда экспериментальных групп, ведущих разработку перспективных детекторов с использованием МКП-ФЭУ с ALD-покрытием. В связи с этим, полученные результаты были опубликованы в NIM A Short Communications [9]. Кроме того, полученные результаты позволяют определить оптимальную стратегию обслуживания детектора ФИТ-Т0 в случае проявления существенных признаков старения по завершению третьего сеанса

работы LHC в RUN 3: заменять МКП-ФЭУ в наиболее загруженных позициях детектора следует на аналогичные приборы без ALD-покрытия.

1.4. Сборка детектирующей подсистемы ФИТ-Т0-С

1.4.1. Компоненты ФИТ-Т0-С, спроектированные в ИЯИ РАН, и оптимизация расположения МКП-ФЭУ

В июле и августе 2019 г. в ЦЕРН была проведена сборка детектирующей подсистемы северного плеча триггерного комплекса ФИТ. К моменту начала сборки было закуплено и успешно протестировано 39 МКП-ФЭУ Planacon XR85002/FIT-Q. Для проведения сборки детектирующей подсистемы требовалось определить оптимальное местоположение каждого фотоумножителя на основании их характеристик. Была предложена и реализована следующая стратегия оптимизации местоположения МКП-ФЭУ:

- МКП-ФЭУ, требующие чрезмерно высокого напряжения питания для штатного коэффициента умножения ($1,5 \times 10^4$), должны быть установлены не в ФИТ-Т0С – вероятность пробойных явлений в кромке МКП при работе таких приборов повышена, тогда как в течение всего третьего сеанса работы LHC доступ к ФИТ-Т0С для замены МКП-ФЭУ будет невозможен (2 шт.).
- Из оставшихся ФЭУ для установки в ФИТ-Т0С отбираются те, которые не подходят для установки в ФИТ-Т0А с точки зрения динамического диапазона, уровня послеимпульсов и однородности отклика (17 шт.).
- Из оставшихся ФЭУ (21 шт.), 11 устройств с наименее выраженной и наиболее симметричной зависимостью коэффициента усиления от угла наклона к вектору магнитного поля отбираются для ФИТ-Т0С.
- 28 ФЭУ, отобранных для использования в ФИТ-Т0С, распределяются следующим образом: устройства с наиболее широким диапазоном линейного отклика устанавливаются приоритетно в центральные позиции, а устройства с наименее выраженной и наиболее симметричной зависимостью коэффициента усиления от угла наклона к вектору магнитного поля – в периферические позиции.

В результате была сформирована карта расположения ФЭУ в составе детектирующей подсистемы ФИТ-Т0С, представленная на рисунке Рисунок .

Сборка детектирующей подсистемы проводилась с использованием компонент, спроектированных в ИЯИ РАН и представленных на рисунках Рисунок – Рисунок 6.