

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-А20-120011790111-8

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯИ РАН,  
чл.-корр. РАН

Л.В. Кравчук

«31» января 2020 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АААА-А20-120011790111-8

«ТЕМА ИЯИ РАН В РАМКАХ КРУПНОГО ПРОЕКТА ПО ПРОВЕДЕНИЮ  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИОРИТЕТНЫМ  
НАПРАВЛЕНИЯМ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫМ ПРЕЗИДИУМОМ РАН, №КП12-345»  
«ФИЗИКА АДРОНОВ, ЛЕПТОНОВ, БОЗОНА ХИГСА И ЧАСТИЦ ТЕМНОЙ  
МАТЕРИИ (ИЯИ РАН)»»

(промежуточный за 2019 год)

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

В.А. Рубаков  
«31» января 2020 г.

Москва 2020г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководители НИР:

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

  
31.01.2020  
подпись, дата

В.А. Рубаков  
(введение, заключение)

Исполнители:

Зав. отделом, д.ф.-м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

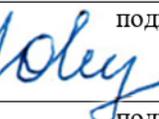
Н.В. Красников  
(раздел 3,4)

Зав. лаб., чл.-корр. РАН д.ф.-  
м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

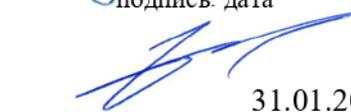
Г.В. Домогацкий  
(раздел 1)

Зав. отделом, д.ф.-м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

Ю.Г. Куденко  
(раздел 3,5)

Заместитель директора ИЯИ  
РАН, д.ф.-м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

А.В. Фещенко  
(раздел 2)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

В.Г. Недорезов  
(раздел 6)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

Л.Б. Безруков  
(раздел 5,8)

Зав. отделом, д.ф.-м.н., чл.-  
корр. РАН

  
31.01.2020  
подпись, дата

О.Г. Ряжская  
(раздел 8)

Зав. лаб., д.ф.-м.н., чл.-корр.  
РАН

  
31.01.2020  
подпись, дата

В.Н. Гаврин  
(раздел 7)

Зав. лаб., д.ф.-м.н.

  
31.01.2020  
подпись, дата

Э.А. Коптелов  
(раздел 8)

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 101 с., 0 кн., 41 рис., 2 табл., 28 источн., 0 прил.

**Ключевые слова:** НЕЙТРИНО, БАЙКАЛЬСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЕЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ, МАССИВНЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ, ТЕМНЫЙ ФОТОН, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР, АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР, АНТИМАТЕРИЯ, АНТИВОДОРОД, АНТИПРОТОНЫ, ГРАВИТАЦИЯ, ПОЗИТРОНИЙ, ДВОЙНОЙ БЕЗНЕЙТРИННЫЙ БЕТА РАСПАД,

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2019 год.

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

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

**1. Задача «Развитие Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, введение в эксплуатацию на оз. Байкал очередного кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Подготовка к экспедициям на озере Байкал».**

Объектом исследования являются устройства и методы глубоководной регистрации астрофизических нейтрино высоких энергий.

Цель работы — создание и эксплуатация нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба в озере Байкал для поиска и исследований потоков астрофизических нейтрино высоких энергий.

Работы в 2019 году выполнялись по отлаженной в предыдущие годы методологии, включающей исследования и разработки по улучшению характеристик глубоководной регистрирующей аппаратуры, повышению ее надежности, повышению производительности при изготовлении элементов телескопа, лабораторные испытания отдельных элементов и систем в сборе, комплектация и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовка инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал, транспортировка элементов и оборудования к месту монтажа новых систем телескопа, развертывание ледового лагеря, предустановочные испытания элементов и систем телескопа, монтаж новых кластеров телескопа, ремонт вышедших из строя элементов в ранее установленных кластерах,

прокладка донных кабелей, запуск в эксплуатацию телескопа с увеличенным объемом.

В результате в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2019 года были установлены 2 новых кластера и запущен в эксплуатацию телескоп из 5 кластеров с эффективным объемом 0,25 км<sup>3</sup>. Такой объем для глубоководных нейтринных телескопов достигнут впервые в мире. Российские ученые получили уникальную крупномасштабную установку для экспериментальных исследований в одном из самых актуальных направлений современной фундаментальной науки – астрофизики частиц высоких энергий и нейтринной астрономии. В соответствии с планами работ в 2022 году эффективный объем Baikal-GVD превзойдет эффективный объем самого большого нейтринного телескопа IceCube в льдах Антарктики – 0,4 км<sup>3</sup>.

Осуществлена подготовка к экспедиции 2020 года на озеро Байкал.

## **2. Задача «Развитие экспериментальных комплексов ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН, Троицк-ню-масс и ускорительный комплекс».**

Наиболее существенной и передовой работой, проводимой на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО ИЯИ РАН) в 2019 году, явился эксперимент BEST с искусственным источником нейтрино на основе изотопа <sup>51</sup>Cr с интенсивностью 3.4 МКи по поиску нового типа осцилляций нейтрино. Проведение этой работы способствовало развитию экспериментального комплекса ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН. Выполнено 10 экспозиций с источником в двухзонной галлиевой мишени и 10 извлечений из каждой зоны мишени. Извлечения установлены в счетные системы на измерения, которые продолжаются.

Выполнены измерения активности источника по его тепловыделению в калориметрической системе. Из калориметрических измерений получена величина активности нейтринного источника, которая на момент начала измерений в БНО ИЯИ РАН составила **3,41 ± 0,02 МКи**. В мире впервые изготовлен искусственный источник нейтрино такой высокой интенсивности и впервые достигнута такая высокая точность в измерении такой активности.

Из спектрометрических измерений гамма излучения источника определены радиоактивные примеси, их активности в источнике и их вклад в тепловыделение источника.

На установке Троицк-ню-масс ИЯИ РАН в течение нескольких месяцев многократно проводились наполнения объема спектрометра с давления высокого вакуума до давления 2-3 мбар парами воды и газообразного водорода. В результате очистки достигнут уровень фона в спектрометре, который позволяет проводить дальнейшие измерения по поиску

стерильных нейтрино в распаде трития.

Проведена большая работа по обработке набранных ранее данных с новым типом многоканальных кремниевых дрейфовых детекторов. Данная работа проводилась совместно с коллегами из института физики им. Макс Планка в Мюнхене в рамках имеющегося сотрудничества. Основная задача состояла в том, чтобы убедиться, что данный тип детектора существенно расширит диапазон и качество измерений в интервале масс стерильных нейтрино 1-8 кэВ.

На сильноточном линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН в 2019 г. проведено четыре сеанса, направленных на выполнение программ РАН, государственного задания, научной программы и иных обязательств Института. Обеспечено проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований. Общая продолжительность сеансов в 2019 году составила 1296 часов. Работы проводились на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также радиоизотопный комплекс и экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 49 МэВ до 267 МэВ. Успешная работа ускорителя стала возможной благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и работам по модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса, среди которых следует отметить модернизацию вакуумной системы и системы питания электромагнитного оборудования ускорителя.

**3. Задача «Участие учёных ИЯИ РАН в международных экспериментах в международном центре CERN (Женева): эксперимент AEGIS, эксперимент NA64 (SPS CERN), эксперимент CMS, LHSb- эксперимент, эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0, эксперимент SHIP (CERN), детектор Baby-MIND, эксперимент ALICE»**

Предмет исследования - свойства элементарных частиц и ядерной материи при высоких энергиях

Цель исследования – прецизионные измерения параметров Стандартной Модели, поиск новой физики и исследование свойств ядер при сверхвысоких энергиях.

Эксперимент AEGIS

Разработан метод быстрой диагностики высоковозбужденных атомов позитрония. Метод основан на регистрации позитронов, образующихся при ионизации высоковозбужденных атомов позитрония, высокочувствительным детектором с

микроканальной пластиной. Ионизация позитрония произведена и из состояния с  $n=3$  и из Ридберговских состояний облучением атомов позитрония инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм. Для Ридберговских состояний с  $n>17$  происходит автоионизация атомов электрическим полем, возникающем в сопутствующей системе координат при движении позитрония в сильном поперечном магнитном поле 1Т.

#### Эксперимент NA64

В 2019 году был получен новый результат по поиску нового бозона  $X$  (16.7 MeV), который может объяснить "Berillium anomaly". бозон ищется через процесс  $e-Z \rightarrow e-Z X$  при распадах в пары  $e+e-$ . Был получен новый предел  $X-e$  – параметр смешивания  $1.2 \times 10^{-4} < \sim \epsilon e < \sim 6.8 \times 10^{-4}$ . Также было получено ограничение на смешивание стандартного и темного ( $A'$ ) в области масс менее 24 MeV.

#### Эксперимент CMS

В 2019 г. были разработаны методы выделения событий рождения тяжелого майорановского нейтрино и калибровочных бозонов в эксперименте CMS, развиты генераторы Монте-Карло для моделирования таких процессов. Продолжен анализ данных эксперимента CMS, собранных в 2016-2019 гг. Создано и поддерживалось необходимое программное обеспечение. В результате анализа данных, полученных коллаборацией CMS в течение 2016-18 гг. и при полной светимости БАК в 2016-18 гг. были получены предварительные ограничения на массу правого бозона  $WR$  в двумерной области масс при ограничении на массу тяжелого нейтрино.

#### Эксперимент LHCb

В 2019 г. эксперимента LHCb была выполнен анализ данных с большой статистикой, что позволило подтвердить на уровне 5.4 стандартных отклонения структуру  $P_c(4450)^+$ , как два новых близких состояния  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$ . Кроме того, найдено новое состояние  $P_c(4312)^+$ , на уровне достоверности 7.3 стандартных отклонения. Эти результаты объяснены минимальным набором из пяти кварков, это так называемый очарованный пентакварк.

#### Эксперимент NA62

В 2019 г. был получен первый результат по измерению редкого распада каона на пион и два нейтрино. Было получено ограничение на вероятность распада  $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu)$   $< 1.6 \times 10^{-10}$  на 95% уровне достоверности. Было получено новое ограничение на параметры смешивания стандартных и массивных нейтрино в диапазоне масс до 500 МэВ. Был собран и протестирован прототип детектора ANTI-0.

#### Эксперимент SHIP.

Был разработан детектор мюонов высоких энергий. Детектор будет состоять из четырех станций 6x12 метров, каждая из которых представляет собой чередующиеся слои стали и пластмассовых сцинтилляторов общей длиной 3 ядерных длины и полной активной площадью 288 кв.м.

#### Детектор Baby-MIND

В рамках нейтринной платформы ЦЕРН в 2019 г. был создан магнитный нейтринный детектор Baby-MIND, который состоит из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Детектор был установлен и запущен на нейтринном канале осцилляционного эксперимента с длинной базой T2K и начат набор статистики с пучком мюонных нейтрино.

#### Эксперимент ALICE

В 2019 г. в ходе модернизации были разработаны несколько новых детекторных систем ALICE, включая новый триггерный детектор FIT (Fast Interaction Trigger), также с успехом и точно в срок завершена разработка, сборка и тестирование северного плеча детектора FIT-T0 обновлённого эксперимента ALICE. Получен новый результат по изучению механизма образования дейтронов и антидейтронов в протон-протонных столкновениях при энергии в системе центра масс 7 ТэВ.

#### **4. Задача «Работы по модернизации экспериментальных установок ЦЕРН, в работе которых принимают участие российские учёные».**

Предметом исследования является создание и модернизация установок действующих экспериментов

Цель исследований – улучшение параметров установок для повышения их чувствительности к различным процессам.

Метод исследований – средства ускорительной физики и детекторов частиц

В эксперименте CMS были выполнены работы по модернизации электромагнитного и адронного калориметров установки CMS, велось мониторингирование качества данных и контроль работы детекторных систем эксперимента CMS во время дежурств в ЦЕРНе.

В эксперименте NA62 была выполнена разработка, изготовление и тестирование измерений трех детекторов: мюонного годоскопа MUV-3, годоскопа заряженных частиц (CHOD) и вето-годоскопа ANTI0.

В эксперименте SHIP был разработан мюонный детектор.

В рамках нейтринной платформы ЦЕРН в 2019 г. был создан магнитный нейтринный детектор Baby-MIND, а также проведена разработка и был создан прототип 3D сегментированного сцинтилляционного детектора (SuperFGD).

В 2019 г. в эксперименте ALICE были разработаны новые детекторные системы ALICE, завершена разработка, сборка и тестирование северного плеча детектора FIT-T0, состоящего из черенковских модулей, каждый из которых использует кварцевые радиаторы.

### **5. Задача «Участие сотрудников ИЯИ РАН в экспериментах: эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино, эксперимент E36 (Япония), эксперимент NOVA, эксперимент GERDA»**

Предмет исследования – свойства элементарных частиц, в частности, нейтрино.

Цель исследований – обнаружение новых явлений.

Метод исследований – средствами ускорительной и неускорительной физики.

#### **Эксперимент ОКА (Россия)**

В 2019 г. в эксперименте ОКА было выполнено наиболее точное измерение разности векторного и аксиально-векторного форм  $FV-FA$  в распада  $K^+ \rightarrow \mu + \nu \mu \gamma$  на основе анализа  $95 \times 10^3$  событий  $K^+ \rightarrow \mu + \nu \mu \gamma$ . Результат:  $FV-FA = 0.134 \pm 0.021(stat) \pm 0.027(syst)$ . Также было зарегистрировано 450 событий распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$  с энергиями фотона более 30 МэВ. Определена вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \gamma$ , с  $E_\gamma > 30$  MeV  $(0.71 \pm 0.05) \times 10^{-5}$ . Результат сравнивается с предсказание киральной пертурбативной теории.

#### **Эксперимент E36 (Япония)**

В 2019 году были выделены  $SD Ke2\gamma$  события. Предварительный результат вероятности распада на  $3\sigma$  отличается от результата KLOE's. Проведен анализ данных по тесту мю-е универсальности. Получено, что основным физическим фоном являются радиационные распада мюона.

#### **Эксперимент NOVA**

В дальнем детекторе зарегистрировано 27 событий (ожидаемый фон 10 событий), от взаимодействия электронных антинейтрино, которые появились в пучке мюонных антинейтрино из-за осцилляций. Впервые такие переходы были зарегистрированы с достоверностью 4.4 стандартных отклонения. Также было зарегистрировано 102 события от взаимодействия мюонных антинейтрино. В результате фитирования спектров мюонных

и электронных событий, как функций параметров, угла смешивания  $\theta_{23}$  и фазы нарушения CP-инвариантности  $\delta_{CP}$  получены  $1\sigma$  доверительные интервалы для значений этих параметров при нормальной иерархии масс нейтрино. Данные предпочитают нормальную иерархию масс нейтрино с достоверностью  $2\sigma$ .

Эксперимент GERDA.

Представлен отчет о работе в течение 2019 года российских ученых из ИЯИ РАН в эксперименте GERDA-II, расположенного в подземной Национальной лаборатории Италии Гран-Сассо (LNGS INFN). Целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа Ge-76 ( $0\nu\beta\beta$  распада). Российские ученые участвовали в эксплуатации действующей установки GERDA-II. Произведена очистка отходов обогащенного германия, образовавшихся при изготовлении германиевых детекторов на установке в лаборатории Гран-Сассо. Технология очистки была разработана в России. Начата разработка первой очереди эксперимента LEGEND-200, который является продолжением эксперимента GERDA.

#### **6. Задача «Исследования по физике фотоядерных взаимодействий и по ядерной физике промежуточных и высоких энергий»**

Объект исследования – фотоядерные реакции,

Цель исследований – изучение свойств ядер, фотоядерных взаимодействий и физики промежуточных энергий

Методы исследований – анализ и обработка накопленных данных

В 2019 г. в эксперименте A2 на ускорителе МАМИ (Германия) с участием ученых из ИЯИ РАН выполнены прецизионные (точность лучше 3%) измерения спиновой асимметрии фоторасщепления дейтрона в районе обнаруженного ранее в нуклон-нуклонном рассеянии шестикваркового состояния дейтрона  $d^*(2380)$ . Анализ данных указывает на преимущественное возбуждение  $d^*(2380)$  посредством M3 перехода, что свидетельствует о его малой квадрупольной деформации.

В 2019 г. на канале РАДЭКС линейного ускорителя ИЯИ РАН исследована реакция  $n + 2H \rightarrow n + n + p$  при энергии нейтронов 60 МэВ. Для определения энергии виртуального  $np$ -состояния  $E_{np}$  и связанной с ней величины длины рассеяния  $a_{np}$  проведен кинематически полный эксперимент. Для определения энергии виртуального  $np$ -уровня  $E_{np}$  (длины рассеяния  $a_{np}$ ) экспериментальная зависимость выхода реакции  $nd$ -развала

сравнивается с результатами моделирования, зависящими от  $E_{np}$ . Было получено значение  $a_{np} = -16.3 \pm 0.5$  Фм,

### **7. Задача «Фундаментальные и прикладные исследований в области нейтронной физики».**

Объектом исследования являются взаимодействия нейтронов с ядрами и свойства нейтрона

Цель работы – физика трансмутации ядерных материалов, исследование нейтронных реакций

В 2019 г. в ИЯИ РАН собрана и подготовлена к испытаниям новая мишень нейтронного источника с бериллиевыми отражателями. Дано сравнение и показаны основные отличия условий трансмутации минорных актиноидов в ADS, в термоядерном источнике нейтронов и быстрых реакторах. Продолжены работы по увеличению среднего времени жизни мишеней ADS и размножающихся нейтронных источников с использованием вращающихся мишеней. Создана математическая модель нейтронного спектрометра по времени замедления в свинце с регулируемыми параметрами функции отклика. Разработаны и изготовлены вакуумные элементы для детектора установки «Горизонт».

### **8. Задача «Новые результаты по физике элементарных частиц, ядерной физики и нейтринной астрофизике».**

Объектом исследования являются редкие явления такие как вспышки Сверхновых звезд в нашей Галактике.

Целью работы является регистрация нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в нашей Галактике и установление параметров моделей коллапсов звезд, а также изучение фоновых эффектов влияющих на сигналы подземных детекторов.

По данным работы нейтринного телескопа LVD за 27 лет работы, получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 11.7 г. на 90% уровне достоверности. По данным детектора АСД получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 18.2 г. на 90% уровне достоверности. Также проводился поиск совпадающих одиночных импульсов в детекторах БПСТ и LVD во время регистрации гравитационного сигнала от источника GW170817.

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2019 году (с 01.01 по 29.12) составило 8265 часов (94.9% календарного времени).

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2019 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7817 часа, было зарегистрировано 53 мюонных нейтрино из нижней полусферы

Также осуществлялся поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA и измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

Объектом исследования является анализ данных установок Ковер-2 и TAIGA.

Цель работы — разработать новые численные методы анализа данных и применить их для определения первичного состава космических лучей.

Получены первые результаты поиска первичных фотонов с энергиями более 100 ТэВ, направленно связанных с высокоэнергетическими нейтринными событиями IceCube, по данным установки Ковер-2, полученным за период 1999–2011 (3080 дней работы) и 2018–2019 (342 дней работы). Результаты включают в себя верхние пределы с уровнем достоверности 95% для потоков фотонов PeV от суммированных направлений высокоэнергетических событий нейтрино IceCube. Также были представлены верхние пределы на потоки фотонов из набора из четырех предварительно определенных точечных источников: Crab, Cyg X-3, Mrk 421 и Mrk 501. Один из источников, Mrk 421, демонстрирует слабое превышение сигнала над фоном в обоих независимых наборах данных установки; его происхождение еще предстоит выяснить. Крабовидная туманность тоже демонстрирует незначительное превышение сигнала над фоном при переходе ко второму набору данных и будет подвергнута мониторингу.

ИЯИ РАН участвовал в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	<b>Ошибка! Залкадка не определена.</b>
РЕФЕРАТ .....	2
СОДЕРЖАНИЕ.....	12
ВВЕДЕНИЕ.....	14
1. Развитие Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, введение в эксплуатацию на оз. Байкал очередного кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Подготовка к экспедициям на озере Байкал. (Задача №1).....	31
1.1. Методология выполнения исследования .....	31
1.2. Результаты исследований.....	32
1.3. Применение и значимость результатов исследования .....	41
2. Развитие экспериментальных комплексов ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН, Троицк-ню-масс и ускорительный комплекс (Задача №2).....	41
2.1. Первый этап эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) – пример развития экспериментального комплекса БНО ИЯИ РАН БНО ИЯИ РАН .....	41
2.2. Троицк-ню-масс .....	44
2.3. Ускорительный комплекс ИЯИ РАН .....	44
3. Участие учёных ИЯИ РАН в международных экспериментах в международном центре CERN (Женева): эксперимент AEGIS, эксперимент NA64 (SPS CERN), эксперимент CMS, LHCb- эксперимент, эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0, эксперимент SHIP (CERN), детектор Baby-MINP, эксперимент ALICE (Задача №3) .....	45
3.1. Эксперимент AEGIS .....	45
3.2. Эксперимент NA64 (SPS CERN).....	49
3.3. Эксперимент CMS .....	52
3.4. LHCb- эксперимент.....	52
3.5. Эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0.....	53
3.6. Эксперимент SHIP (CERN) .....	55
3.7. Детектор Baby-MIND.....	56
3.8. Эксперимент ALICE .....	58
4. Работы по модернизации экспериментальных установок ЦЕРН, в работе которых принимают участие российские учёные (Задача №4) .....	62
4.1. Детектор - вето ANTI-0 .....	62
4.2. Эксперимент NA64 (SPS CERN).....	63
4.3. Эксперимент CMS .....	65

5. Участие сотрудников ИЯИ РАН в экспериментах: эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино, эксперимент E36 (Япония), эксперимент NOVA, эксперимент GERDA (Задача №5) .....	67
5.1. Эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино.....	67
5.2. Эксперимент E36 (Япония) .....	67
5.3. Эксперимент NOVA .....	68
5.4. Эксперимент GERDA .....	68
6. Исследования по физике фотоядерных взаимодействий и по ядерной физике промежуточных и высоких энергий (Задача №6).....	69
6.1. Методология выполнения исследования .....	69
6.2. Результаты исследований.....	70
7. Фундаментальные и прикладные исследований в области нейтронной физики (Задача № 7) .....	70
8. Новые результаты по физике элементарных частиц, ядерной физики и нейтринной астрофизике (Задача № 8).....	70
8.1. Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа.....	70
8.2. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD.....	73
8.3. Поиск совпадений в детекторах БПСТ и LVD во время гравитационного сигнала от источника GW170817 .....	81
8.4. Поиск точечных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок КОВЕР-2 и TAIGA. Измерение потока (или получение ограничения на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.....	83
9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	86
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	89
ПУБЛИКАЦИИ.....	91

## ВВЕДЕНИЕ

### **1. Задача «Развитие Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, введение в эксплуатацию на оз. Байкал очередного кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Подготовка к экспедициям на озере Байкал».**

В 2019 году были продолжены работы по развитию научного экспериментального комплекса и инфраструктуры Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) с целью создания на его базе нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба (проект Baikal-GVD).

В настоящее время в мире существуют три действующих аналогичных по принципам устройства и размещения в природных средах крупномасштабных нейтринных телескопов: IceCube на Южном полюсе, ANTARES в Средиземном море и Baikal-GVD в озере Байкал, и проект KM3Net в Средиземном море, который находится в начальной стадии своего развития. Проект KM3Net является общеевропейским проектом создания нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба. Детектор будет состоять из шести независимых блоков, которые планируется развернуть в трех географических районах у берегов Франции, Италии и Греции (по два блока в каждом). Каждый блок представляет собой автономный глубоководный черенковский детектор с эффективным объемом порядка 0,5 км<sup>3</sup>, содержащий примерно 2000 фотодетекторов (оптических модулей), размещенных на 115 гирляндах. В настоящее время во Франции и в Италии установлены 4 экспериментальные гирлянды, ведутся их натурные испытания и доработка технологий установки гирлянд будущего телескопа. доработка технологий установки гирлянд будущего телескопа. Первоначально объявленной целью проекта являлось развертывание к 2020 году двух блоков с общим эффективным объемом порядка одного кубического километра и шести блоков с общим объемом порядка 3 км<sup>3</sup> к 2015 году, но в силу возникших технических трудностей в ходе реализации проекта эти сроки сдвигаются на 3-4 года относительно первоначальных планов.

Наиболее интенсивно развивался проект AMANDA (США, Швеция, Германия), а ныне IceCube, который предусматривал создание черенковского детектора на Южном полюсе путем вмораживания регистрирующих модулей в ледовый массив Антарктиды. Завершение работ по созданию на Южном полюсе телескопа IceCube и официальная инаугурация проекта произошли 27 апреля 2011 года.

Ввод в строй в 2011 году детектора IceCube на Южном полюсе позволил, в ряде задач, поднять на один-два порядка чувствительность экспериментальных исследований.

На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) способного(ых) дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(ов) вести исследования природных потоков нейтрино на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube. Дальше всех в решении этой задачи продвинулась сейчас Байкальская коллаборация, которая в 2019 г. развернула в озере Байкал и запустила в режим набора данных 5 кластеров нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD.

## **2. Задача «Развитие экспериментальных комплексов ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН, Троицк-ню-масс и ускорительный комплекс»**

На уникальной научной установке БНО ИЯИ РАН Галлий-германиевый нейтринный телескоп (УНУ ГГНТ) в 2019 году измерялась скорости захвата нейтрино от высокоинтенсивного искусственного источника нейтрино на галлиевой мишени двухзонной установки УНУ ГГНТ с целью поиска осцилляций электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях.

Поиск стерильных нейтрино одна из актуальных задач фундаментальной науки, стоящая в одном ряду с открытием нейтринных осцилляций, показавших существование массы нейтрино и новой физики за пределами Стандартной Модели (СМ). Существующая СМ с тремя активными нейтрино не согласуется с полученными в ряде предыдущих нейтринных экспериментов (ускорительных, галлиевых с интенсивными искусственными источниками, реакторных с расстояниями до 100 м) результатами, для объяснения которых требуется введение четвертого нестандартного стерильного нейтрино с масштабом массы порядка 1 эВ. В работе [7] представлен ряд экспериментов по поиску стерильных нейтрино с использованием атомных реакторов, ускорителей, а также высокоинтенсивных искусственных источников нейтрино и антинейтрино. В настоящее время идёт подготовка и реализация нескольких из них с различными источниками нейтрино. В новых нейтринных экспериментах получены противоречивые результаты.

Использование компактных интенсивных искусственных источников предоставляет уникальную возможность исследования картины осцилляций в стерильные состояния на очень коротких расстояниях с известным моноэнергетическим потоком нейтрино. С использованием высокоинтенсивного источника нейтрино  $^{51}\text{Cr}$  предложен Баксанский эксперимент по поиску на очень коротких расстояниях осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на двойной металлической Ga мишени (BEST) [7-11] на базе УНУ Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

На установке Троицк-ню-масс ИЯИ РАН в течение нескольких месяцев многократно проводились наполнения объема спектрометра с давления высокого вакуума до давления 2-3 мбар парами воды и газообразного водорода. В результате очистки достигнут уровень фона в спектрометре, который позволяет проводить дальнейшие измерения по поиску стерильных нейтрино в распаде трития.

Проведена большая работа по обработке набранных ранее данных с новым типом многоканальных кремниевых дрейфовых детекторов. Данная работа проводилась совместно с коллегами из института физики им. Макс Планка в Мюнхене в рамках имеющегося сотрудничества. Основная задача состояла в том, чтобы убедиться, что данный тип детектора существенно расширит диапазон и качество измерений в интервале масс стерильных нейтрино 1-8 кэВ.

На сильноточном линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН в 2019 г. проведено четыре сеанса, направленных на выполнение программ РАН, государственного задания, научной программы и иных обязательств Института. Обеспечено проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований. Общая продолжительность сеансов в 2019 году составила 1296 часов. Работы проводились на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПП, а также радиоизотопный комплекс и экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 49 МэВ до 267 МэВ. Успешная работа ускорителя стала возможной благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и работам по модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса, среди которых следует отметить модернизацию вакуумной системы и системы питания электромагнитного оборудования ускорителя.

**3. Задача «Участие учёных ИЯИ РАН в международных экспериментах в международном центре CERN (Женева): эксперимент AEGIS, эксперимент NA64 (SPS CERN), эксперимент CMS, LHCb- эксперимент, эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0, эксперимент SHIP (CERN), детектор Baby-MIND, эксперимент ALICE»**

**Эксперимент AEGIS**

Общая теория относительности рассматривает гравитацию как геометрическое свойство пространства – времени. Принцип эквивалентности в ОТО предполагает одинаковые гравитационные свойства материи и антиматерии. С обычным веществом принцип эквивалентности проверен с высокой точностью порядка  $10^{-14}$ . До настоящего времени не создано общепризнанной квантово-полевой теории гравитации. В квантовых теориях гравитационное взаимодействие вещество-антивещество может отличаться от взаимодействия вещество-вещество. Поэтому экспериментальное изучение принципа эквивалентности имеет важное значение для выбора соответствующего эксперимента варианта квантово-полевой теории гравитации.

Коллаборация AEGIS ставит целью измерение гравитационного ускорения атомов антиводорода в поле Земли с точностью порядка 1%. Антипротоны накапливаются в ловушке в магнитном поле 1 Тл. Импульсный позитронный пучок из позитронной установки транспортируется к мишени, находящейся в том же магнитном поле на расстоянии около 2 см от антипротонного сгустка. В мишени позитроны модерируются, и часть позитронов, захватывая в мишени электрон, образует атомы позитрония, которые эмитируются из мишени в вакуум. В высоковозбужденные ридберговские состояния атомы переводятся импульсным наносекундным лазерным излучением. Поток возбужденных атомов позитрония пересекает антипротонный сгусток. В области пересечения происходит образование атомов антиводорода в реакции перезарядки  $Ps^* + \bar{p} \rightarrow \bar{H}^* + e^-$ , важным свойством которой является большая величина сечения процесса, которое пропорционально четвертой степени главного квантового числа возбужденного состояния позитрония. Также важно, что температура атомов антиводорода, образующихся в результате реакции перезарядки, близка к температуре холодных антипротонов. Существенно, что в высоковозбужденном состоянии атомы имеют большую величину электрического дипольного момента, что позволяет применить ускорение атомов в градиентном электрическом поле.

В 2019 г. основные усилия участников группы ИЯИ РАН и всего коллектива были направлены на улучшение эффективности метода получения возбужденных атомов позитрония, что является критическим для всего эксперимента. Важным этапом работы является повышение выхода атомов позитрония на мишени в поле 1 Тл, поэтому основные усилия коллаборации AEGIS были сосредоточены на продолжении проверки перезарядного метода получения атомов антиводорода. Количество атомов антиводорода, образующихся при перезарядке антипротонов и атомов позитрония в высоковозбужденных ридберговских состояниях, пропорционально плотности

антипротонов и атомов позитрония в месте пересечения столкновения частиц и, таким образом, интенсивности первоначального пучка позитронов, генерируемых в позитронной аппаратуре.

### **Эксперимент NA64 (SPS CERN)**

В 2019 г. в эксперименте NA64 был проведен комбинированный анализ данных, набранных в течение 2016-2018 гг., а также оценка соответствующего уровня фона для поиска частиц темной материи с массами порядка одного гигаэлектронвольта, рождающихся в распадах векторных ( $A'$ ) калибровочных бозонов (скрытых фотонов) в событиях с большой недостающей энергией в конечном состоянии на основе набранной статистики. В результате анализа сигнальных и контрольных областей существенных превышений над уровнем фона от оценок вкладов процессов  $SM$  не обнаружено.

В результате получены уникальные, наиболее строгие на данный момент, ограничения на параметр смешивания  $A'$  с фотоном  $\epsilon$  как функцию массы  $A$ .

В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для эффективной регистрации частиц в сеансах 2021 г.

В 2019 г. сотрудниками ИЯИ РАН в рамках программ эксперимента NA64 был продолжен анализ данных по поиску  $X$ -бозона массой 17 МэВ, распад которого по каналу  $X \rightarrow e^+e^-$  объясняет т.н.  ${}^8\text{Be}$ -аномалию, а также по поиску легкой темной материи в диапазоне масс 1...100 МэВ, распадающуюся по видимой моде (т.е. на частицы  $SM$ ). Существование  $X$ -бозона является возможным объяснением не только аномального избытка пар  $e^+e^-$  в распадах возбужденных ядер  ${}^8\text{Be}$ , обнаруженного экспериментом АТОМКІ в 2016 г., но и недавнего аналогичного избытка пар  $e^+e^-$  в распадах возбужденных ядер  ${}^4\text{He}$ . Поиск гипотетического бозона  $X$  с массой около 17 МэВ в эксперименте NA64 в рамках группы анализа NA64 на основе данных, полученных на полной статистике сеансов 2016-2018 гг., находится в стадии завершения.

Проведены оценки всех значимых для поиска источников фона и систематических неопределённостей. В результате анализа сигнальных и контрольных областей существенных превышений над фоном от оценок вкладов  $SM$ -процессов не обнаружено и получены уникальные, наиболее строгие на данный момент, ограничения на параметр смешивания  $X$ -бозона с фотоном как функции массы  $X$ .

## Эксперимент CMS (CERN)

Были обработаны экспериментальные данные в количестве  $35,9 \text{ fb}^{-1}$  по триггеру двойной  $t\bar{t}$  с порогом 32 ГэВ. экспериментальных данных. В электрон-мюонном канале экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора, которые хорошо согласуются с предсказаниями СМ. В электронном и мюонном каналах зарегистрирован пик от распада  $Z$ -бозона. Наблюдается хорошее согласие с моделированием методом Монте-Карло. Для моделирования фона использовались генераторы AMC@NLO ( $t\bar{t}$  +jets), madgraph ( $W$ +jets), pythia8 ( $WW$ ,  $WZ$ ,  $ZZ$ ), powheg ( $tW$ ), а для сигнала pythia8 (LRSM).

Распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов на предварительной стадии отбора хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Такое согласие с наблюдаемыми данными говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях.

В результате анализа данных, полученных в течение 2018 г. и соответствующих полной светимости БАК  $35,9 \text{ fb}^{-1}$ , были получены ограничения на массу тяжелого нейтрино в зависимости от массы  $W_R$ . Сделано сообщение на совещании CMS о поиске правовинтового  $W$ -бозона и тяжёлого нейтрино, связанного с третьим поколением лептонов (конечное состояние содержит два тау-лептона). Проведён сравнительный анализ этого поиска и соответствующих поисков в других каналах (две струи, два электрона + струи, два мюона + струи).

## Эксперимент LHCb (CERN)

В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^+ p$ , в которых в спектре инвариантной массы ( $J/\psi, p$ ) пар были обнаружены резонансные структуры  $P_c(4380)^+$  и  $P_c(4450)^+$ , объясненные минимальным набором из пяти кварков  $c\bar{c}uud$ , это так называемый очарованный пентакварк. Большая статистика и точность метода позволили подтвердить на уровне 5.4 стандартных отклонения структуру  $P_c(4450)^+$ , как два новых близких состояния  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$ . Кроме того, найдено новое состояние  $P_c(4312)^+$ ,

на уровне достоверности 7.3 стандартных отклонения. Минимальный кварковый состав новых состояний  $c\bar{c}uud$  возможно указывает на молекулярное строение связей типа мезон + барион. Дальнейшее изучение требуется для определения деталей обнаруженной структуры.

### **Эксперимент NA62 (ЦЕРН)**

В течение 2019 года продолжалась обработка ранее набранных данных в сеансах 2016 - 2018 гг. . Были проведены работы по анализу данных каонного эксперимента NA62 с целью поиска редкого распада каона на пион и два нейтрино ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\nu$ ). В одной из сигнальных областей наблюдаются 2 события. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 2.16, а фон – на уровне  $1.5 \pm 0.3$ .

Суммарный анализ данных 2016-2017 гг. приводит к следующему результату:  $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\nu) < 1.62 \times 10^{-10}$  на 95% уровне достоверности или  $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\nu) = (0.47^{+0.72}_{-0.47}) \times 10^{-10}$ . Анализ данных 2018 г. продолжается.

В рамках того же каонного эксперимента NA62 был проведён поиск и других, экзотических, мод распада, чувствительных к новой физике за рамками Стандартной Модели и к CP и T нечётным эффектам.

Было проведено исследование по поиску тяжёлых нейтральных лептонов, причём не только непосредственно в каонных экспериментах, но и в ближнем детекторе нейтринного эксперимента T2K, в котором искались тяжёлые нейтрино из распадов каонов, образованных при взаимодействии протонов исходного пучка с графитовой мишенью.

В рамках каонного эксперимента NA62 был проведён поиск невидимых «тёмных» фотонов в распадах нейтральных пионов, а также аксионо-подобных частиц. Эти исследования привели к получению верхних границ констант взаимодействия, значения которых не хуже полученных в других экспериментах.

Важный результат 2019 г.– завершение производства компонентов нового детектора – вето-годоскопа ANTI-0 и успешные испытания готовых компонентов. Новый вето-детектор ANTI-0, предназначен для регистрации мюонного гало пучка в эксперименте NA62.

### **Эксперимент SHiP (CERN)**

В 2019 г. сотрудниками ИЯИ РАН были продолжены работы в рамках подготовки эксперимента SHiP (Search for Hidden Particles) на пучке протонов ускорителя SPS (Super

Proton Synchrotron) Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN), начало которого планируется на 2026-2027 гг.

Сотрудники ИЯИ РАН принимают активное участие в НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для двух систем эксперимента SHiP: для временного детектора и для мюонной системы, основная задача которых заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи.

Предложенные ИЯИ РАН сцинтилляционные счётчики, изготовленные методом экструзии на производстве ООО УНИПЛАСТ, г. Владимир, сравнивались с пластинами, изготовленные методом литья фирмой EJEN. Счётчики EJEN показали лучшее временное разрешение и были избраны в качестве основы для временного детектора. С участием сотрудников ИЯИ РАН были изготовлены 120 счётчиков для прототипа временного детектора, которые в 2020 г. будут протестированы с помощью космических лучей. Следует отметить, что данный прототип временного детектора SHiP будет использован в качестве времяпролётного детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (ГиперКамиоканде).

Сотрудники ИЯИ РАН совместно с учеными из Италии разрабатывают активные модули мюонной системы эксперимента SHiP. Одним из вариантов пластин для модулей мюонной системы являются предложенные ИЯИ РАН плитки общей площадью около 200 кв. см, изготовленные в ООО УНИПЛАСТ, г. Владимир. Каждая из этих плиток будет считываться четырьмя фотодиодами SiPM без использования спектросмещающих оптических волокон. Планируется, что эти плитки будут протестированы во Фраскатти на пучке ВТФ в 2020 г.

### **Эксперимент Baby-MIND (ЦЕРН)**

Магнитный детектор Baby-MIND, разработанный и созданный при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН, предназначен для измерения треков заряженных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с веществом углеродно-водной мишени детектора WAGASCI, что позволит существенно уменьшить систематические погрешности, связанные с неопределенностью значений сечений взаимодействия (анти)нейтрино с ядрами кислорода (в составе воды) и углерода (в составе пластического сцинтиллятора). Этот детектор в настоящее время является частью

ближнего детектора нейтринного осцилляционного эксперимента T2K на протонном ускорителе J-PARC, Япония, а в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

Детектор Baby-MIND был смонтирован в полном объеме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента T2K в 2019 г. Был начат набор статистики с пучком мюонных нейтрино и антинейтрино под углом 1.5 градуса относительно направления протонного пучка. В течение октября-декабря 2019 г. была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени около  $3 \times 10^{20}$  POT. Мощность протонного пучка составила около 500 кВт. Детектор работал с магнитным полем 1.5 Тесла, что позволило надежно идентифицировать заряд частиц, рожденных при взаимодействии нейтрино в водном детекторе WAGASCI и в детекторе Baby-MIND. Начат анализ данных взаимодействия нейтрино с водородом, водой, углеродом при энергии около 1 ГэВ. Также будут получены данные по сечениям взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядрами железа. Детектор функционирует надежно. Эффективность работы детектора Baby-MIND во время набора статистики нейтринных событий при включенном пучке составила более 95%.

В рамках Нейтринной Платформы ЦЕРН и проекта Baby-MIND группой ИЯИ РАН разработан детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков объемом  $10 \times 10 \times 10$  мм<sup>3</sup> с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон, и имеет размеры: длина 200 см, ширина 200 см, высота 60 см. Сцинтилляционные сигналы регистрируются микропиксельными лавинными фотодиодами Hamamatsu MPPC S13360-1325CS. Всего детектор состоит примерно из 2 миллионов индивидуальных сцинтилляционных «кубиков» и имеет около 60 тысяч лавинных фотодиодов и каналов электроники. Через каждый кубик проходит 3 волокна по трем направлениям (x, y, z). Тесты с космическими мюонами, а также тесты на пучке в ЦЕРНе прототипа детектора, показали, что всем требованиям эксперимента удовлетворяет электроника, базирующаяся на чипах CITIROC, которые и были приняты в качестве основного элемента. Такая геометрия детектора обеспечивает 3D информацию о заряженных частицах, рождающихся в вершине нейтринного взаимодействия. Было получено временное разрешение лучше 1 нс, порог регистрации протонов 200 МэВ/с. После анализа полученных данных в качестве фотоприемника был выбран Hamamatsu MPPC S13360-1325PE, обладающей активной поверхностью 1.3 мм<sup>2</sup> и имеющий 2668

пикселей, каждый размером  $25 \times 25$  микрон. Этот прибор имеет широкий динамический диапазон, эффективность регистрации фотонов около 30% и низкий cross-talk. Также определена и проработана процедура сборки детектора, включая спектросмещающие волокна, фотоприемники и электронику. Была разработана система калибровки и контроля детектора на основе оптических волокон и системы светодиодов.

В течение 2019 года была полностью разработана и отлажена процедура массового изготовления методом литья под давлением сцинтилляционных кубиков размером  $10 \times 10 \times 10$  мм<sup>3</sup> с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон. Была отлажена и запущена в работу пресс-форма с 10-ю камерами в ООО Унипласт (г. Владимир). В 2019 году в ИЯИ было собрано 25 плоскостей детектора из 900 тысяч кубиков, что составляет около 45% общего объема. Также был создан полномасштабный прототип 3D детектора размером  $192 \times 15 \times 56$  см<sup>3</sup>, который состоит из 160 тысяч кубиков. Были выполнены механические испытания, исследован возможный прогиб под действием различных нагрузок, изучены эффекты деформаций, влияющие на параметры спектросмещающих волокон, протестирован механизм сборки детектора и проведены прецизионные измерения полученных параметров.

В декабре 2019 года был проведен сеанс на пучке нейтронов в Лос-Аламосе (США), в ходе которого были измерены параметры прототипа детектора SFGD к нейтронам в области энергий 1 ГэВ. Получена предварительная эффективность регистрации нейтронов с энергиями несколько сотен МэВ около 50%. Анализ всех накопленных данных будет проведен в следующем году.

### **Эксперимент ALICE (ЦЕРН)**

В 2019 году была продолжена масштабная модернизация ALICE, которая была начата в 2016 году. В ходе модернизации разработаны несколько новых детекторных систем ALICE, включая новый триггерный детектор FIT (Fast Interaction Trigger). На FIT будут возложены следующие физические задачи: измерение точного времени взаимодействия для идентификации заряженных частиц в промежуточном диапазоне поперечного импульса от 0.5 ГэВ/с до 4 ГэВ/с по время-пролетному методу, измерение центральности взаимодействия, множественности рожденных частиц и угла плоскости реакции. С помощью FIT будет измеряться светимость коллайдера в режиме он-лайн в ходе третьего и четвертого сеансов его работы в 2021–2029 годах. В июле-декабре 2019 г. сотрудниками лаборатории релятивистской ядерной физики ИЯИ РАН с успехом и точно в срок завершена

разработка, сборка и тестирование северного плеча детектора FIT-T0 обновлённого эксперимента ALICE.

Северное плечо детектора состоит из сборки черенковских модулей, каждый из которых использует кварцевые радиаторы в качестве рабочего вещества и фотоумножители на микроканальных пластинах Planacon XP85002/FIT-Q. Эти фотоумножители специально разработаны для применения в детекторе FIT с использованием разработанных в ИЯИ электронных плат, которые встраиваются внутрь ФЭУ. На рис. показаны полностью собранные сотрудниками ИЯИ обе половины северного плеча детектора FIT-T0.

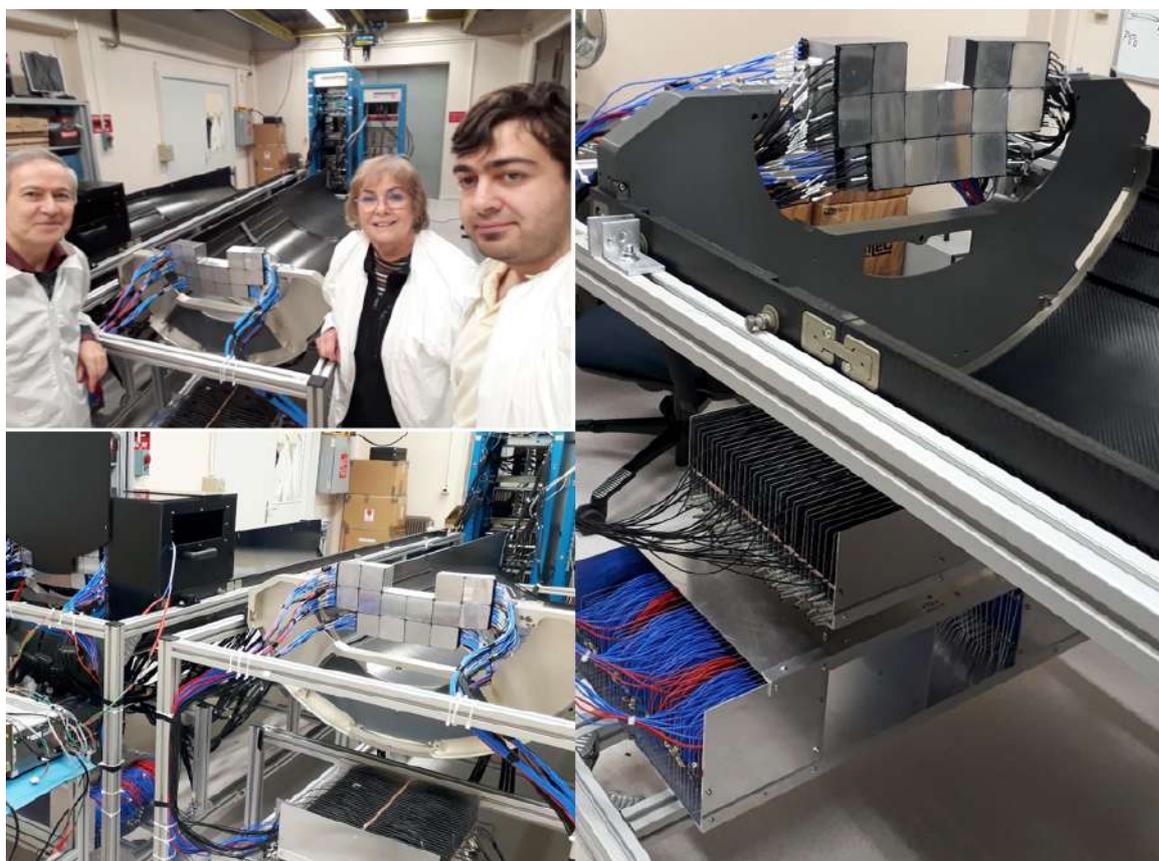


Рисунок. Собранные северное плечо детектора FIT-T0

Была работа по изучению образования легких ядер и антиядер в столкновениях протонов и ядер на БАК. Установка АЛИСА обладает уникальными возможностями идентификации вторичных частиц и точного определения времени взаимодействия, в том числе благодаря использованию T0 детектора, созданного ИЯИ РАН в коллаборации с МИФИ и другими институтами. Новая работа коллаборации посвящена изучению механизма образования

дейтронов и антидейтронов в протон-протонных столкновениях при энергии в системе центра масс 7 ТэВ.

#### **4. Задача «Работы по модернизации экспериментальных установок ЦЕРН, в работе которых принимают участие российские учёные»**

Важный результат 2019 г. по модернизации установок в ЦЕРН - завершение производства компонентов нового детектора - вето-годоскопа ANTI-0 и успешные испытания готовых компонентов. Новый вето-детектор ANTI-0, предназначен для регистрации мюонного гало пучка в эксперименте NA62.

Был разработан дополнительный сцинтилляционный годоскоп с хорошим временным разрешением. Базовый элемент годоскопа ANTI-0 состоит из сцинтиллятора размером 124x124x10 мм<sup>3</sup>, к которому приклеены два световода из плексигласа. В специальные щели в световодах вставляются силиконовые фотоумножители - SiPM площадью 6x6 мм<sup>2</sup> которые на оптической замазке прижимаются к световоду пластиковыми винтами.

В 2019 г. группой ИЯИ РАН проводились работы по модернизации электромагнитного калориметра эксперимента CMS в рамках Фазы II. Были проведены испытания новых образцов электронных устройств для системы сбора данных при работе калориметра. Были также проведены работы по подготовке экспериментального оборудования для испытаний и калибровки модернизированных модулей электромагнитного калориметра CMS.

Основные результаты проделанной работы по подготовке оборудования заключаются в следующем: проведена полномасштабная инспекция подвижной платформы для размещения модуля электромагнитного калориметра при проведении пучковых испытаний, а также подготовлено предложение по модернизации системы управления платформой.

Подготовлен модуль для размещения пучковых счётчиков, а также технический проект и конструкторская документация (в сотрудничестве с ИФВЭ) для новой системы пучковых счётчиков на основе сцинтилляционных детекторов. Разработана методика изготовления светопроводов из органического стекла для данной системы, изготовлены первые экспериментальные образцы.

Для центральной части адронного калориметра установки CMS были собраны модули считывания и калибровочные модули новой считывающей и регистрирующей электроники на основе КФЭУ.

В рамках контроля качества собранных модулей были проведены многочисленные тестирования: проверка оптических подключений, проверка электрических подключений, тестирование работы элемента Пельтье для поддержания заданной температуры, работы системы впрыска сухого воздуха и датчика влажности КФЭУ, работы плат контроля напряжения смещения КФЭУ, плат считывания сигнала, наличие замыканий и неправильного подключения плат монтажа КФЭУ, гибких кабелей, плат управления КФЭУ и т. д.

После контроля качества собранные блоки и калибровочные модули отправлялись на стенд долговременного тестирования, состоящий из 12 боксов считывания, где каждый блок работал в течение минимум нескольких недель. Бокс считывания состоит из четырех блоков считывания, одного калибровочного модуля, двух контрольных модулей, а также задней платы, платы ввода низкого питания и платы ввода напряжения смещения. Так как в центральной части адронного калориметра 36 боксов считывания, а в стенде долговременного тестирования только 12, все компоненты были разбиты на три группы. Ежедневно проводилась проверка на предмет наличия нештатной работы или отказов элементов. Также проводилась предварительная настройка положения пьедесталов чипов QIE и коэффициентов усиления КФЭУ с помощью света низкой интенсивности от светодиодов в калибровочных модулях. Также проверялась работа блоков считывания и калибровочных модулей при работе светодиодов на высокой интенсивности и при подключении УФ-света от лазера в специальные входы на калибровочном модуле.

В процессе начальной проверки блоков считывания после их сборки обнаружилось, что некоторые гибкие кабели, платы монтирования КФЭУ и платы управления КФЭУ имеют дефекты: разрывы линий или, наоборот, замыкания. Все дефектные компоненты были заменены на полноценно функционирующие.

## **5. Задача «Участие сотрудников ИЯИ РАН в экспериментах: эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино, эксперимент E36 (Япония), эксперимент NOVA, эксперимент GERDA»**

Целью эксперимента ОКА является исследование распадов каонов на 70 ГэВном протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино. Главными задачами являются поиск редких процессов и возможных проявлений новой физики за рамками Стандартной модели в кварковом секторе. Эксперимент E36 (Япония) ставит своей целью прецизионный тест мюонной-электронной универсальности в распадах положительных каонов. Основные задачи эксперимента с длинной базой NOVA (Фермилаб), в котором принимают участие сотрудники ИЯИ РАН, включают в себя исследование осцилляционных свойств нейтрино, прецизионное измерений осцилляционных параметров, поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели, определение иерархии масс нейтрино и поиск стерильных нейтрино и нестандартных нейтринных взаимодействий. База эксперимента 810 км и смещенный от оси нейтринный пучок позволяют получить в эксперименте хорошую чувствительность к иерархии масс нейтрино. Первые результаты указывают на нормальную иерархию. В настоящее время проводится набор статистики с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино.

Целью эксперимента GERDA является поиск безнейтринного двойного бета распада изотопа Ge-76 ( $0\nu\beta\beta$  распада). GERDA оперирует с открытыми германиевыми детекторами высокой чистоты из обогащенного Ge-76 (HPGe), погруженными в жидкий аргон. С 2010 г. по 2013 г. проводилась первая фаза эксперимента (GERDA Phase I), в результате которой установлены новые пределы на время жизни безнейтринного двойного бета распада Ge-76 ( $> 2.1 \times 10^{25}$  лет), а также для двухнейтринной и майоронной мод распада и переходов на возбужденные уровни.

В 2014-2015 годах проведены работы по подготовке ко второй фазе проекта. В GERDA Phase II масса детекторов увеличена в 2 раза. Кроме того, достигнуто 10-кратное снижение фона до рекордного значения  $10^{-3}$  событий / (кэВ кг год). Это стало возможным

благодаря отбору полезных событий по форме импульса детекторов и за счет антисовпадений со сцинтилляциями в жидком аргоне.

Набор физических данных в GERDA-II начался в декабре 2015 г. В июне 2016 на совещании коллаборации были открыты данные за первые 5 месяцев работы установки: ни одного события  $0\nu\beta\beta$  распада обнаружено не было. Установлен новый предел на период полураспада Ge-76 по данному каналу ( $T_{1/2} > 5.3 \times 10^{25}$  лет). Набор данных будет продолжаться до достижения статистики в 100 кг·лет (~2019 г.). К тому моменту чувствительность эксперимента превысит  $T_{1/2} \sim 10^{26}$  лет.

Наиболее важный шаг в деле поиска  $0\nu\beta\beta$  распада сделан в 2017 году в эксперименте GERDA путем достижения наиболее низкого уровня радиоактивного фона в сравнении со всеми конкурирующими проектами. Таким образом, GERDA является первым в мире «бесфоновым» экспериментом по поиску данного процесса. Статья, посвященная этому результату, опубликована в журнале Nature 6 апреля 2017 года (doi:10.138/nature21717).

Одновременно проводится разработка нового крупномасштабного германиевого (до 1 тонны Ge-76) эксперимента LEGEND, в котором также, как и в GERDA, предусмотрено две фазы. Первая из них (LEGEND-200) с 200 кг детекторов из обогащенного Ge-76 будет проводиться на базе модифицированной установки GERDA. В коллаборацию GERDA входит более 100 ученых из 17 научных центров шести стран.

## **6. Задача «Исследования по физики фотоядерных взаимодействий и по ядерной физики промежуточных и высоких энергий»**

Исследование фотоядерных взаимодействий и в области ядерной физики промежуточных и высоких энергий являются актуальными задачами. ИЯИ РАН имеет большой опыт работы в этих областях. Лаборатория фотоядерных реакций ведет исследования в составе международных коллабораций на ускорителе МАМИ (Германия) по исследованию спиновой асимметрии фоторасщепления дейтрона и исследованию асимметрии фоторождения странных частиц вблизи порога с целью проверки предсказаний модели по рождению пентакварка в секторе тяжелых чармированных кварков.

При низких энергиях основные усилия направлены на решение фундаментальной проблемы - экспериментальное исследование нуклон-нуклонного и трехнуклонного взаимодействия. В исследованиях используются различные реакции с тремя нуклонами в конечном состоянии  $n+2H \rightarrow n+n+p$  и  $d+1H \rightarrow p+p+n$ . Реакции будут исследоваться при

различных энергиях налетающих частиц (нейтрона и дейтрона) и для различных видов взаимодействия двухнуклонной системы (nn, np, pp) и третьего нуклона. Такое многоплановое исследование позволит обеспечить исследование проявлений 3N-взаимодействия в малонуклонных реакциях и определить зависимость этого взаимодействия от энергии участвующих частиц. Получение статистически обеспеченных данных в реакциях  $nd \rightarrow pnp$  на нейтронном пучке канала РАДЭКС в ИЯИ РАН при энергии нейтронов 80-100 МэВ, и в реакции  $dp \rightarrow ppn$  при энергии первичных дейтронов 15 МэВ на циклотроне У-120 НИИЯФ МГУ.

В эксперименте АЛИСА проводится изучение исследования столкновений тяжелых ионов при ультррелятивистских энергиях. Основными целями исследований является физика сильно взаимодействующей материи при экстремально высокой плотности энергии. Существование кварк-глюонной плазмы и её свойств — это ключевой вопрос в квантовой хромодинамике, необходимый для объяснения конфайнмента и восстановления киральной симметрии. Эксперимент должен пролить свет на вопросы об организации материи, о механизмах, которые соединяют кварки и глюоны, о природе сильных взаимодействий, и о том, как в результате этих взаимодействий образуется большая часть массы обычного вещества. Эксперимент позволит объяснить структуру, происхождение и эволюцию барионной материи Вселенной, которая составляет основу вещества звёзд и планет. Также проводятся исследования редких процессов в столкновениях тяжелых ионов.

#### **7. Задача «Фундаментальные и прикладные исследований в области нейтронной физики»**

К задачам нейтронной физики относится развитие идеи и детализацию различных вариантов возможного места ADS в структуре ядерной энергетики в сравнении с другими направлениями – быстрыми реакторами и гибридными термоядерными реакторами. Получение более точных результатов по нейтронным реакциям в широком диапазоне энергий. Исследование процессов деления на спектрометре по времени замедления в свинце на нейтронном комплексе ИЯИ РАН.

#### **8. Задача «Новые результаты по физике элементарных частиц, ядерной физики и нейтринной астрофизике»**

Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа является актуальной проблемой.

В последнее время активно обсуждаются проекты Нового поколения (в частности, проект Нового баксанского нейтринного телескопа) по созданию больших сцинтилляционных жидкостных детекторов для регистрации нейтринных потоков от

различных природных источников, в том числе измерения солнечных нейтрино CNO цикла. Фундаментальной задачей для таких детекторов является измерение потоков геоантинейтрино от распадов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , содержащихся в земных недрах. Регистрация потоков этих частиц (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли. Потоки антинейтрино от  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  уже измерены (правда, с не очень высокой точностью, на уровне 25%). Особую важность экспериментального изучения потока геоантинейтрино (и возможно геонейтрино) от распадов  $^{40}\text{K}$  возникает в связи с предсказанием большого количества калия в составе Земли в модели «богатая водородом Земля».

В сцинтилляторах для исследования слабых нейтринных потоков очень важной характеристикой является радиационная чистота. В низкоэнергетической области (< 150-200 кэВ) основной вклад в фон вносит радиоактивный изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  (граничная энергия бета-спектра 156.48 кэВ). На БНО ИЯИ РАН создается малоформатная установка для измерения концентрации изотопа  $^{14}\text{C}$  в жидких углеводородах, которые являются основой для низкофоновых сцинтилляторов.

Другой актуальной задачей работой непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ.

Все астрономическое научное сообщество ждет коллапса сверхновой звезды, частота которых по современным наблюдениям в спиральных галактиках должна быть раз в ~30 лет. Со времени предыдущей вспышки Сверхновой в нашей галактике прошло уже более 300 лет, а SN1987A вспыхнула в Большом Магеллановом Облаке. Подземные установки АСД, БПСТ и LVD специально проектировались для регистрации нейтрино от вспышек сверхновых.

На уникальном комплексе экспериментальных установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в течение многих лет проводятся исследования в области физики космических лучей и нейтринной астрофизики. Для выполнения исследований установки комплекса в течение 2019 года поддерживались в работоспособном состоянии. Проводились работы по модернизации установок. Поддерживался режим непрерывного набора информации на установках комплекса и проводился мониторинг потоков частиц космического излучения.

Создан архив экспериментальных данных установок за 2019 год. По экспериментальным данным БПСТ проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, получено новое ограничение на частоту вспышек с коллапсом ядра

в Галактике. Проводилось изучение источников фона при поиске вспышек от взрывов сверхновых с коллапсом ядра.

Ещё одна актуальная проблема - поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA и измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

Одной из важной задачи физики космических лучей - поиск гамма излучения сверхвысоких энергий. Интерес к поиску фотонов с энергией свыше 100 ТэВ связан с обнаружением экспериментом IceCube нейтрино высоких энергий. В большинстве астрофизических моделях нейтрино высоких энергий образуются в распадах заряженных  $\pi$ -мезонов. Эти мезоны, в свою очередь, рождаются в адронных и фотоядерных процессах, которые всегда сопровождаются рождением нейтральных  $\pi_0$ . Последние сразу распадаются на пары фотонов, что обеспечивает сопутствующие потоки гамма-излучения, аналогичные потокам нейтрино. Такое многоканальное наблюдение как за астрофизическими нейтрино, так и за высокоэнергичного гамма излучения поможет подтвердить или опровергнуть различные модели источников космических лучей

ИЯИ РАН участвует в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

## **1. Развитие Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, введение в эксплуатацию на оз. Байкал очередного кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Подготовка к экспедициям на озере Байкал. (Задача №1)**

### **1.1. Методология выполнения исследования**

Работы в 2019 году выполнялись по отлаженной в предыдущие годы методологии, включающей исследования и разработки по улучшению характеристик глубоководной регистрирующей аппаратуры, повышению ее надежности, повышению производительности при изготовлении элементов телескопа, лабораторные испытания отдельных элементов и систем в сборе, комплектация и изготовление элементов и оборудования телескопа, подготовка инфраструктуры и специального оборудования для проведения монтажных работ с ледяного покрова озера Байкал, транспортировка элементов и оборудования к месту монтажа новых систем телескопа, развертывание ледового лагеря, предустановочные испытания элементов и систем телескопа, монтаж новых кластеров

телескопа, ремонт вышедших из строя элементов в ранее установленных кластерах, прокладка донных кабелей, запуск в эксплуатацию телескопа с увеличенным объемом.

## **1.2. Результаты исследований**

Запуск в эксплуатацию в 2015 году первого кластера Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD<sup>1</sup> открыл новый этап в создании нейтринного телескопа в озере Байкал с объемом порядка 1 кубического километра. Был закончен основной исследовательский этап разработки всех элементов телескопа и его монтажной единицы – кластера из 8 гирлянд, и открыт путь к планомерному расширению телескопа установкой от одного до двух кластеров в год. В период зимней экспедиции 2016 года детектирующий объем кластера был увеличен в полтора раза за счет развертывания 96 дополнительных оптических модулей (по 12 оптических модулей на каждой гирлянде). В период зимней экспедиции 2017 года на оз. Байкал был развернут второй кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD, в 2018 - третий кластер, а в 2019 были развернуты еще два кластера. Таким образом, в результате работ, выполненных за 2019 год, на оз. Байкал функционирует установка, содержащая в общей сложности 1440 оптических модулей с эффективным объемом порядка 0,25 км<sup>3</sup>, что составляет около 60% от эффективного объема IceCube в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино астрофизической природы. На рисунке 1 показан рост эффективного объема телескопа для регистрации ливней (каскадов) заряженных частиц, возникающих в результате взаимодействия нейтрино и вторичных мюонов с водной средой в области энергий 100 TeV – 10 PeV, черенковское свечение которых регистрируется телескопом. Зеленой и красной линиями обозначены эффективные объемы телескопов ANTARES и IceCube соответственно. Синей линией обозначен достигнутый уровень эффективного объема Baikal-GVD и прерывистой - планируемый уровень в последующие годы. Данные по создаваемому Европейским союзом нейтринному телескопу KM3NeT в Средиземном море не приводятся в связи с возникшими техническими сложностями в развертывании систем телескопа и отсутствия подтвержденных экспериментальных данных.



Рис. 1. Рост эффективного объема телескопа Baikal-GVD в результате установки новых кластеров

При ожидаемом ходе развития Байкальского проекта в течении ближайших трех лет, на нейтринном телескопе BAIKAL-GVD в конфигурации 2022 года можно будет ожидать регистрации не менее 6 - 8 нейтрино астрофизической природы в год, и он станет одним из двух мощнейших в мире инструментов их изучения.

Важнейшим преимуществом телескопа Baikal-GVD при сравнении с нейтринным телескопом IceCube является его высокое угловое разрешение при определении направления движения нейтрино, что обусловлено различием оптических свойств пресной воды и льда. В частности, для моды регистрации нейтрино, основанной на детектировании вторичных ливней, точность определения направления нейтрино в нейтринном телескопе Baikal-GVD составит 3-4 градуса, в сравнении с 10-15 градусами в IceCube. Это соответствует увеличению точности позиционирования локальных источников нейтрино более чем на порядок величины по сравнению с IceCube и открывает возможность для постановки и решения задач нейтринной астрономии с использованием ливневой моды детектирования нейтрино.

Монтаж новых систем телескопа производится с ледяного покрова озера Байкал во время зимних экспедиций с 15 февраля по 15 апреля ежегодно, начиная с 1993 года. Для этого в четырех километрах от берега в районе 106 км КБЖД разбивается Ледовый лагерь (рисунок 2), который оборудуется автономным электроснабжением, радиосвязью, лебедками и подсобными помещениями.



Рис. 2. Верхний (а), нижний (б)

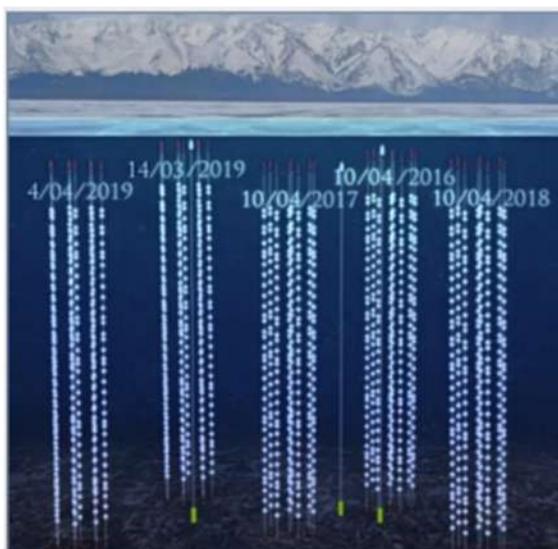


Рис. 3. Схема установки Baikal-GVD

Телескоп из 5 кластеров Baikal-GVD состоит из 40 гирлянд, на каждой из которых размещено 36 оптических модулей (ОМ) на расстоянии 15 м друг от друга по вертикали на глубине от 1275 до 750 м в 4 км от берега озера Байкал (Рисунок 3).

Кластеры телескопа содержат по 8 гирлянд одной центральной и семи периферийных, размещенных равномерно по окружности радиусом 60 м. Центры кластеров располагаются на расстоянии 300 м друг от друга.

В вертикальном положении гирлянды удерживаются специально

сконструированными якорями и системой пластиковых поплавков на глубине 20-30 м от поверхности. В верхней точке гирлянд под поплавками располагаются модули управления – центральный модуль гирлянды, соединенный кабелями с центральными модулями секций и центральным модулем кластера (рисунок 4), и служебный (коммутационный), через который распределяется электропитание и подключаются гидроакустические модемы. ОМ в гирлянде сгруппированы по секциям – 3 секции по 12 ОМ плюс управляющий (центральный) модуль секции, соединенный с каждым ОМ секции кабелем. В центральном модуле каждой секции (рисунок 5) осуществляется непрерывное сканирование аналоговых выходов двенадцати оптических модулей 12-битными АЦП с частотой дискретизации 200 МГц. При реализации триггерных условий формируются временные кадры каналов – преобразованные в цифровой код последовательные наборы амплитуд входных сигналов.



Рис. 4.



Рис. 5.

Каждый кадр содержит информацию о сигналах, поступивших с канала в течении 5 мкс. Использование методики сканирования при помощи быстрых АЦП существенно увеличивает информативность физических событий.

Каждый ОМ (рисунок 5) содержит внутри стеклянной сферы фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с полусферическим фотокатодом диаметром 10 дюймов и квантовой эффективностью около 35%. На рисунке показана подготовка оптического модуля к погружению. Гирлянды с ОМ сгруппированы в пять кластеров – 288 ОМ на кластер. Общее количество ОМ – 1440.



Рис. 6. Установка гирлянды



Рис. 7.

Каждый кластер представляет собой независимую глубоководную установку, управляемую центром кластера (рисунок 6), соединенную с береговым центром управления и сбора данных собственной электрооптической линией связи.

На каждой гирлянде также штатно размещаются до 5 гидроакустических модемов (рисунок 7), в частности на якорях гирлянд. Гидроакустические модемы формируют систему позиционирования, которая обеспечивает определение пространственных координат ОМ с точностью около 15 см. Система гидроакустического позиционирования разрабатывалась совместно с компанией EvoLogics (Германия). Точность определения координат подвижных модемов на гирляндах 3-4 мм, точность определения координат самих оптических модулей с помощью линейно-кусочной интерполяции меняющейся формы гирлянды - 10-20 см – в пределах допустимых значений. Но точность измерения координат самых верхних оптических модулей при больших смещениях, вызванных еще не изученными природными явлениями, может превышать 20 см. Чтобы устранить эту ошибку, в настоящее время исследуется магнитометрический способ, использующий внутримодульные инклинометры. Инклинометры в виде микрочипов устанавливаются на электронных платах оптических модулей и измеряют отклонения от вертикали с точностью до 1°. Комбинация гидроакустических и магнитометрических измерений позволяет достичь точности позиционирования оптических модулей не хуже 10 см при самых больших отклонениях гирлянд от вертикали. Данные основаны на результатах экспериментальных исследований на действующем телескопе.

Система калибровки телескопа состоит из трех уровней: калибровка оптических модулей на гирлянде с помощью встроенных светодиодов в каждом оптическом модуле на

расстоянии 15-30 м, калибровка ОМ между гирляндами с помощью светодиодных матриц, размещаемых в специальном модуле (стеклянной сфере) на расстояниях 60-100 м, и межкластерная калибровка с помощью лазера до 200-250 м. Для межкластерной калибровки был разработан уникальный источник света на основе полупроводникового импульсного лазера и с 2017 года он устанавливаются в состав телескопа – один на два кластера. Источник состоит из собственно лазерного источника света, глубоководного корпуса с герметичными разъемами, рассеивателя света и средств крепления корпуса к кабель-тросу. Источник имеет внутренний контроль параметров излучаемых импульсов и программное дистанционное управление амплитудой, временем и частотой излучаемых импульсов длительностью 1 наносекунда, обеспечивает калибровку оптических модулей на расстоянии до 200-300 м на длине волны 532 нм. Планируется устанавливать один лазерный источник на 2 кластера.

Переход в режим одновременной эксплуатации нескольких кластеров как единой установки потребовал синхронизация работы всех оптических модулей и систем телескопа с требуемой точностью. Для этого, в комплексе с триггерной системой каждого кластера, работает система межкластерной синхронизации на основе оптоволоконной глубоководной сети. Первая – Synchronization System of Baikal-GVD project (SSBG), специально разработанная НИИЯФ МГУ для данной установки; вторая система, имеющая более широкое применение, – White Rabbit Synchronization System (WR), разработанная в CERN. Результаты натурных испытаний совместной работы двух систем показали, что точность межкластерной синхронизации лучше 5 нс, что соответствует требуемой точности для телескопа Baikal-GVD, измерительная аппаратура которого работает с частотой временной дискретизации 200 МГц. Также для синхронизации с мировым временем применяется специализированный GPS-приемник сигналов точного времени. От этих систем в настоящее время идет накопление данных, осуществляется анализ их достоверности и оценка возможности использования в обработке физических событий.

Для повышения надежности и эффективности системы электропитания телескопа были испытаны и включены в режим постоянной работы новые промышленные источники питания. В настоящее время электропитание кластеров осуществляется компактными источниками с выходным напряжением до 500 Вольт и максимальным током до 10 Ампер. Помимо модернизации системы берегового электропитания установки, были проведены работы и по модернизации берегового центра сбора данных. Была создана необходимая инфраструктура для дублирования аппаратуры центра, которая позволит свести к минимуму потери времени экспозиции, связанные с ее возможным выходом из строя.



Рис. 8.

Установка и ввод в эксплуатацию двух кластеров в год потребовала, как дальнейшего развития методов подготовки, контроля и монтажа аппаратуры установки в оз. Байкал, так и модернизации ее вспомогательных систем: электропитания, калибровки и сбора данных. Была решена принципиальная задача оптимизации процедур тестирования регистрирующей аппаратуры в процессе развертывания установки на озере Байкал. Разработаны и созданы универсальные стенды для проверки работоспособности основных узлов установки (оптических модулей и модулей управления секциями и гирляндами) в "полевых" условиях после их монтажа на несущие конструкции телескопа. Режимы тестирования аппаратуры были максимально приближены к реальному режиму эксплуатации регистрирующей системы в условиях длительной экспозиции. Ввод в эксплуатацию нового тестового оборудования позволил свести к минимуму потери времени на этапе монтажа новых кластеров и ремонта вышедших из строя ранее установленных элементов.

Для обеспечения планируемого расширения телескопа были отработаны технологии и налажено серийное производство до 1000 оптических модулей в год на производственном участке ОИЯИ (г. Дубна) по совместно разработанной технологии (рисунок 8).

Производство до 100 электронных управляющих модулей налажено на производственном участке ЛНАВЭ (ИЯИ РАН). Введены в действие системы испытательных стендов в ОИЯИ (Дубна) и в ИЯИ РАН. Производство отдельных операций и блоков по совместно отработанным технологиям было передано сторонним организациям: изготовление и сборка крейтов с электроникой центральных модулей секций, изготовление магнитных экранов, сверление стеклянных сфер. Налажен монтаж до

300 соединительных глубоководных кабелей с глубоководными разъемами в НИИПФ ИГУ, оборудования для ведения ледовых работ, прокладки донных кабелей и крепежных рам для глубоководных модулей в НН ГТУ (Нижний Новгород). Были налажены связи и графики поставок уникальных комплектующих из-за рубежа и от отечественных производителей: стеклянных сфер высокого давления из Германии, фотоумножителей Hamamatsu из Японии, источников питания из Тайваня, оптического геля из Германии, электронных печатных плат и блоков из НИИЯФ МГУ, магнитных экранов из Рязани, гидроакустических модемов из Германии, полупроводниковых импульсных лазеров из Москвы, глубоководных электрических разъемов из США, оконечных устройств донных магистральных опто-электрических кабелей из г. Дубна.

Особое место в процессе производства конструкций телескопа занимает кабельная продукция. До 2019 года всю номенклатуру кабелей разрабатывал и поставлял завод Псковгеокабель. Но к настоящему моменту завод обанкротился и прекратил производство. Поэтому были предприняты экстраординарные меры по поиску производителей и отработки с ними технологий производства специализированных кабелей. Получены экспериментальные образцы, которые будут испытаны в составе телескопа в 2020 году.

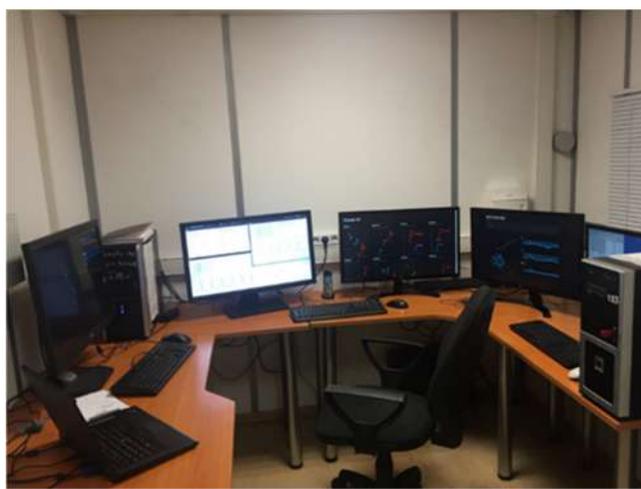


Рис. 9. Береговой центр и пульт управления телескопом

Опережающими темпами для обеспечения расширяющегося объема работ по подготовке и проведению монтажа глубоководных систем телескопа развивалась инфраструктура телескопа на берегах озера Байкал. Начиная с 2015 года при поддержке ОИЯИ (Дубна) на 106 км КБЖД был введен в эксплуатацию новый береговой центр, в который сходятся все донные кабели от кластеров телескопа (рисунок 9). Береговой центр (БЦ) рассчитан и оборудован всей необходимой техникой для бесперебойного электропитания кластеров телескопа, сбора, первичной обработки и передачи данных по

Радио-Интернет.

БЦ оборудован всем необходимым для работы и комфортабельного отдыха дежурных операторов (рисунок 10). На арендуемой у ВСЖД территории 4,6 га размещены лабораторные и бытовые помещения повышенной комфортности, предназначенные для размещения до 40 приезжающих специалистов и проведения пуско-наладочных работ во время экспедиций (рисунок 11).



Рис. 10.



Рис. 11.

Практически полностью обновлены техника и оборудование, обеспечивающая глубоководные работы в ледовом лагере и прокладку донных кабелей. Усовершенствована технология монтажа глубоководных систем телескопа, что позволило монтировать и запускать в эксплуатацию по 2 кластера в течение зимних экспедиций с 15 февраля до 15 апреля.

Ключевым объектом для обеспечения работ по расширению и эксплуатации телескопа является подразделение ИЯИ РАН «Байкальский технический стационар» (БТС), который на постоянной основе размещается в 6 зданиях разного назначения с общей площадью 3447,8 кв.м на территории 2,2 га в г. Байкальск, Промплощадка №4. БТС выполняет комплекс работ по инженерно-технической поддержке создания и эксплуатации Байкальского глубоководного нейтринного телескопа: развитие и обслуживание инженерных сетей на 106-107 км КБЖД, производство специализированных узлов несущих конструкций телескопа, транспортировка персонала, перевозки и складирование научного оборудования, поставляемого из Москвы и других городов и доставка его на место проведения монтажа новых систем телескопа во время зимних экспедиций, ремонт техники и оборудования. Ежегодно через Байкальск переправляется несколько сотен грузов всеми видами транспорта кроме авиации. В 2019 году был продолжен ремонт и оборудование помещений БТС. Отремонтировано 800 м<sup>2</sup> производственных площадей. Закуплен в рамках национального проекта «Наука» гидравлический пресс «Геркулес 200» для производства и

испытаний специальных деталей для нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Исследования и разработки в 2019 г. выполнялись с участием партнеров по коллаборации «Байкал»: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, Нижегородский государственный политехнический университет, Санкт - Петербургский государственный морской технический университет, международный центр ОИЯИ (г.Дубна), с участием специалистов исследовательского центра EvoLogics (Германия), университета (Bratislava, Slovakia) и Технического университета (Prague, Czech Republic).

### **1.3. Применение и значимость результатов исследования**

Все описанные выше разработки используются в установленных в зимнюю экспедицию с 15 февраля по 15 апреля 2019 года двух новых кластеров [1-3] и эксплуатируются в составе телескопа Baikal-GVD и будут использоваться в последующие годы в соответствии с планами по наращиванию эффективного объема телескопа.

В результате эффективный объем действующего нейтринного телескопа в озере Байкал достиг  $0,25 \text{ км}^3$ . Такой объем для глубоководных нейтринных телескопов достигнут впервые в мире. Российские ученые получили уникальную крупномасштабную установку для экспериментальных исследований в одном из самых актуальных направлений современной фундаментальной науки – астрофизики частиц высоких энергий и нейтринной астрономии. В соответствии с планами работ в 2022 году эффективный объем Baikal-GVD превзойдет эффективный объем самого большого нейтринного телескопа IceCube в льдах Антарктики –  $0,4 \text{ км}^3$ .

## **2. Развитие экспериментальных комплексов ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН, Троицк-ню-масс и ускорительный комплекс (Задача №2)**

### **2.1. Первый этап эксперимента BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) – пример развития экспериментального комплекса БНО ИЯИ РАН БНО ИЯИ РАН**

В рамках эксперимента BEST по поиску на коротких расстояниях переходов электронных нейтрино в стерильные состояния в период с 5 июля, дата доставки источника в подземную лабораторию галлий-германиевого нейтринного телескопа, по 13 октября 2019 года было проведено 10 экспозиций двухзонной галлиевой мишени, разделенной на

две (внутреннюю и внешнюю) зоны (Рис. 20), искусственным источником нейтрино  $^{51}\text{Cr}$ . После каждой экспозиции атомы  $^{71}\text{Ge}$ , образованные в реакции захвата нейтрино на ядрах  $^{71}\text{Ga}$ , в течение суток извлекались из каждой зоны мишени и помещались в специальные низкофоновые счетчики, устанавливаемые на счет в специально изготовленные счетные системы. Все извлечения установлены в счетные системы на продолжительные измерения, которые на данный момент продолжаются.

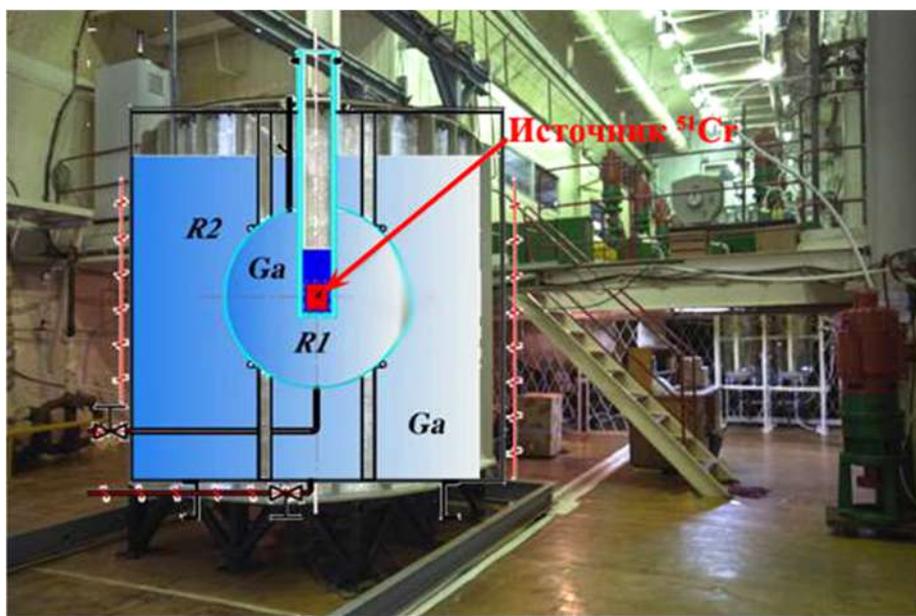


Рис. 12. Размещение источника в двухзонной галлиевой мишени.

Для интерпретации результатов эксперимента BEST важно знать величину активности источника с высокой точностью. В связи с этим нами разработаны и созданы спектрометрическая и калориметрическая системы для измерения с высокой точностью активности высокоинтенсивных гама источников. В период проведения извлечения атомов  $^{71}\text{Ge}$  из облученного галлия с точностью лучше 1%. На Рис. 21 представлены результаты калориметрические измерений активности искусственного источника  $^{51}\text{Cr}$ .

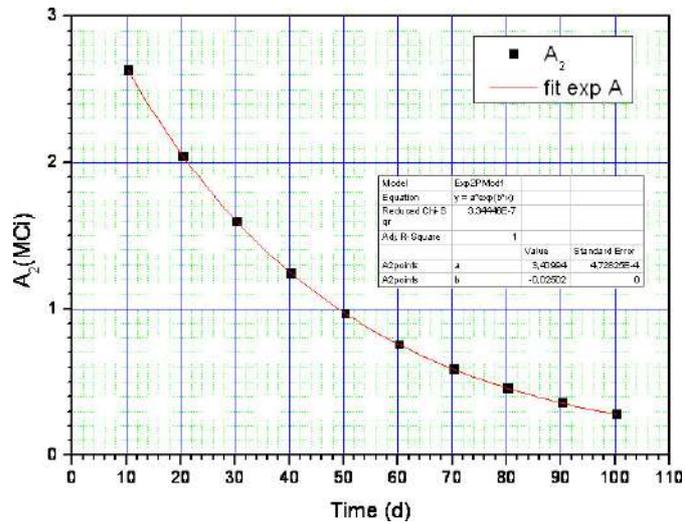


Рис. 13. Результаты calorиметрических измерений активности искусственного источника  $^{51}\text{Cr}$ .

В результате 10 calorиметрических измерений была получена величина активности нейтринного источника, которая на момент начала измерений в БНО ИЯИ РАН составила  $3,41 \pm 0,02$  МКи. В мире впервые изготовлен искусственный источник нейтрино такой высокой интенсивности и впервые достигнута такая высокая точность в измерении такой активности.

Из спектрометрических измерений гамма излучения источника на данном этапе определены радиоактивные примеси и их активности в источнике (Таблица 3).

Таблица 1. Радионуклидный состав источника  $^{51}\text{Cr}$ .

	Изотоп	Энергия в линии, кэВ	Выход линии, %	$n_s$	$n_f$	Активность на 5.07.2019, мКи	W, мВт
1	$^{137}\text{Cs}$	662	85	462	345	$17 \times (1 \pm 0.10)$	0.12
2	$^{95}\text{Zr}$	724	11.1	442	206	$74 \times (1 \pm 0.07)$	2.1
		757	54.38	461	215		
3	$^{95}\text{Ni}$	766	99.8	1392	184	$92 \times (1 \pm 0.04)$	
4	$^{134}\text{Cs}$	796	85.5	345	162	$5.2 \times (1 \pm 0.10)$	0.064
5	$^{58}\text{Co}$	811	99.44	298	155	$12 \times (1 \pm 0.11)$	0.16
6	$^{54}\text{Mn}$	835	100	1085	138	$15 \times (1 \pm 0.06)$	0.12
7	$^{46}\text{Sc}$	889	100	382	152	$7.7 \times (1 \pm 0.10)$	0.11
		1120	100	458	102		
8	$^{59}\text{Fe}$	1099	57	449	117	$22 \times (1 \pm 0.09)$	0.21
		1291	43.2	299	74		
9	$^{60}\text{Co}$	1173	100	1790	146	$12 \times (1 \pm 0.05)$	0.10
		1332	100	1645	359		
10	$^{124}\text{Sb}$	1690	47.5	201	77	$4.3 \times (1 \pm 0.12)$	0.074
		2091	5.5	48	2		
11	$^{22}\text{Na}$	1274	99.9	93	35	$0.3 \times (1 \pm 0.29)$	0.005
12	$^{154}\text{Eu}(?)$	1595	1.8	10	7	$1 \times (1 \pm 1.86)$	0.012

<b>Σ</b>	<b>3.0</b>
----------	------------

Доля радиоактивных примесей в тепловыделении источника  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3.0 МКи с тепловыделением около 650 Вт составляет порядка  $5 \times 10^{-6}$ . Суммарное тепловыделение примесных радиоактивных элементов в источнике составляет **3.0 ± 0.5 мВт**.

Сейчас в эксперименте проходит второй этап, в счетных системах продолжается регистрация распадов извлеченных атомов  $^{71}\text{Ge}$ , ведется обработка полученных данных. Принимая во внимание необходимую длительность измерений фона каждого поставленного на счет счетчика и время на выполнение прямых измерений эффективности каждого счетчика, первые результаты эксперимента планируются получить в середине года.

## **2.2. Троицк-ню-масс**

На установке Троицк-ню-масс ИЯИ РАН в течение нескольких месяцев многократно проводились наполнения объема спектрометра с давления высокого вакуума до давления 2-3 мбар парами воды и газообразного водорода. В результате очистки достигнут уровень фона в спектрометре, который позволяет проводить дальнейшие измерения по поиску стерильных нейтрино в распаде трития.

Проведена большая работа по обработке набранных ранее данных с новым типом многоканальных кремниевых дрейфовых детекторов. Данная работа проводилась совместно с коллегами из института физики им. Макс Планка в Мюнхене в рамках имеющегося сотрудничества. Основная задача состояла в том, чтобы убедиться, что данный тип детектора существенно расширит диапазон и качество измерений в интервале масс стерильных нейтрино 1-8 кэВ.

## **2.3. Ускорительный комплекс ИЯИ РАН**

На сильноточном линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН в 2019 г. проведено четыре сеанса, направленных на выполнение программ РАН, государственного задания, научной программы и иных обязательств Института. Обеспечено проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований. Общая продолжительность сеансов в 2019 году составила 1296 часов. Работы проводились на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КППТ, а также радиоизотопный комплекс и экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 49 МэВ до 267 МэВ. Успешная работа ускорителя стала возможной благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и работам по

модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса, среди которых следует отметить модернизацию вакуумной системы и системы питания электромагнитного оборудования ускорителя.

**3. Участие учёных ИЯИ РАН в международных экспериментах в международном центре CERN (Женева): эксперимент AEGIS, эксперимент NA64 (SPS CERN), эксперимент CMS, LHSb-эксперимент, эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0, эксперимент SHIP (CERN), детектор Baby-MINP, эксперимент ALICE (Задача №3)**

### 3.1. Эксперимент AEGIS

#### Получение атомов позитрония в магнитном поле 1 Тл

Была продолжена начатая в 2018 г. отработка более эффективной методики прямой инъекции пучка позитронов из позитронного аккумулятора в соленоид 5 Тл, а затем на мишень в поле 1 Тл. Трудность этой задачи заключается в том, что позитрониевая мишень смещена от оси соленоида 1 Тл на расстояние 3,5 см. Схематично мишенная камера для конверсии позитронов в атомы позитрония показана на рисунке 3.3.1.

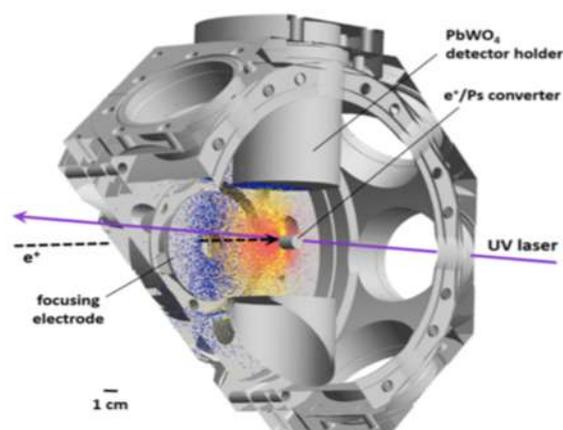


Рисунок 3.3.1. Схематический вид мишенной камеры для конверсии позитронов в атомы позитрония.

Пучок позитронов должен быть инжектирован в поле 5 Тл, а затем в поле 1 Тл по траектории, параллельной оси системы соленоидов. Введение дополнительных магнитных корректоров в области инъекции позитронного пучка в поле 5 Тл позволило решить эту задачу. Вектор магнитного поля, создаваемого корректором, был направлен вертикально. Отметим, что в обычном случае для ускоренного пучка заряженных частиц при прохождении такого магнита пучок отклонялся бы в горизонтальном направлении. Но для замагниченного позитронного пучка эффект был другим: при изменении тока корректирующей катушки с 19 А до 55 А пучок позитронов смещался в вертикальном направлении от оси соленоидов до центра позитронной мишени. Данный эффект связан с

перераспределением магнитного поля при включении корректирующей катушки и движением замагниченного позитронного пучка в результирующем магнитном поле.

Приход позитронного пучка на мишень регистрировался по детектированию  $\gamma$ -квантов от аннигиляции позитронов и атомов позитрония, вылетающих в вакуум из мишени-конвертора. Пример регистрируемых сигналов показан на рисунке 3.3.2. Кривые, показанные на рисунке 3.3.2 слева, представляют собой сигналы сцинтилляционного детектора, который состоит из пластиковых сцинтилляторов и фотоумножителей. Сцинтилляторы детектора имеют вид пластин, расположенных с наружной стороны вакуумной камеры соленоида 1 Тл.

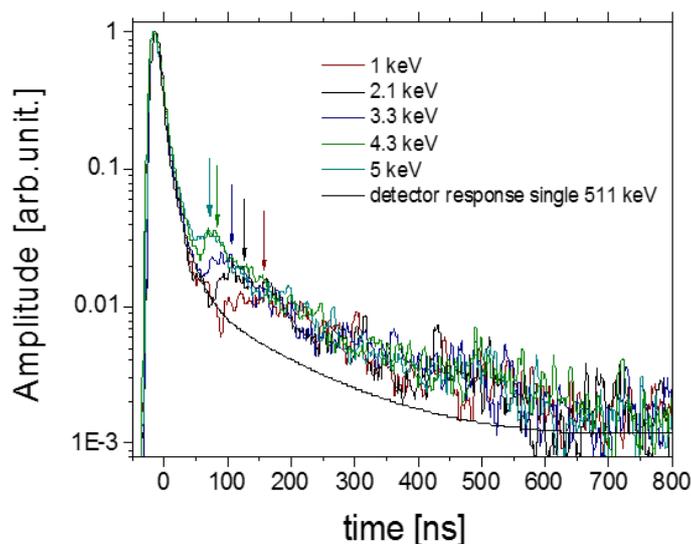


Рисунок 3.3.2. Регистрируемые сигналы от аннигиляции позитронов и атомов позитрония после прихода сгустка позитронов на мишень-конвертор в поле 1 Тл.

Кривые представляют собой сигналы SSPALS (single shot positron annihilation life-time signal), то есть сигнал, проинтегрированный по множеству отдельных событий аннигиляции позитронов без временного разрешения этих отдельных событий. По сравнению с предыдущими измерениями на полученных кривых наблюдаются локальные максимумы в диапазоне времени 70...150 нс от прихода сгустка позитронов на мишень. Положение максимума на кривой зависит от энергии позитронов. В результате анализа полученных данных был сделан вывод о том, что наличие локальных максимумов на кривых SSPALS связано с отражением части позитронов от мишени-конвертора. Отраженные позитроны движутся в направлении, обратном по отношению к первичному пучку падающих на мишень позитронов. Из-за наклонного положения мишени отраженные позитроны имеют большую величину поперечного импульса, что приводит к еще одному отражению в магнитной пробке, образованной переходом от магнитного поля 1 Тл к полю 5 Тл. Различное положение локальных максимумов на кривой связано с разным временем пролета отраженных позитронов до магнитной пробки и обратно до мишени. Для устранения влияния отраженных позитронов на форму сигналов SSPALS был разработан генератор высоковольтного напряжения до 2 кВ с временем нарастания около 20 нс. Указанное напряжение прикладывалось к электроду, установленному между мишенью и

магнитной пробкой. При подаче импульсного напряжения на электрод возникал потенциальный барьер, который препятствовал повторному прохождению к мишени отраженных магнитной пробкой позитронов.

Включение лазеров и подача лазерного резонансного излучения в область мишени для возбуждения позитрония приводит к изменению формы сигналов SSPALS. На рисунке 3.3.2 показаны сигналы SSPALS, полученные при включении лазерного излучения с длиной волны 205 нм и инфракрасного излучения 1640 нм в сравнении с сигналом без включения лазеров. Видно, что включение лазеров приводит к увеличению сигнала в области долгоживущих состояний позитрония.

### **Получение возбужденных $2^3S$ -состояний позитрония**

Позитроний в метастабильном состоянии  $2^3S$  обладает низкой электрической поляризуемостью и длительным сроком службы (1140 нс), что делает его перспективным кандидатом для интерферометрических экспериментов с нейтральной системой вещество - антиматерия. В настоящей работе позитроний  $2^3S$  получают - в отсутствие электрического поля - путем спонтанного радиационного распада с уровня  $3^3P$ , заполненного УФ-лазерным импульсом с длиной волны 205 нм. Благодаря короткой временной длине импульса и полной ширине 1,5 нс при половинном максимуме были выбраны различные скоростные населенности позитрониевого облака, испускаемого наноканальным позитронно-позитрониевым преобразователем, путем задержки импульса возбуждения относительно момента производства. Таким образом, были получены  $2^3S$  атомы позитрония со скоростью, настроенной между  $7 \times 10^4$  м с<sup>-1</sup> и  $10 \times 10^4$  м с<sup>-1</sup>. В зависимости от выбранной скорости была получена эффективность производства  $2^3S$  в диапазоне от 0,8% до 1,7% по отношению к общему количеству испускаемого позитрония. Наблюдаемые результаты дают коэффициент ветвления для спонтанного распада  $3^3P$ - $2^3S$  примерно  $(9,7 \pm 2,7)\%$ . Предложенная методика выбора скорости позволяет получить почти монохроматический пучок атомов количеством  $10^3$  в состоянии  $2^3S$  с разбросом скоростей меньше  $10^4$  м с<sup>-1</sup> и угловой расходимостью около 50 мрад.

Предварительные результаты по получению высоковозбужденных состояний атомов позитрония показаны на рисунке 3.3.3. Черные квадратные точки на рисунке 3.3 означают экспериментальное значение относительной разности сигналов (S%) с включенным и выключенным лазерным излучением при наличии лазерного излучения с длиной волны 205 нм и инфракрасным излучением с перестраиваемой длиной волны, показанной на оси абсцисс. Красные квадратные точки - результат, когда включено только ультрафиолетовое излучение 205 нм. В этом случае ожидаемая величина S% равна нулю. Зеленые квадратные точки соответствует включению лазерного излучения с длиной волны 205 нм и инфракрасного излучения с длиной волны 1064 нм. В этом случае ожидаемым эффектом является фотоионизация атомов позитрония и соответствующее уменьшение интенсивности сигнала SSPALS в диапазоне времен спектра 50...250 нс от начала импульса. Синим квадратом на рисунке 3.3 показан усредненный по всем данным результат с двумя включенными лазерами для получения ридберговских атомов позитрония.

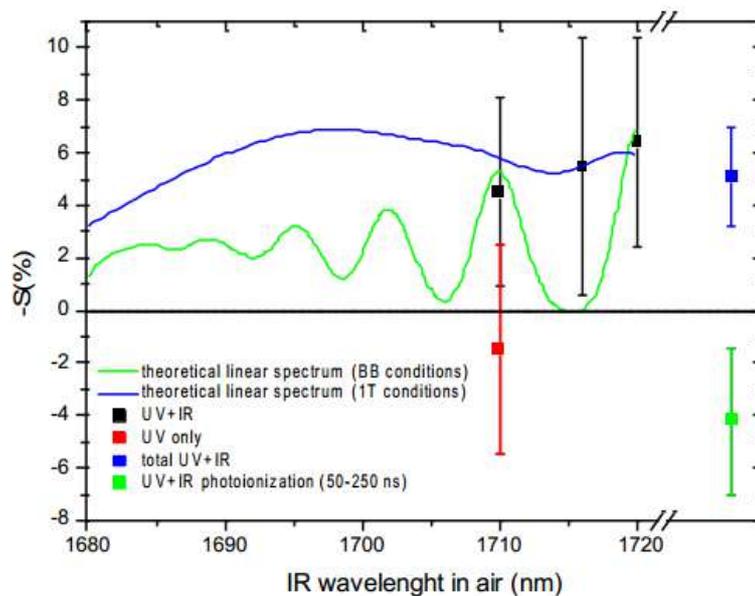


Рисунок 3.3.3. Предварительные результаты по получению высоковозбужденных атомов позитрония в магнитном поле 1 Тл. Сплошные кривые показывают расчетный спектр для слабого поля  $2,5 \times 10^{-2}$  Тл (зеленая линия) и 1 Тл (голубая линия).

Интенсивность потока атомов позитрония в ридберговских состояниях пропорциональна величине измеряемого эффекта S%. Усредненный по выполненным измерениям результат для S% равен 5% (синий квадрат на рисунке 3.3.3). Эффект зависит от многих параметров настройки, в том числе от пространственного и временного совпадения импульсов лазерного излучения и позитронного импульса, от мощности излучения и стабильности длины волны лазерного резонансного излучения. Поэтому экспериментальное изучение процесса образования ридберговских атомов позитрония продолжается.

#### Диагностика высоковозбужденных атомов позитрония

Для оптимизации многочисленных параметров установки, определяющих интенсивность потока высоковозбужденных атомов позитрония, важно использовать эффективный метод для диагностики позитрония в области возникновения атомов антиводорода.

Первоначально для диагностики использовался метод SSPALS (Single-Shot Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy), который позволяет измерять общее количество образованных высоковозбужденных атомов позитрония по изменению формы временного интегрального спектра от детектируемых сцинтилляционным детектором  $\gamma$ -квантов от распада атомов позитрония с возбуждением атомов позитрония лазерным излучением и без лазерного излучения [2]. Для получения требуемой статистической точности в 1%

требовалось время измерений около 16 часов для одного набора параметров, что затрудняло процесс настройки и оптимизации параметров позитронной аппаратуры.

Более быстрый метод диагностики высоковозбужденных атомов позитрония был разработан в коллаборации AEgIS с участием группы ИЯИ РАН [8]. Метод основан на регистрации позитронов, образующихся при ионизации высоковозбужденных атомов позитрония, высокочувствительным детектором с микроканальной пластиной. Ионизация позитрония может быть произведена и из состояния с  $n=3$  и из ридберговских состояний облучением атомов позитрония инфракрасным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм. Для ридберговских состояний с  $n>17$  происходит автоионизация атомов электрическим полем, возникающем в сопутствующей системе координат при движении позитрония в сильном поперечном магнитном поле 1 Тл. При ионизации позитрония возникает пара заряженных частиц  $e^+$  и  $e^-$ . В области ионизации создавалось электрическое поле, в котором образованные позитроны ускорялись вдоль магнитного поля в сторону детектора с микроканальной пластиной. При таком направлении электрического поля снижается фон от электронов, возникающих в результате фотоэффекта на металлических деталях установки в области ионизации под действием лазерного излучения с длиной волны 205 нм. Для повышения эффективности регистрации позитронов к поверхности микроканальной пластины, обращенной к области ионизации, прикладывается потенциал минус 180 В. Использование фосфорного экрана за микроканальной пластиной позволяет получить видимое изображение позитронного пучка и, соответственно, ридберговских атомов позитрония. Замагничивание траекторий медленных позитронов в сильном магнитном поле 1 Тл установки обеспечивает высокое пространственное разрешение, величина которого практически ограничена расстоянием между каналами микроканальной пластины, равном примерно 10 мкм.

Полученные экспериментально результаты показывают, что отношение сигнала к фону находится на уровне 150, что примерно в 50 раз превышает результат, полученный с техникой SSPALS. При этом время измерений сокращается примерно в 100 раз. Таким образом, разработанный метод позволяет значительно ускорить настройку аппаратуры для генерации атомов позитрония в высоковозбужденных состояниях и оптимизировать процесс получения атомов антиводорода перезарядным методом.

### **3.2. Эксперимент NA64 (SPS CERN)**

#### **Результаты по поиску сигнала темной материи в 2019 г.**

В 2019 г. в эксперименте NA64 был проведен комбинированный анализ данных, набранных в течение 2016-2018 гг., а также оценка соответствующего уровня фона для поиска частиц темной материи с массами порядка одного гигаэлектронвольта, рождающихся в распадах векторных ( $A'$ ) калибровочных бозонов (скрытых фотонов) в событиях с большой недостающей энергией в конечном состоянии на основе набранной статистики. В результате анализа сигнальных и контрольных областей существенных превышений над уровнем фона от оценок вкладов процессов СМ не обнаружено.

В результате получены уникальные, наиболее строгие на данный момент, ограничения на параметр смешивания  $A'$  с фотоном  $\epsilon$  как функцию массы  $A'$ , показанные на рисунке 3.2.1

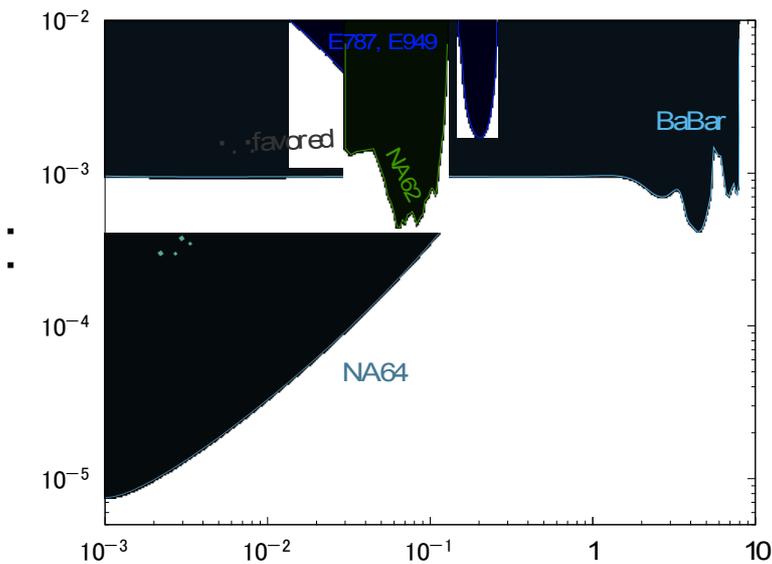


Рисунок 3.2.1. Полученные ограничения эксперимента NA64 по сравнению с результатами других поисков массивного бозона.

Работы по поиску частиц темной материи в распадах скалярных медиаторов (S) были продолжены в 2019 году на полной статистике сеансов 2016-2018 гг. Отрабатывались новые методики анализа – поиск скаляров не только в невидимой, но и в видимой моде их распадов на частицы СМ (фотоны и/или электроны и мюоны), использование регистрации пар  $e^+e^-/\mu^+\mu^-$  в качестве сигнатуры от распада S-бозона и другие подходы для усиления значимости сигнала. Окончательный результат планируется опубликовать в 2020 году.

### **Повышение чувствительности установки для дальнейшего поиска $A'$**

Возможность дальнейшего улучшения чувствительности поиска массивных бозонов на установке NA64 была доложена в 2019 г. на очередном заседании комитета SPSC CERN и положительно отмечена членами комитета. В настоящее время проводится работа по выбору оптимального варианта детектора для эффективной регистрации частиц в сеансах

2021 г. Реализация такого детектора возможна, например, с использованием дополнительного трекера на основе стро-трубок и с использованием стро-трубок в качестве вето на заряженные вторичные адроны, что позволит улучшить чувствительность модернизированной установки 2019 г. по сравнению с установкой 2016 г.

### **$^8\text{Be}$ аномалия: продолжение эксперимента по поиску распада $X \rightarrow e^+e^-$**

В 2019 г. сотрудниками ИЯИ РАН в рамках программ эксперимента NA64 был продолжен анализ данных по поиску X-бозона массой 17 МэВ, распад которого по каналу  $X \rightarrow e^+e^-$  объясняет т.н.  $^8\text{Be}$ -аномалию, а также по поиску легкой темной материи в диапазоне масс 1...100 МэВ, распадающуюся по видимой моде (т.е. на частицы СМ). Схема эксперимента на ускорителе SPS в ЦЕРНе показана на рисунке 3.2.2.

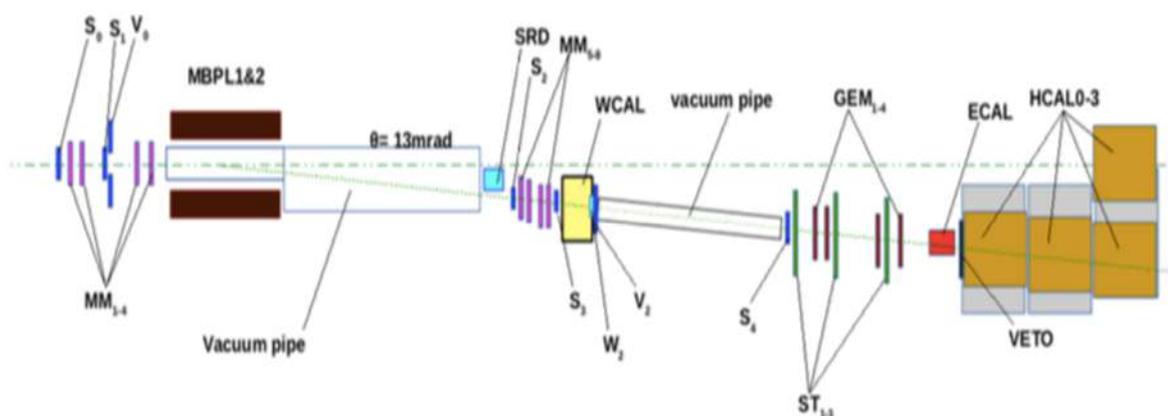


Рисунок 3.2.2. Схема детектора для поиска распада бозона  $X_{17}$  и скрытого фотона  $A'$  легкой темной материи на пару  $e^+e^-$  на ускорителе SPS с использованием электронного пучка с энергией в диапазоне 100...150 ГэВ.

Существование X-бозона является возможным объяснением не только аномального избытка пар  $e^+e^-$  в распадах возбужденных ядер  $^8\text{Be}$ , обнаруженного экспериментом АТОМКИ в 2016 г., но и недавнего аналогичного избытка пар  $e^+e^-$  в распадах возбужденных ядер  $^4\text{He}$ . Поиск гипотетического бозона X с массой около 17 МэВ в эксперименте NA64 в рамках группы анализа NA64 на основе данных, полученных на полной статистике сеансов 2016-2018 гг., находится в стадии завершения.

Проведены оценки всех значимых для поиска источников фона и систематических неопределённостей. В результате анализа сигнальных и контрольных областей существенных превышений над фоном от оценок вкладов СМ-процессов не обнаружено и получены уникальные, наиболее строгие на данный момент, ограничения на параметр смешивания X-бозона с фотоном как функции массы X-бозона.

### 3.3. Эксперимент CMS

#### Поиск тяжелых нейтрино в эксперименте CMS – результаты очередного этапа.

Были обработаны экспериментальные данные 2016 г. в количестве  $35,9 \text{ fb}^{-1}$  по триггеру двойной  $\tau_h$  с порогом 32 ГэВ. экспериментальных данных. В электрон-мюонном канале экспериментально обнаружены события, удовлетворяющие всем критериям отбора, которые хорошо согласуются с предсказаниями СМ. В электронном и мюонном каналах зарегистрирован пик от распада Z-бозона. Наблюдается хорошее согласие с моделированием методом Монте-Карло. Для моделирования фона использовались генераторы AMC@NLO (tt+jets), madgraph (W+jets), pythia8 (WW, WZ, ZZ), powheg (tW), а для сигнала pythia8 (LRSM).

Распределение по количеству первичных взаимодействий и распределение по инвариантной массе четырех объектов на предварительной стадии отбора хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Такое согласие с наблюдаемыми данными говорит о правильном понимании всех важных процессов, происходящих при высоких энергиях.

В результате анализа данных, полученных в течение 2018 г. и соответствующих полной светимости БАК  $35,9 \text{ fb}^{-1}$ , были получены ограничения на массу тяжелого нейтрино в зависимости от массы  $W_R$  [5,6]. Сделано сообщение на совещании CMS о поиске правовинтового W-бозона и тяжёлого нейтрино, связанного с третьим поколением лептонов (конечное состояние содержит два тау-лептона). Проведён сравнительный анализ этого поиска и соответствующих поисков в других каналах (две струи, два электрона + струи, два мюона + струи).

### 3.4. LHCb- эксперимент

В рамках кварковой модели, созданной более 50-ти лет назад, предполагается существование частиц, в кварковый состав которых к минимальным мезонным и барионным конфигурациям добавлены кварк-антикварковые пары. В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^0 p$ , в которых в спектре инвариантной массы  $(J/\psi, p)$  пар были обнаружены резонансные структуры  $P_c(4380)^+$  и  $P_c(4450)^+$ , объясненные минимальным набором из пяти кварков  $c\bar{c}uud$ , это так называемый очарованный пентакварк. Большая статистика и точность метода позволили подтвердить на уровне 5.4 стандартных отклонения структуру  $P_c(4450)^+$ , как два новых близких состояния  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$ . Кроме того, найдено новое состояние  $P_c(4312)^+$ , на уровне

достоверности 7.3 стандартных отклонения. Минимальный кварковый состав новых состояний  $\bar{c}uud$  возможно указывает на молекулярное строение связей типа мезон + барион. Дальнейшее изучение требуется для определения деталей обнаруженной структуры.

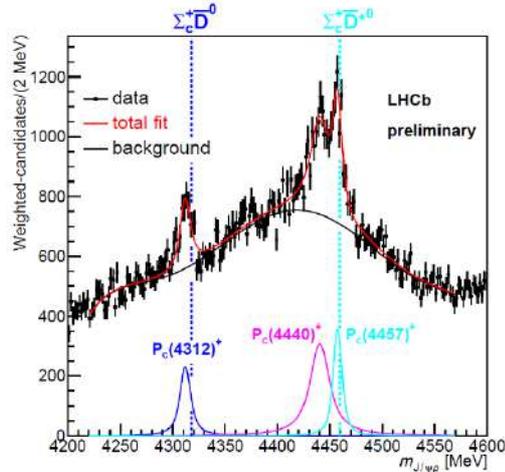


Рисунок 3.4.1. Показаны распределения масс пар  $(J/\psi, p)$ . Точками показаны экспериментальные данные. В нижнем ряду представлены (цветом) результаты для найденных новых массовых состояний пентакварков.

В LHCb была достигнута беспрецедентная точность изучения разницы скоростей распадов  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  и  $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ . Результат, доложенный LHCb показал отклонение параметра нарушения CP четности от нулевого значения  $\Delta A_{CP} = (-0.154 \pm 0.029)\%$  на уровне 5.3 стандартного отклонения. Это результат означает первое в мире наблюдение нарушения четности в распадах «очарованных» частиц и, таким образом, открывается новая эра изучения CP нарушения в ряду верхних кварков.

### 3.5. Эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0

В течение 2019 года в рамках эксперимента NA62 (ЦЕРН) продолжалась обработка ранее набранных данных в сеансах 2016 - 2018 гг. В результате анализа примерно 2% данных (сеансы 2016 г.) было получено следующее ограничение на вероятность распада каона на пион и два нейтрино:  $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu) < 14 \times 10^{-10}$  на 95% уровне достоверности. Этот первый результат продемонстрировал правильность концепции эксперимента.

Затем был проведен анализ данных 2017 года, которые примерно в 6 раз превышают статистику сеанса 2016 года. Для поиска распада  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  в ходе анализа данных реконструируются четырехимпульс  $p_K$  начального состояния и четырехимпульс  $p_\pi$  конечного состояния, затем с помощью законов сохранения вычисляются «недостающая

энергия» (missing energy) и «недостающая масса» (missing mass) в конечном состоянии. Квадрат недостающей массы  $m_{\text{miss}}^2 = (p_K - p_\pi)^2$  используется для кинематического выделения искомого распада на фоне других мод распада K-мезона. Для подавления фона используется несколько критериев отбора, которые учитывают срабатывание различных детекторов установки: пучкового черенковского счетчика, RICH-детектора, адронного калориметра MUV1 и мюонного детектора MUV3 (вето), а также различных систем, работающих в антисовпадении. Эти меры приводят к значительному подавлению фона: до уровня  $10^{-8}$  при сохранении высокой эффективности регистрации сигнала.

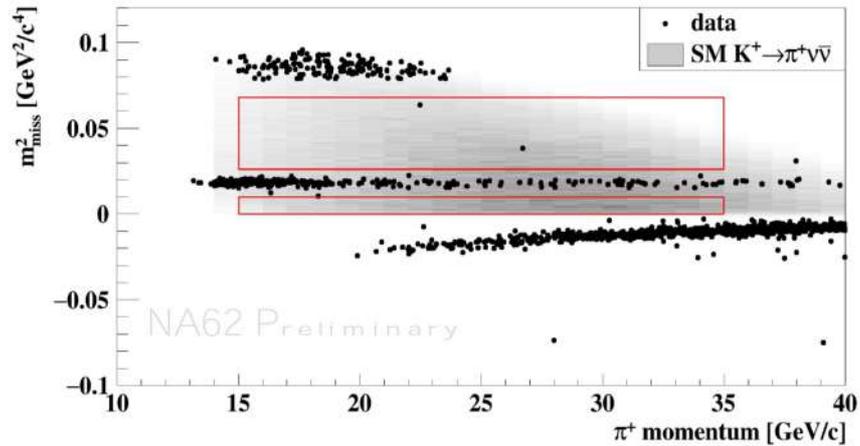


Рис.3.5.1. Реконструированное значение квадрата недостающей массы  $m_{\text{miss}}^2$  в зависимости от измеренного импульса пиона  $p_\pi$  в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора. Точки – экспериментальные данные, серая область – ожидаемая область в Стандартной модели, красные линии – границы сигнальных областей. Наблюдаются 2 события в верхней сигнальной зоне.

На Рисунке 3.5.1.показано реконструированное значение квадрата недостающей массы  $m_{\text{miss}}^2$  в зависимости от измеренного импульса пиона  $p_\pi$  в конечном состоянии – после применения всех критериев отбора. Видно, что в верхней сигнальной области наблюдаются 2 события. Предсказываемое СМ число сигнальных событий при этих условиях оказывается равным 2.16, а фон – на уровне  $1.5 \pm 0.3$ . Суммарный анализ данных 2016-2017 гг. приводит к следующему результату:  $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) < 1.62 \times 10^{-10}$  на 95% уровне достоверности или  $\text{Br}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.47^{+0.72}_{-0.47}) \times 10^{-10}$ .

Были проанализированы данные, набранные в 2010 – 2017 гг., соответствующие  $12.34 \times 10^{20}$  POT в нейтринной моде и  $6.29 \times 10^{20}$  POT в антинейтринной моде. Выбирались события, имеющие 2 трека частиц разных зарядов, исходящие из одной вершины в данной камере TPC, затем накладывались дальнейшие критерии отбора для подавления фона. Анализ различных контрольных областей показал, что после применения всех критериев отбора фон от взаимодействий стандартных нейтрино находится на весьма низком уровне:

меньше двух фоновых событий для всех каналов распада тяжёлых нейтрино. Была проведена оценка вклада всех возможных систематических погрешностей, связанных с неопределённостями потока, сечений взаимодействия активных нейтрино, с погрешностями детектора и модельными теоретическими неопределённостями. После различных проверок в контрольных областях были рассмотрены сигнальные области, в которых не было обнаружено никаких событий, соответствующих тяжёлым нейтрино, что позволило установить верхние границы на параметры смешивания  $U_e^2$ ,  $U_\mu^2$ ,  $U_\tau^2$ . Из Рис. видно, что результат T2K сравним с результатами, полученными другими экспериментами (PS191, E949, CHARM). В дальнейшем работа по поиску тяжёлых нейтрино будет продолжена – с новой статистикой и с улучшенными оценками фона, а также рассмотрением рождения тяжёлых нейтрино не только в каонных, но и в пионных распадах.

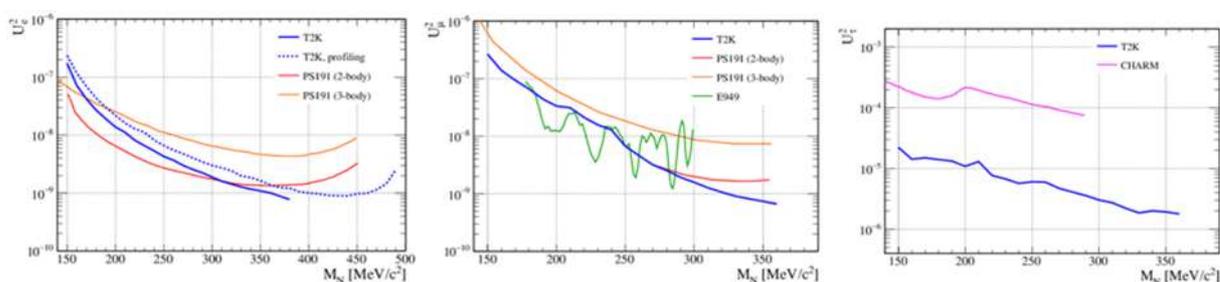


Рис.3.5.2. Верхние границы (90% уровень достоверности) параметров смешивания  $U_e^2$  (слева)  $U_\mu^2$  (в центре) и  $U_\tau^2$  (справа) как функции массы тяжёлых нейтрино. Голубые линии, соответствующие результатам T2K, сравниваются с результатами экспериментов PS191, E949 и CHARM.

Важный результат 2019 г.– завершение производства компонентов нового детектора – вето-годоскопа ANTI-0 и успешные испытания готовых компонентов. Новый вето-детектор ANTI-0, предназначен для регистрации мюонного гало пучка в эксперименте NA62.

### 3.6. Эксперимент SHiP (CERN)

В 2019 г. сотрудниками ИЯИ РАН были продолжены работы в рамках подготовки эксперимента SHiP (Search for Hidden Particles) на пучке протонов ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron) Европейской организации по ядерным исследованиям (CERN), начало которого планируется на 2026-2027 гг.

Сотрудниками ИЯИ РАН была проделана НИОКР по разработке сцинтилляционных счётчиков для двух систем эксперимента SHiP: для временного детектора и для мюонной системы, основная задача которых заключается в подавлении фона и регистрации мюонов из распада частиц тёмной материи. Прототип временного детектора SHiP будет

использован в качестве времяпролётного детектора модифицированной системы ближних детекторов ND280 эксперимента T2K и ближнего детектора проектируемого эксперимента T2HK (ГиперКамиоканде). Для мюонной системы SHiP изготовлены сцинтилляционные счётчики, которые в 2020 г. будут протестированы в Италии.

### 3.7. Детектор Baby-MIND

Магнитный детектор Baby-MIND, разработанный и созданный при непосредственном участии сотрудников ИЯИ РАН, предназначен для измерения треков заряженных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с веществом углеродно-водной мишени детектора WAGASCI, что позволит существенно уменьшить систематические погрешности, связанные с неопределенностью значений сечений взаимодействия (анти)нейтрино с ядрами кислорода (в составе воды) и углерода (в составе пластического сцинтиллятора). Этот детектор в настоящее время является частью ближнего детектора нейтринного осцилляционного эксперимента T2K на протонном ускорителе J-PARC, Япония, а в будущем станет частью ближнего детектора нейтринного эксперимента следующего поколения T2HK, в котором в качестве дальнего детектора будет использоваться проектируемый водный черенковский детектор ГиперКамиоканде.

Детектор Baby-MIND был смонтирован в полном объеме и запущен в работу на нейтринном канале эксперимента T2K в 2019 г. Был начат набор статистики с пучком мюонных нейтрино и антинейтрино под углом 1.5 градуса относительно направления протонного пучка. В течение октября-декабря 2019 г. была набрана статистика, соответствующая интегральному потоку протонов на мишени около  $3 \times 10^{20}$  POT. Мощность протонного пучка составила около 500 кВт. Детектор работал с магнитным полем 1.5 Тесла, что позволило надежно идентифицировать заряд частиц, рожденных при взаимодействии нейтрино в водном детекторе WAGASCI и в детекторе Baby-MIND. Начат анализ данных взаимодействия нейтрино с водородом, водой, углеродом при энергии около 1 ГэВ. Также будут получены данные по сечениям взаимодействия нейтрино и антинейтрино с ядрами железа. Детектор функционирует надежно. Эффективность работы детектора Baby-MIND во время набора статистики нейтринных событий при включенном пучке составила более 95%. Энергетические спектры, полученные в детекторе Baby-MIND по разными углами относительно направления пучка протонов показаны на Рис 3.7.2.

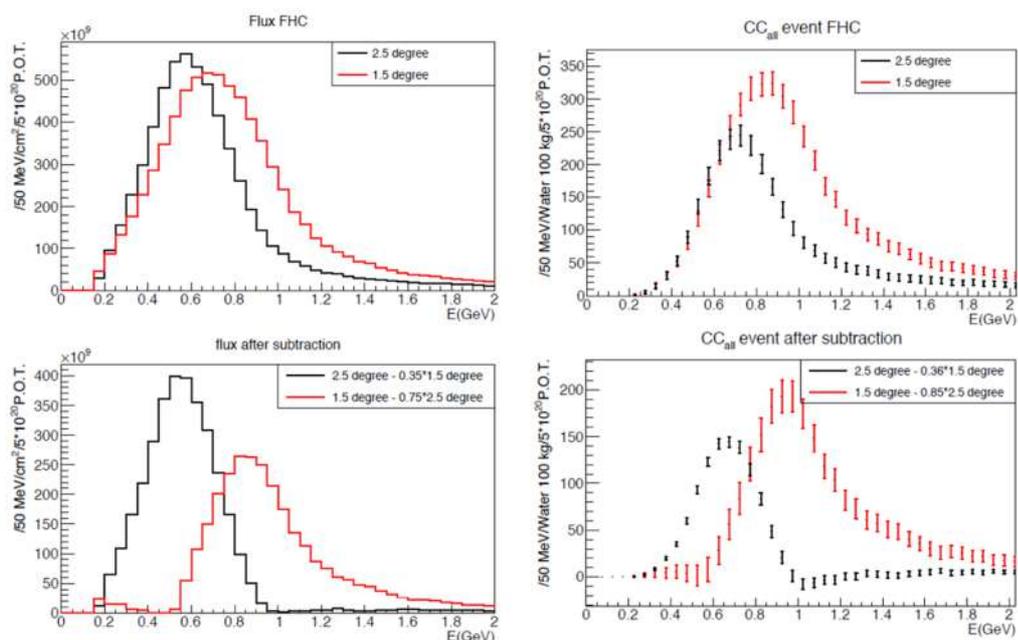


Рис 3.7.2. Энергетические спектры, полученные в детекторе Baby-MIND под разными углами относительно направления пучка протонов.

В рамках Нейтринной Платформы ЦЕРН и проекта Baby-MIND группой ИЯИ РАН, sk разработан детектор SuperFGD, который состоит из сцинтилляционных кубиков объемом  $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$  с тремя ортогональными отверстиями для спектросмещающих волокон, и имеет размеры: длина 200 см, ширина 200 см, высота 60 см. Сцинтилляционные сигналы регистрируются микропиксельными лавинными фотодиодами Hamamatsu MPPC S13360-1325CS. Всего детектор состоит примерно из 2 миллионов индивидуальных сцинтилляционных «кубиков» и имеет около 60 тысяч лавинных фотодиодов и каналов электроники. Через каждый кубик проходит 3 волокна по трем направлениям (x, y, z). Тесты с космическими мюонами, а также тесты на пучке в ЦЕРНе прототипа детектора, показали, что всем требованиям эксперимента удовлетворяет электроника, базирующаяся на чипах CITIROC, которые и были приняты в качестве основного элемента. Такая геометрия детектора обеспечивает 3D информацию о заряженных частицах, рождающихся в вершине нейтринного взаимодействия. Было получено временное разрешение лучше 1 нс, порог регистрации протонов 200 МэВ/с. После анализа полученных данных в качестве фотоприемника был выбран Hamamatsu MPPC S13360-1325PE, обладающей активной поверхностью  $1.3 \text{ мм}^2$  и имеющий 2668 пикселей, каждый размером  $25 \times 25$  микрон. Этот прибор имеет широкий динамический диапазон, эффективность регистрации фотонов около 30% и низкий cross-talk (меньше 1). Также определена и проработана процедура сборки детектора, включая спектросмещающие волокна, фотоприемники и электронику.

Была разработана система калибровки и контроля детектора на основе оптических волокон и системы светодиодов.

В течение 2019 года была полностью разработана и отлажена процедура массового изготовления методом литья под давлением сцинтилляционных кубиков размером  $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$  с тремя отверстиями для спектросмещающих волокон. Была отлажена и запущена в работу пресс-форма с 10-ю камерами в ООО Унипласт (г. Владимир). В 2019 году в ИЯИ было собрано 25 плоскостей детектора из 900 тысяч кубиков, что составляет около 45% общего объема. Также был создан полномасштабный прототип 3D детектора размером  $192 \times 15 \times 56 \text{ см}^3$ , который состоит из 160 тысяч кубиков (Рис 3.7.1. ). Были выполнены механические испытания, исследован возможный прогиб под действием различных нагрузок, изучены эффекты деформаций, влияющие на параметры спектросмещающих волокон, протестирован механизм сборки детектора и проведены прецизионные измерения полученных параметров.

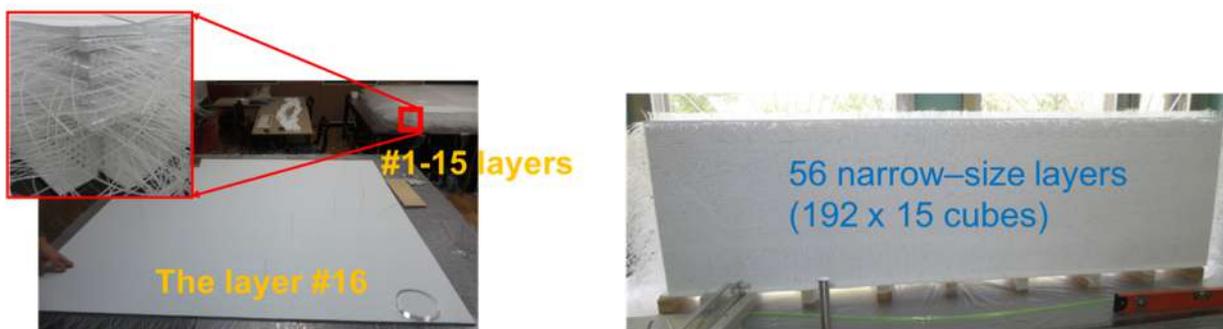


Рис 3.7.1. Слои 3D сцинтилляционного детектора в сборке из лесок. Слева: 16 слоев (из 25, собранных к концу 2019 г.) каждый из 35328 ( $192 \times 184$ ) кубиков, нанизанных на леску диаметром 1.3 мм. Справа: сборка из 56 более узких слоев, состоящих из 2880 ( $192 \times 15$ ) кубиков; эта сборка имеет высоту реального детектора, поэтому использовалась для различных механических тестов.

В декабре 2019 года был проведен сеанс на пучке нейтронов в Лос-Аламосе (США), в ходе которого были измерены параметры прототипа детектора SFGD к нейтронам в области энергий 1 ГэВ. Получена предварительная эффективность регистрации нейтронов с энергиями несколько сотен МэВ около 50%. Анализ всех накопленных данных будет проведен в следующем году.

### 3.8. Эксперимент ALICE

Установка АЛИСЕ исследует ядро-ядерных взаимодействия на встречных пучках ускорителя LHC CERN.

## 1. Новый метод определения функции распределения и фрагментации партонов при рождении адронов при взаимодействии протонов.

По данным эксперимента ALICE, выполнен анализ импульсных спектров пионов, каонов и антипротонов, рожденных при столкновении протонов при энергиях LHC. В то время, как наиболее часто используемое распределение по поперечному импульсу различается в десять раз и более для рождения частиц разного вида, впервые показано, что представление спектров в виде распределений по масштабно инвариантным параметрам обнаруживает скейлинг при малых значениях параметра  $x$ . (Рис.3.8.1). Таким образом, данные по рождению пионов, каонов и антипротонов при сверхвысоких энергиях могут быть использованы для определения PDF в протоне в области, где вклад глюонов наиболее значителен.

Результаты доложены на совещании “ALICE Physics Week”, июль 2019 г.

A.B.Kurepin and E.V.Karpechev, “Scaling properties of momentum spectra in pp collision in ALICE”, Workshop: “ALICE Physics Week in Prague”, 22-26 июля 2019 г.

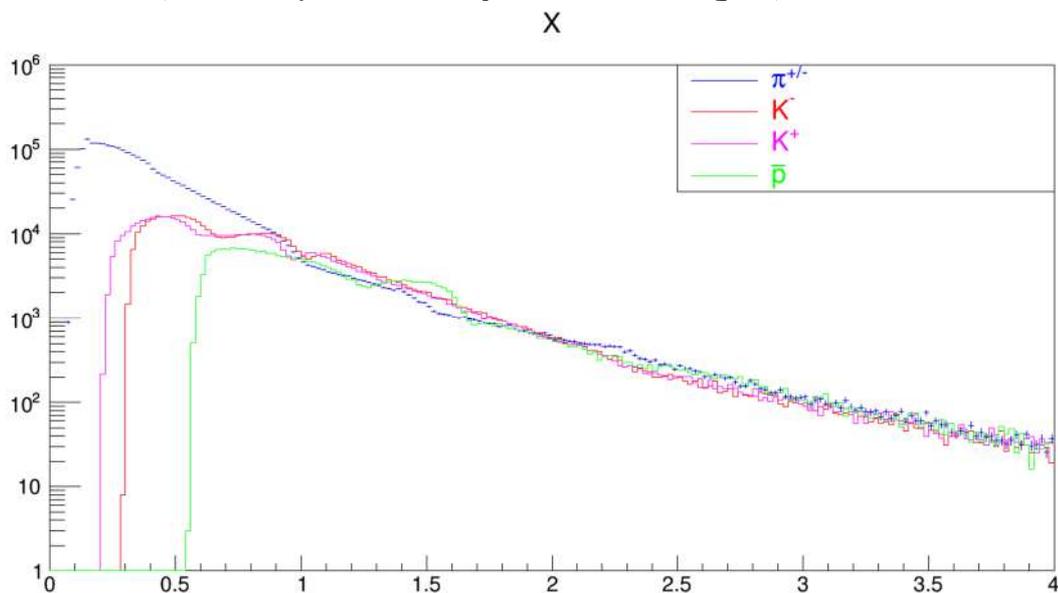


Рисунок 3.8.1. Скейлинг пионов, каонов и антипротонов по параметру  $x$  при энергии 2.76 ТэВ

## 2. Эксперименты с фиксированной мишенью на установке АЛИСЕ.

Проведена разработка нескольких экспериментов с фиксированной мишенью на пучках Большого Адронного Коллайдера (LHC). Существуют различные возможности использовать пучки LHC высокой энергии для взаимодействия с фиксированной мишенью. Возможно использование изогнутого отклоняющего кристалла, помещенного в гало пучка. Эта методика выведения пучка эффективна и позволяет получать чистые и хорошо

сфокусированные пучки. Другая возможность связана с использованием внутренней газовой мишени, которая может быть поляризована. Такая внутренняя газовая мишень используется в настоящее время в эксперименте LHCb в качестве монитора светимости (SMOG). Также эксперимент может быть проведен с мишенью в форме тонкого кольца, помещенного в гало пучка. Мишень может помещаться в рабочее положение с помощью специального устройства после выведения пучка. Были предложены и другие конструкции твердой мишени. Технические возможности установки фиксированной мишени, помещенного в гало пучка, обсуждаются в ИЯИ РАН, ОИЯИ (Дубна), в рабочей группе эксперимента AFTER, а также на LHC в группе фиксированной мишени в объединении Physics Beyond Collider. Конструкции мишени с кристаллом и без него приведены на Рис. 3.8.2. и 3.8.3.

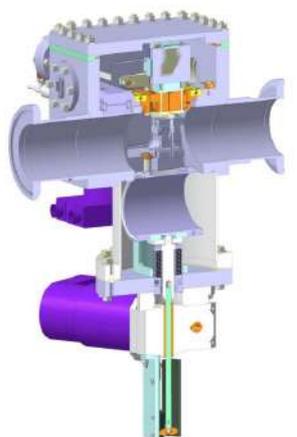


Рисунок 3.8.2. *Размещение кристалла в гало пучка с механикой его перемещения*

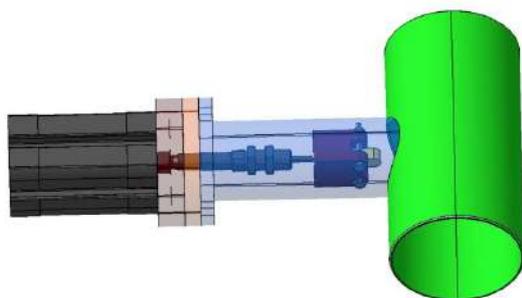


Рисунок 3.8.3. *Конструкция размещения фиксированной мишени в гало пучка по предложению группы ИЯИ РАН.*

Была создана рабочая группа эксперимента AFTER@LHC, куда входят и сотрудники ИЯИ РАН. Статус всех предложений и возможность их использования на пучках БАК исследуются в рабочей группе фиксированной мишени и на форуме the PBC (the Physics

Beyond Collider) в ЦЕРНе. Возможность проведения экспериментов с фиксированной мишенью на пучках коллайдера LHC и соответствующая физическая программа измерений рассматривается во многих публикациях, начиная с первой работы, выполненной в ИЯИ РАН (А.В.Курепин, N.S.Topilskaya and M.B.Golubeva, "Charmonium production in fixed-target experiments with SPS and LHC beams at CERN," Phys. Atom. Nucl. 74 (2011) 446–452. Ядерная Физика 74, 467 (2011)). Проходят регулярные обсуждения и видеоконференции рабочей группы эксперимента с фиксированной мишенью непосредственно на установке АЛИСЕ, куда также входят сотрудники ИЯИ РАН. В ESPP (European Particle Physics Strategy) было подано предложение по проведению эксперимента с фиксированной мишенью на установке АЛИСЕ. ("Physics opportunities for a fixed-target in the ALICE experiment", F.Galluccio, ...А.В.Курепин, ...N.S.Topilskaya et al., ESPP document #47, December 2018). Обсуждение эксперимента в ESPP запланировано на май 2020 г. В феврале 2020 г. планируется детальное обсуждение эксперимента с фиксированной мишенью на установке АЛИСЕ на ЛНСС ЦЕРНа.

После обсуждений с техническим координатором установки АЛИСЕ принято решение о расположении фиксированной мишени на расстоянии – 4.7 м от IP.

Постановка экспериментов на фиксированной мишени на пучках Большого Адронного Коллайдера (LHC) имеет ряд преимуществ по сравнению с экспериментами на коллайдерах. Высокая светимость пучков существенно повысит статистическую точность данных и расширит интервал кинематических параметров реакций. Появится возможность исследовать процессы в области больших значений Фейнмановской переменной  $x$ . Могут использоваться мишени из различных материалов и пучки разных налетающих частиц. При использовании гало протонного и ионного пучков на БАК с фиксированной мишенью могут быть получены данные в интервале энергий между энергией SPS и номинальной энергией RHIC для p-A и A-A столкновений. Для протонного пучка с энергией 7 ТэВ  $\sqrt{s_{NN}} = 115$  ГэВ, а для ионов свинца с энергией для 2.76 ТэВ на нуклон  $\sqrt{s_{NN}} = 72$  ГэВ. Поскольку используется только гало пучка, процесс измерений на основных установках LHC не меняется. В рамках проекта планируется исследование столкновений тяжелых ионов при больших быстротах, детальное изучение процессов рождения кваркониев и подавление их рождения в зависимости от фазового перехода материи в кварк-глюонную фазу. Эксперимент AFTER позволит также исследовать нуклонные и ядерные функции распределения партонов, извлекаемые из адронных процессов. Планируется изучение спиновых процессов, в том числе спиновой асимметрии. В настоящее время практически

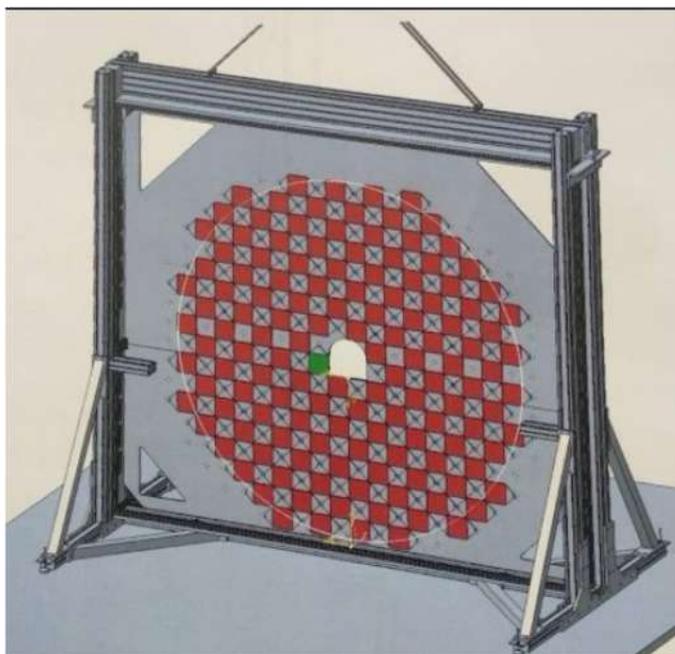
все ускорители имеют программу исследований с фиксированной мишенью (Tevatron, HERA, SPS, RHIC, NICA).

Проведен расчет светимости для различных мишеней толщиной 500 мк. Интегральная светимость для Pb пучка на мишени из W при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 72$  ГэВ составит 0.3/нбарн для измерений в течение месяца. Получаемая интегральная светимость сопоставима с интегральной светимостью ALICE в коллайдерной моде, планируемой в Run3 и Run4. Рассчитаны также множественности заряженных частиц для протонного пучка и пучка свинца.

#### **4. Работы по модернизации экспериментальных установок ЦЕРН, в работе которых принимают участие российские учёные (Задача №4)**

##### **4.1. Детектор - вето ANTI-0**

Важный результат 2019 г. по модернизации установок в ЦЕРН - завершение производства компонентов нового детектора - вето-годоскопа ANTI-0 и успешные испытания готовых компонентов. Новый вето-детектор ANTI-0, предназначен для регистрации мюонного гало пучка в эксперименте NA62. Был разработан дополнительный сцинтилляционный годоскоп с хорошим временным разрешением. Базовый элемент годоскопа ANTI-0 состоит из сцинтиллятора размером 124x124x10 мм<sup>3</sup>, к которому приклеены два световода из плексигласа. В специальные щели в световодах вставляются силиконовые фотоумножители - SiPM площадью 6x6 мм<sup>2</sup>, которые на оптической замазке прижимаются к световоду пластиковыми винтами. Общий вид годоскопа представлен на рисунке 4.1.1.:



Р и с у н о к 4.1.1. *О б щ и й в и д г о д о с к о п а ANTI-0.*

дефекты: разрывы линий или, наоборот, замыкания. Все дефектные компоненты были заменены на полноценно функционирующие.

## **4.2. Эксперимент NA64 (SPS CERN)**

### **Система контроля и сбора данных.**

Дальнейшее усовершенствование автоматической системы контроля и мониторинга параметров такой многофункциональной установки, какой является установка NA64 (рисунок 4.2.1), необходимо для предотвращения аварий и поломок оборудования, влекущих за собой как потерю средств, необходимых для устранения поломки, так и потерю времени набора статистического материала.



Рисунок 4.2.1. Установка NA64 на канале H4.

Основной целью создания системы сбора данных и автоматической системы контроля и блокировки узлов установки являются: проверка и контроль низкошумящей электроники, используемой для считывания информации с детекторов NA64, особенно узлов, связанных с работой системы калориметров, контроль состояния магнитного спектрометра и электроники камер, контроль состояния системы высокого напряжения калориметров.

Мониторинг установки осуществлялся путем периодического сравнения текущих показаний и контрольных значений параметров с возможностью вывода информации по любому детектору или узлу установки на дисплей, а также с записью информации на диск. При наличии отклонений от предусмотренных спецификацией параметров система контроля либо оповещала систему блокировки о необходимости произвести аварийную остановку набора данных, либо самостоятельно, как это было предусмотрено, например, в случаях нарушения вакуума, отключала высокое напряжение и закрывала соответствующие вакуумные затворы установки. Разработка и внедрение такой системы контроля и блокировки позволило существенно повысить эффективность работы установки и избежать поломок дорогостоящего оборудования. Так, например, в течение сеанса 2018 г. система произвела несколько автоматических отключений узлов, вызванных необходимостью устранения поломок.

### 4.3. Эксперимент CMS

#### Работы по модернизации электромагнитного калориметра

В 2019 г. группой ИЯИ РАН проводились работы по модернизации электромагнитного калориметра в рамках Фазы II. Были проведены испытания новых образцов электронных устройств для системы сбора данных при работе калориметра. Были также проведены работы по подготовке экспериментального оборудования для испытаний и калибровки модернизированных модулей электромагнитного калориметра CMS.

Основные результаты проделанной работы по подготовке оборудования заключаются в следующем: проведена полномасштабная инспекция подвижной платформы для размещения модуля электромагнитного калориметра при проведении пучковых испытаний (рисунок 4.3.1), а также подготовлено предложение по модернизации системы управления платформой.



Рисунок 4.3.1. Подвижная платформа для размещения модуля электромагнитного калориметра.

Подготовлен модуль для размещения пучковых счётчиков, а также технический проект и конструкторская документация (в сотрудничестве с ИФВЭ) для новой системы пучковых счётчиков на основе сцинтилляционных детекторов. Разработана методика изготовления

светопроводов из органического стекла для данной системы, изготовлены первые экспериментальные образцы.

### **Работы по модернизации адронного калориметра**

Для центральной части адронного калориметра установки CMS были собраны модули считывания и калибровочные модули новой считывающей и регистрирующей электроники на основе КФЭУ.

В рамках контроля качества собранных модулей были проведены многочисленные тестирования: проверка оптических подключений, проверка электрических подключений, тестирование работы элемента Пельтье для поддержания заданной температуры, работы системы впрыска сухого воздуха и датчика влажности КФЭУ, работы плат контроля напряжения смещения КФЭУ, плат считывания сигнала, наличие замыканий и неправильного подключения плат монтажа КФЭУ, гибких кабелей, плат управления КФЭУ и т. д.

После контроля качества собранные блоки и калибровочные модули отправлялись на стенд долговременного тестирования (рисунок 4.3.2), состоящий из 12 боксов считывания, где каждый блок работал в течение минимум нескольких недель. Бокс считывания состоит из четырех блоков считывания, одного калибровочного модуля, двух контрольных модулей, а также задней платы, платы ввода низкого питания и платы ввода напряжения смещения. Так как в центральной части адронного калориметра 36 боксов считывания, а в стенде долговременного тестирования только 12, все компоненты были разбиты на три группы. Ежедневно проводилась проверка на предмет наличия нештатной работы или отказов элементов. Также проводилась предварительная настройка положения пьедесталов чипов QIE и коэффициентов усиления КФЭУ с помощью света низкой интенсивности от светодиодов в калибровочных модулях. Также проверялась работа блоков считывания и калибровочных модулей при работе светодиодов на высокой интенсивности и при подключении УФ-света от лазера в специальные входы на калибровочном модуле.



Рисунок 4.3.2. Общий вид стенда для долговременного тестирования.

В процессе начальной проверки блоков считывания после их сборки обнаружилось, что некоторые гибкие кабели, платы монтирования КФЭУ и платы управления КФЭУ имеют дефекты: разрывы линий или, наоборот, замыкания. Все дефектные компоненты были заменены на полноценно функционирующие.

## 5. Участие сотрудников ИЯИ РАН в экспериментах: эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино, эксперимент E36 (Япония), эксперимент NOVA, эксперимент GERDA (Задача №5)

### 5.1. Эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино

В 2019 г. в эксперименте ОКА было выполнено наиболее точное измерение разности векторного и аксиально-векторного форм  $FV-FA$  в распада  $K^+ \rightarrow \mu + \nu \mu \gamma$  на основе анализа  $95 \times 10^3$  событий  $K^+ \rightarrow \mu + \nu \mu \gamma$ . Результат:  $FV-FA = 0.134 \pm 0.021(stat) \pm 0.027(syst)$ . Также было зарегистрировано 450 событий распада  $K^+ \rightarrow \pi + \pi^- \pi^+ \gamma$  с энергиями фотона более 30 МэВ. Определена вероятность распада  $K^+ \rightarrow \pi + \pi^- \pi^+ \gamma$ , с  $E^* \gamma > 30$  MeV  $(0.71 \pm 0.05) \times 10^{-5}$ . Результат сравнивается с предсказание киральной пертурбативной теории.

### 5.2. Эксперимент E36 (Япония)

В 2019 году были выделены SD  $Ke2\gamma$  события. Предварительный результат вероятности распада на  $3\sigma$  отличается от результата KLOE's. Проведен анализ данных по тесту мю-е

универсальности. Получено, что основным физическим фоном являются радиационные распады мюона.

### **5.3. Эксперимент NOVA**

В эксперименте NOVA в результате набора статистики в дальнем детекторе зарегистрировано 27 событий (ожидаемый фон 10 событий), от взаимодействия электронных антинейтрино, которые появились в пучке мюонных антинейтрино из-за осцилляций. Впервые такие переходы были зарегистрированы с достоверностью 4.4 стандартных отклонения. Также было зарегистрировано 102 события от взаимодействия мюонных антинейтрино. В результате анализа спектров мюонных и электронных событий, как функций параметров, угла смешивания  $\theta_{23}$  и фазы нарушения CP-инвариантности  $\delta_{CP}$  получены доверительные интервалы со статистической значимостью  $1\sigma$  для значений этих параметров при нормальной иерархии масс нейтрино. Данные предпочитают нормальную иерархию масс нейтрино с достоверностью  $2\sigma$ .

### **5.4. Эксперимент GERDA**

В конце 2019 года в эксперименте GERDA достигнута экспозиция 82,4 кг·лет и набор экспериментальных данных прекращён. Получен нижний предел на период полураспада двойного безнейтринного бета распада германия-76  $T_{1/2} > 0.9 \times 10^{26}$  лет (90% уровне достоверности). Этот результат опубликован в 2019 году в журнале Science.

Смонтирована в лаборатории Гран-Сассо (Италия) установка по очистке отходов обогащённого германия (рис.5.4.1), образовавшихся при изготовлении германиевых детекторов эксперимента GERDA. Технология очистки была разработана в России. В 2019 году произведена очистка имеющихся отходов. Из полученного материала будут изготовлены новые детекторы для эксперимента LEGEND-200, который является продолжением эксперимента GERDA.



Рис.5.4.1. Общий вид установки, расположенной в химической лаборатории Гран-Сассо (Италия).

## **6. Исследования по физике фотоядерных взаимодействий и по ядерной физике промежуточных и высоких энергий (Задача №6)**

### **6.1. Методология выполнения исследования**

В 2019 г. в эксперименте А2 на ускорителе МАМИ (Германия) с участием ученых из ИЯИ РАН выполнены прецизионные (точность лучше 3%) измерения спиновой асимметрии фоторасщепления дейтрона в районе обнаруженного ранее в нуклон-нуклонном рассеянии шестикваркового состояния дейтрона  $d^*(2380)$ . Анализ данных указывает на преимущественное возбуждение  $d^*(2380)$  посредством МЗ перехода, что свидетельствует о его малой квадрупольной деформации.

В 2019 г. на канале РАДЭКС линейного ускорителя ИЯИ РАН исследована реакция  $n + 2H \rightarrow n + n + p$  при энергии нейтронов 60 МэВ. Для определения энергии виртуального  $np$ -состояния  $E_{np}$  и связанной с ней величины длины рассеяния  $a_{np}$  проведен кинематически полный эксперимент. Для определения энергии виртуального  $np$ -уровня  $E_{np}$  (длины рассеяния  $a_{np}$ ) экспериментальная зависимость выхода реакции  $nd$ -развала сравнивается с результатами моделирования, зависящими от  $E_{np}$ . Было получено значение  $a_{np} = -16.3 \pm 0.5$  Фм.

## **6.2. Результаты исследований**

Были получены ряд фундаментальных результатов. Выполнены прецизионные (точность лучше 3%) измерения спиновой асимметрии фоторасщепления дейтрона. Измерена длина нейтрон-нейтронного рассеяния  $a_{nn} = -16.3 \pm 0.5$  Фм.

## **7. Фундаментальные и прикладные исследований в области нейтронной физики (Задача № 7)**

Собрана и подготовлена к испытаниям новая мишень нейтронного источника с бериллиевыми отражателями. Дано сравнение и показаны основные отличия условий трансмутации минорных актиноидов в ADS, в термоядерном источнике нейтронов и быстрых реакторах. Продолжены работы по увеличению среднего времени жизни мишеней ADS и размножающихся нейтронных источников с использованием вращающихся мишеней. Создана математическая модель нейтронного спектрометра по времени замедления в свинце с регулируемыми параметрами функции отклика. Разработаны и изготовлены вакуумные элементы для детектора установки «Горизонт».

## **8. Новые результаты по физике элементарных частиц, ядерной физики и нейтринной астрофизике (Задача № 8)**

### **8.1. Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа.**

В качестве Нового большого сцинтилляционного жидкостного детектора (в частности, Нового баксанского нейтринного телескопа) для регистрации нейтринных потоков от различных природных источников были рассмотрены детекторы двух типов в зависимости от цели. Если требуется определить количество урана и тория в Земле вместе с местами наибольшего их содержания (кора, мантия, ядро), то в качестве детектора геонейтрино предлагается использовать жидкосцинтилляционный детектор объемом от несколько килотонн до нескольких десятков килотонн. Объем детектора определяется необходимой статистикой регистрируемого эффекта. Проведенное моделирование показало, что 25 кт·лет измерений достаточно, чтобы сделать выводы о количестве урана и тория в Земле о их распределении внутри. При определении содержания калия ( $^{40}\text{K}$ ) можно использовать относительно небольшой детектор 300-500 т. типа детектора Bogerino.

Однако фон от в таком детекторе должен быть дополнительно понижен по сравнению с фоном, достигнутым детектором Bogexino. Это относится в первую очередь к фону от внутренней оболочки детектора, к фону от висмута и от изотопа  $^{11}\text{C}$ , возникающего от взаимодействия космических мюонов с атомными ядрами сцинтиллятора.

Для обнаружения потока калиевых геоантинейтрино необходимо знать величину потока CNO солнечных нейтрино, события от которых накладываются на спектр от калиевых геоантинейтрино. Чтобы разделить события от этих источников желательно иметь независимое измерение CNO нейтрино, которое может быть выполнено при помощи специального детектора на базе индия. Аналогичный детектор разрабатывался в 1990-2000х годах Р.Рагаваном.

На БНО ИЯИ РАН создается малоформатная установка для измерения концентрации изотопа  $^{14}\text{C}$  в жидких углеводородах, которые являются основой для низкофоновых сцинтилляторов. Проведены первые тестовые измерения. Проведены измерения концентрации  $^{14}\text{C}$  для ряда растворителей, в том числе на основе линейного алкилбензола объемом 1.36 л. Двумя методами анализа были получены результаты, совпадающие в пределах экспериментальной погрешности, результат  $(5.5 \pm 1.1) \times 10^{-16}$  и  $(3.2 \pm 1.0) \times 10^{-16}$  ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ).

Проводятся работы по модернизации детектора. Закуплены комплектующие для создания системы дистанционного залива/слива сцинтиллятора и барботирования азотом.

Разработана модель фона детектора, используемого для измерений концентрации  $^{14}\text{C}$ . Проводится работа по более точному моделированию процесса регистрации фотонов в детекторе. Создана оптическая модель детектора. Модель фона для детектора включает 8 компонент и учитывает, что фон естественной радиоактивности не находится в равновесии продуктов распада в цепочках. На рис. 8.1.1. показано измерение за 322.9 часа. Модель фонов очень хорошо описывает представленное измерение.

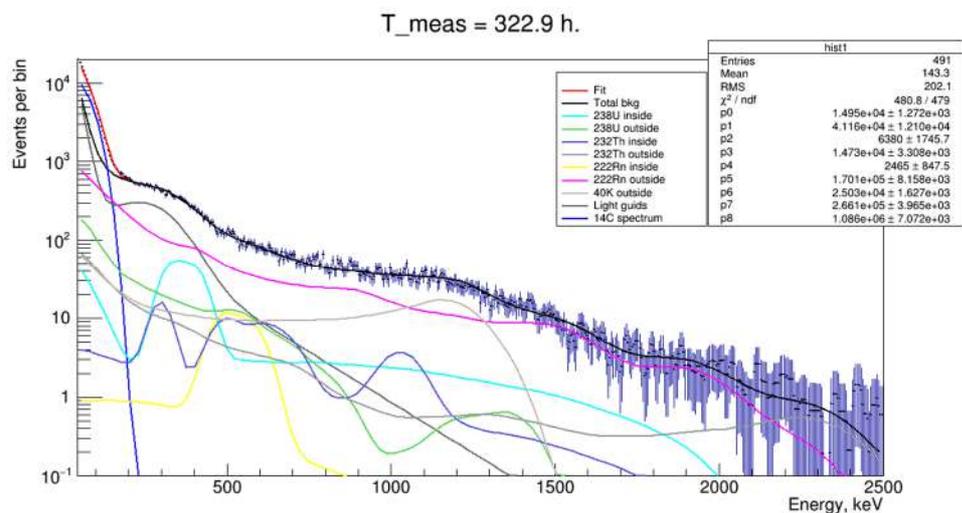


Рис. 8.1.1. Рисунок 1 - Измерения образца сцинтиллятора на основе ЛАБ китайского производства за 322.9 часа. Точки с погрешностью – эксперимент. Показаны вклады от фонов детектора.

Подгонка фонами измеренного спектра позволяет определить загрязненность сцинтиллятора. Содержание урана и тория определялось путем подгонки измеренного спектра модельными спектрами фона. Внутренний фон от урана обрывается изотопом  $^{234}\text{U}$ , так как период полураспада следующего за ним  $^{230}\text{Th}$  составляет 75400 лет, и последующие продукты не успели накопиться за время после очистки сцинтиллятора (примерно 3-4 года). Для ядер урана получается концентрация равная  $2.2 \times 10^{-13}$  г/г, для тория -  $1.3 \times 10^{-13}$  г/г.

Другой метод – метод измерения парных событий от продуктов цепочки  $^{232}\text{Th}$   $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  во временном окне 3334 нс, что равняется 10 периодам полураспада  $^{212}\text{Po}$ . При этом первые 450 нс выработывалась блокировка для исключения послеимпульсов. Тогда эффективность регистрации событий пары  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$  составляет 0.648. За 322.9 часов было зарегистрировано 5 событий в районе пика от альфа-частиц  $^{212}\text{Po}$ . Это приводит к величине  $1.7 \times 10^{-12}$  г/г для содержания  $^{232}\text{Th}$ . Различие в один порядок величины объясняется тем, что метод подгонки спектра фона не является точным и может рассматриваться как приближительный.

Произведённый анализ полученных данных малоформатной установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора выявил необходимость её модернизации с целью повышения чувствительности. Разработаны мероприятия по её модернизации.

## 8.2. Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах нейтрино БПСТ, АСД и LVD

Основная цель экспериментов LVD и АСД – поиски нейтринного излучения от коллапсов звезд. По этой программе LVD работает с 1992 года, АСД – с 1977 года.

Детектор LVD (Large Volume Detector) [12], расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) на глубине  $\langle H \rangle = 3650$  м.в.э., состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами  $100 \times 100 \times 150$  см<sup>3</sup>, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита  $C_nH_{2n}$ ,  $n = 9.6$ . Они размещены по 8 штук в стальных несущих модулях, которые сгруппированы в 7 горизонтальных слоёв и образуют вертикальные колонны. Детектор LVD состоит из 3 башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по 5 колонн в каждой. Масса железа и сцинтиллятора в установке по 1 кт. Эффективность детектора LVD при обнаружении сверхновых составляет более 95% для расстояний менее 25 кпк, когда активная масса детектора превышает 300 т (Рис. 8.2.1).

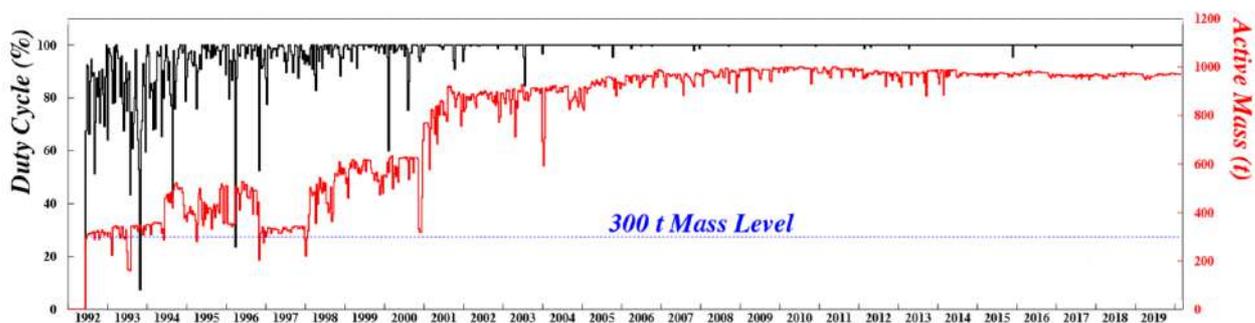


Рис. 8.2.1. Рабочее время LVD (черная кривая) и активная масса (красная) как функция времени с 1992 по 2019 гг.

Детектор АСД Артемовский Сцинтилляционный Детектор [13] - расположен в соляной шахте на глубине 570 м в.э. Масса мишени детектора равна 105 тоннам сцинтиллятора и 1000 тоннам окружающей детектор соли (NaCl). Детектор имеет цилиндрическую форму, диаметр  $(556 \pm 3)$  см, высота 547 см. Высота столба сцинтиллятора 540 см, плотность – 0.78 г/см<sup>3</sup>.

Установки LVD и АСД способны регистрировать нейтрино всех типов по реакциям взаимодействия с ядрами веществ, входящих в её структуру – водородом, углеродом, железом. По методам, разработанным в ИЯИ РАН, ведется поиск нейтрино в «он-лайн» и «офф-лайн» режимах. Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме он-лайн осуществляется во временном окне  $\Delta t < 20$  секунд с энергией импульсов выше пороговой  $E_{th} > 4$  МэВ. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и

эффективности регистрации позитрона. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме он-лайн посылаются в систему SNEWS [14]. LVD активно работает в этой системе и посылает свои данные в режиме он-лайн с 2005 года. За время существования системы SNEWS сигнала-оповещения не производилось. Детектор АСД еще не оснащен такой же системой для выработки сигнала для SNEWS.

Поиск кластеров нейтринных событий офф-лайн осуществляется как для LVD, так и для АСД. В течение временного окна с длительностью  $\Delta t$  до 100 с шагом 100 мс анализируются кластер с характерным  $\Delta t$  и количеством событий внутри  $\Delta t$ . Для каждого кластера, определяется частота имитации  $F_{im}$ . За период с 1992 по 2019 год ни один из обнаруженных кластеров не имеет частоты имитации менее  $1/100 \text{ г}^{-1}$ . По данным работы нейтринного телескопа LVD за 27 лет работы, получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 11.7 г. на 90% уровне достоверности. За 42 год работы детектора АСД получено ограничение на частоту гравитационных коллапсов менее, чем одно событие за 18.2 года на 90% доверительном уровне ( $f_{col} < 0.055 \text{ года}^{-1}$ ). Живое время работы детектора на сегодняшний день составляет 80%. За 42 год наблюдений за нашей галактикой антинейтринных вспышек обнаружено не было.

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации на БПСТ. Полное живое время работы установки в 2019 году (с 01.01 по 29.12) составило 8265 часов (94.9% календарного времени).

За 2019 был отремонтировано 61 сцинтилляционный счетчик, настроены пороги дискриминаторов и коэффициенты усиления у 96 счетчиков, заменен 1 ФЭУ. Было сделано контрольное измерение коэффициентов усиления ФЭУ (с подстройкой в случае необходимости) у 400 счетчиков. Измерение показало, с учетом периода полураспада радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$ , который используется при настройке, высокую степень стабильности коэффициентов усиления. Проводились работы по поддержанию работоспособности системы сбора информации БПСТ, в том числе проверка работоспособности одного из сумматоров сотни для 5-й плоскости ПСТ и его ремонт, ремонты годоскопа импульсных каналов (ГИК) и годоскопа амплитудных каналов (ГАК), ремонт многоканальной измерительной системы (МИС).

Продолжался набор экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. В 2019 году чистое время регистрации по нейтринной программе составило 7817 часа, было зарегистрировано 53 мюонных нейтрино из нижней полусферы.

Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года по 31.12.2019 составляет 292445 часов (33.3 года, 81.4 % от календарного). Всего за это время было зарегистрировано 1757 нейтрино. На рисунках 8.2.2 и 8.2.3. приведены распределения зарегистрированных нейтринных событий по склонению и по галактической широте.

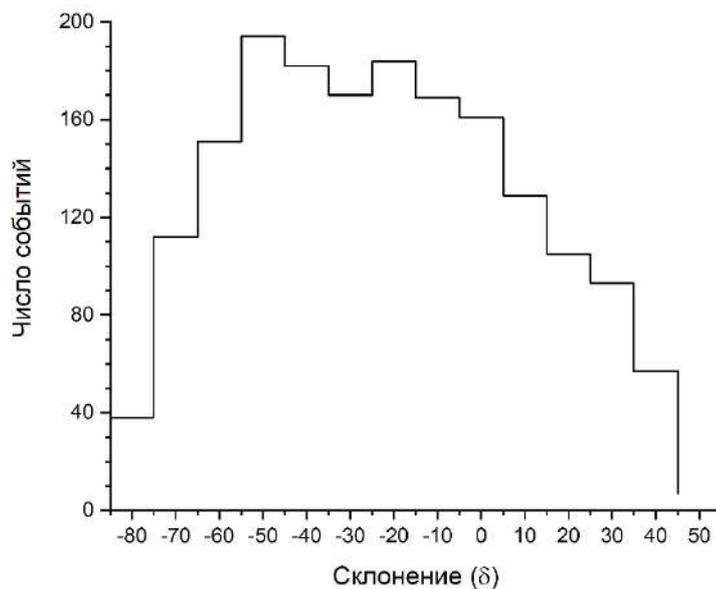


Рис. 8.2.2. Распределение всех зарегистрированных на БПСТ мюонных нейтрино из нижней полусферы по склонению.

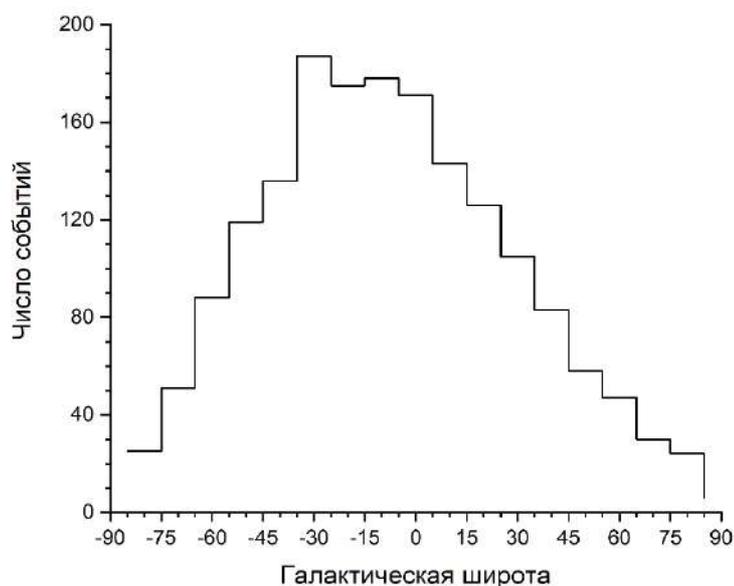


Рис. 8.2.3. Распределение всех зарегистрированных на БПСТ мюонных нейтрино из нижней полусферы по галактической широте.

Проведен поиск мюонных нейтрино и антинейтрино с энергией выше 1 ГэВ в совпадении с гравитационно-волновым событием GW170817. Это событие, зарегистрированное 17 августа 2017 года обсерваториями Advanced LIGO и Advanced Virgo, является первым зарегистрированным событием такого типа от слияния нейтронных звезд в двойной системе. Короткий гамма-всплеск GRB 170817A от этого события

свидетельствует об ускорении частиц в источнике. Точное положение источника было определено с помощью регистрации последующего сигнала в оптическом диапазоне. На рис. 26 обозначено положение события GW170817 в локальной системе координат ( $H$ ,  $Az$ ), где  $H$  – угол возвышения над горизонтом,  $Az$  – азимутальный угол, отсчитываемый от направления на юг, и приведена траектория источника в течение первых суток после регистрации гравитационно-волнового события. В течение  $\approx 9$  часов в сутки источник находится над горизонтом, минимальная толщина вещества для этих направлений составляет  $\approx 10^6$  г/см<sup>2</sup>. Для грунта в расположении телескопа данная толщина соответствует пробегу мюонов с энергией  $\approx 10^5$  ГэВ. Поиск мюонных нейтрино от GW170817 проводился в круге радиусом  $5.0^\circ$ . Для временного интервала  $\pm 500$  с относительно слияния не было зарегистрировано ни одного события, что находится в согласии с ожидаемым числом фоновых событий от мюонов космических лучей. В течение последующих после GW170817 14-и суток из области нахождения источника было зарегистрировано 3 мюонных события, что также находится в согласии с ожидаемым числом фоновых событий (2.6) от мюонов космических лучей. Все зарегистрированные события пришли из верхней полусферы при углах возвышения от  $6^\circ$  до  $23^\circ$ .

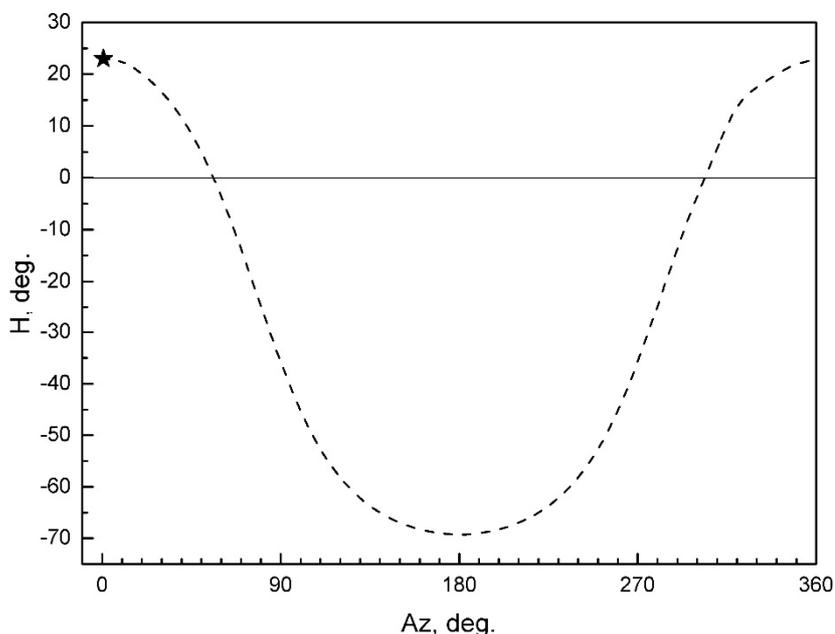


Рис 8.2.4. Положение события GW170817 (звездочка) и траектория источника в локальной системе координат ( $H$ ,  $Az$ ) в течение первых суток после регистрации.

Из факта отсутствия нейтринных сигналов от источника в интервале  $\pm 500$  с были поставлены верхние пределы (на 90% доверительном уровне) на интегральные потоки

мюонных нейтрино и антинейтрино, в зависимости от их энергии, для моноэнергетического спектра. В предположении степенного спектра с показателем  $-2$  получены верхние пределы на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино от GW170817 для диапазона энергий  $1 \text{ ГэВ} - 10^5 \text{ ГэВ}$  (рис. 8.2.5.).

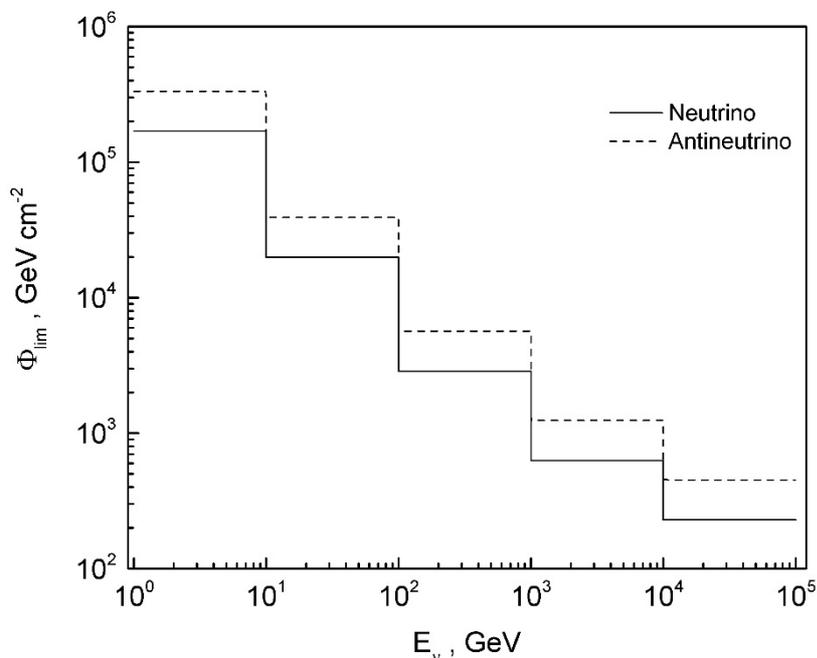


Рис.8.2.5. Верхние пределы на потоки энергии от GW170817 во временном интервале  $\pm 500 \text{ с}$ .

По информации БПСТ за 2019 год проведён поиск нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд, чистое время набора по этой задаче составило 343.6 суток – 94.1 % от календарного времени за период с 01 января 2019 по 31 декабря 2019 года.

БПСТ состоит из 8 плоскостей, на которых расположены 3184 сцинтилляционных счетчика. Метод регистрации нейтринного излучения основан на регистрации антинейтрино в реакции обратного бета-распада. Т.к. средняя энергия позитрона  $\approx 15 \text{ МэВ}$ , то, как правило, будет срабатывать только один счетчик на установке. Ожидаемое событие от коллапса звезды должно выглядеть в установке как серия (кластер) одиночных срабатываний счетчиков (событие "1 из 3200" на БПСТ) в течение времени нейтринной вспышки (предполагаемая длительность которой составляет 10 – 20 секунд). Поэтому для поиска нейтринной вспышки от коллапсирующей звезды используется метод поиска кластера одиночных срабатываний счетчиков на установке в скользящем окне длительностью 20 секунд. Т.к. используется скользящее от события к событию окно, то при

такой обработке всегда имеется хотя бы одно событие в кластере, и сгусток событий, вызванный нейтринной вспышкой, гарантированно не будет пропущен. В настоящее время для поиска нейтринной вспышки, кроме 1200 сцинтилляционных счетчиков внутренних плоскостей (детектор Д1), также используются 1030 сцинтилляционных счетчиков на внешних плоскостях (детектор Д2). Совместная работа детекторов Д1 и Д2 позволяет уменьшить порог по числу событий в кластерах в Д1 и, следовательно, увеличить радиус чувствительности БПСТ при поиске событий от взрывов Сверхновых с коллапсом ядра.

Проведена обработка всей набранной в 2019 году информации, обработано 488499111 события. Из этих событий отобраны одиночные события для двух детекторов Д1 и Д2 – 576275 событий для Д1, 3410189 для Д2. При обработке в обязательном порядке проверяется предыстория каждого одиночного события в Д1, для поиска возможной генетической связи последующих одиночных событий с предшествующим каскадом. В 2019 году одиночные события после каскадов не создали кластеры множественности  $m \geq 5$ , то есть ложный алерт для регистрации вспышки Сверхновой по этой причине исключен. В целом, критерии отбора событий позволяют контролировать работу установки и избегать создания ложного алерта о регистрации кластера большой множественности. Претендентов на кластер нейтринных сигналов от коллапсирующих звёзд по экспериментальным данным 2019 года не было обнаружено.

На рис. 8.2.6. показаны экспериментальные и расчетные распределения фоновых событий по множественности в детекторе Д2, при фиксированной множественности кластера в Д1 –  $m_1=4$ ,  $m_1=5$ . В детекторе Д1 скользящее временное окно равно 20 секундам, в Д2 – фиксированное окно 10 секунд (данные за 2001 – 2019 годы, чистое время 15.5 лет).

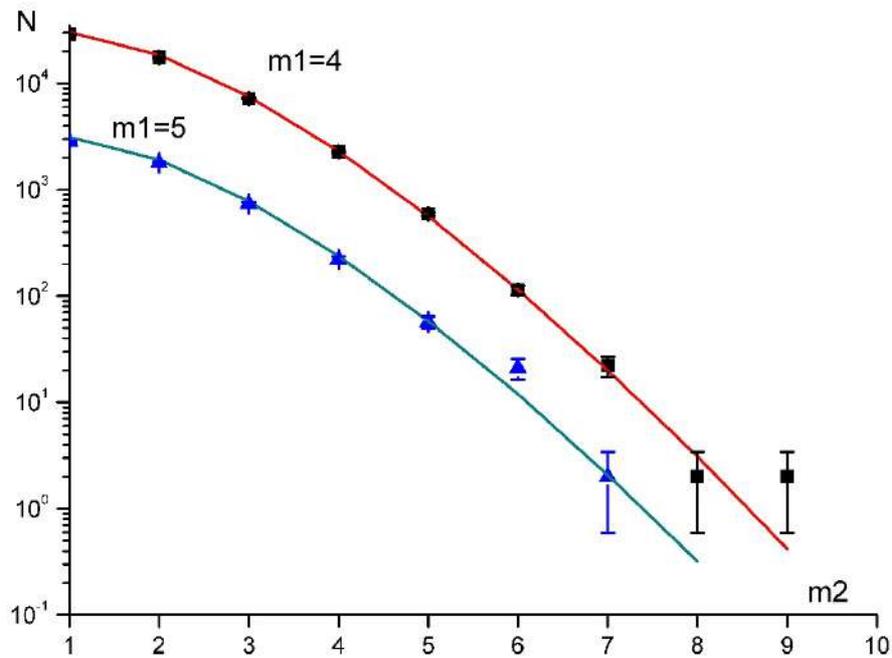


Рис. 8.2.6. Распределение кластеров по множественности  $m_2$ , при фиксированной множественности кластеров в Д1  $m_1=4$ ,  $m_1=5$ , по данным за 2001 – 2019 годы.

На рис. 8.2.7. показаны распределения фоновых событий по множественности  $m_1$  (для детектора Д1) в скользящем временном окне, равном 20 секундам и 10 секундам. Использовался тот же набор данных за 2001-2019 годы.

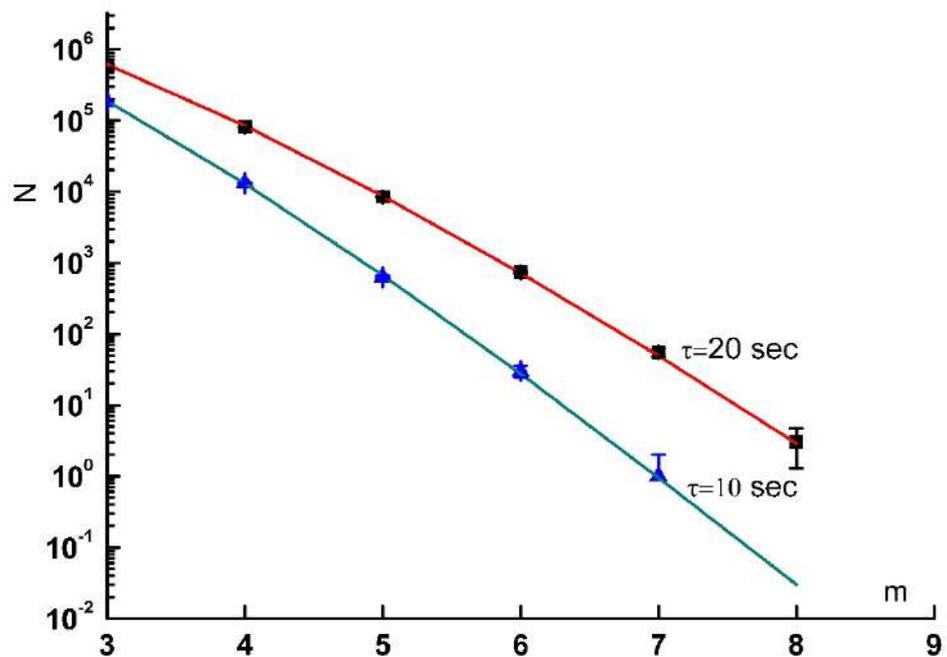


Рис. 8.2.7. Распределение кластеров по множественности  $m$ , 2001- 2019 год,  $dt=20$  сек и 10 сек

Чистое время наблюдения с 30 июня 1980 года по 31 декабря 2019 года составляет 33.95 года, верхнее ограничение на среднюю частоту коллапсов в Галактике на 90% доверительном уровне по данным БПСТ составляет  $0.0678 \text{ год}^{-1}$ .

### **8.3. Поиск совпадений в детекторах БПСТ и LVD во время гравитационного сигнала от источника GW170817**

Экспериментальное подтверждение существования гравитационных волн побудило различные научные группы, занимающиеся исследованиями в области нейтринной астрофизики, более пристально исследовать данные по детектированию нейтринного излучения в окрестности времени регистрации гравитационных волн. Поиск различных типов нейтрино от гравитационно-волнового события GW170817 [15], зафиксированный 17 августа 2017 года в 12:41:04 UTC был проведен в широком диапазоне энергий (от 0.5 МэВ до  $\sim 2.5 \times 10^{10}$  ГэВ) на нейтринных телескопах ANTARES, БПСТ и IceCube, ливневой установке Pierre Auger, детекторах Borexino, SuperKamiokande [20]. Анализ данных показал отсутствие статистически значимых результатов, свидетельствующих о регистрации нейтрино.

Поскольку заранее неизвестно, какие импульсы в детекторе являются следствием взаимодействия нейтрино (антинейтрино) с веществом детектора, а какие импульсы являются фоном, то метод поиска нейтринной вспышки базируется на поиске редкой комбинации импульсов. Такой комбинацией является серия импульсов с малой частотой образования фоном (статистически значимое событие). Средняя частота образования серии фоном рассчитывается исходя из средней скорости счёта импульсов в детекторе. В случае достаточной интенсивности потока нейтринного излучения, кластеры импульсов будут зарегистрированы одновременно во всех детекторах нейтрино. Однако по мере удаления источника нейтринного излучения, вероятность регистрации детектором статистически значимого события уменьшается. Одновременная регистрация совпадений одиночных импульсов в двух и более детекторах может являться следствием взаимодействия в них нейтрино от одного источника. Подобный анализ проводился после регистрации нейтринного излучения от SN1987A, в ходе которого было обнаружено превышение совпадений одиночных импульсов в детекторах LSD и БПСТ [22, 23]. Превышение совпадений наблюдалось вблизи времени регистрации нейтринной вспышки 2:52 UT 23 февраля 1987 года детектором LSD.

Детекторы LVD и БПСТ состоят из сцинтилляционных счетчиков – контейнеров, заполненных жидким сцинтиллятором. Энергетический порог в LVD составляет 5 МэВ, в БПСТ – 8 МэВ. Порядок отбора событий (одиночных импульсов) в детекторах одинаков: требуется срабатывание только одного счётчика во всей установке. При анализе событий в БПСТ использовались данные внутренних счетчиков, образующих три нижние горизонтальные плоскости детектора. В LVD смотрели все счетчики. Кроме этого, в LVD после триггерного импульса (срабатывания) каждого счётчика фиксируются энерговыделения выше 0.5 МэВ в течение 1 мс. Это гамма-кванты от захватов протонами или ядрами железа нейтронов, рождённых в реакциях обратного бета-распада:  $[\nu_e + p \rightarrow e^+ + n]$ .

После отбора одиночных импульсов в обоих детекторах проводился отбор счётчиков по их скорости счёта. Из анализа исключались счётчики, скорость счёта которых оказалась существенно выше среднего темпа счёта в детекторе.

В течении 10 суток до и после 17 августа 2017 проводился поиск совпадений импульсов одиночных событий детекторов в одной секунде. Измеренная скорость счёта совпадений импульсов представлена в табл.1. Скорость счёта одиночных импульсов во всем детекторе LVD составляет  $\lambda_{LVD}=0.25 \text{ с}^{-1}$ , ( $0.06 \text{ с}^{-1}$ ,  $0.09 \text{ с}^{-1}$ ,  $0.1 \text{ с}^{-1}$  в первой Т1, второй Т2 и третьей Т3 башне LVD, соответственно). В БПСТ скорость счёта одиночных импульсов составляет  $\lambda_{БПСТ}=0.009 \text{ с}^{-1}$ . Расчётная скорость счёта совпадений представлена в табл. 4 (нижняя строка). Скорости счёта совпадений детекторов рассчитывались по формуле:  $\lambda_{\text{расч}} = 2 \times \lambda_{LVD} \times \lambda_{БПСТ} \times t$ , где  $\lambda$  – скорость счёта одиночных импульсов в детекторах LVD и БПСТ,  $t = 1 \text{ с}$  – максимальное время между одиночными импульсами.

**Таблица 2.** Скорости счёта совпадений одиночных импульсов в LVD и БПСТ.

	LVD–БПСТ	T1 LVD –БПСТ	T2 LVD –БПСТ	T3 LVD –БПСТ
$\lambda_{\text{экс}}, \text{ с}^{-1}$	0.0043	0.0010	0.0014	0.0016
$\lambda_{\text{расч}}, \text{ с}^{-1}$	0.0045	0.0011	0.0016	0.0018

На рис. 8.3.1. слева представлены совпадения в 1 секунде одиночных импульсов в LVD (для каждой башни отдельно) и БПСТ в период 10 часов до и после сигнала GW170817 (бин длительностью 500 с). Число совпадений одиночных импульсов не имеют значительных отклонений от средних значений. На рис. 8.3.1. справа представлена временная диаграмма совпадений одиночных импульсов в LVD и БПСТ в часовой окрестности регистрации GW170817. Чёрточка на временной диаграмме соответствует

одному импульсу в детекторе. На рисунке показано, в какой именно башне детектора LVD был зарегистрирован одиночный импульс.

Большинство совпадений одиночных импульсов наблюдается в третьей башне LVD. В течение 1000 с после регистрации гравитационной волны наблюдается кластер из 5 совпадений одиночных импульсов в БПСТ и Т3 LVD. Длительность кластера составляет 477 с, первое совпадение в кластере обнаружено на 266 с позже времени регистрации гравитационной волны GW170817.

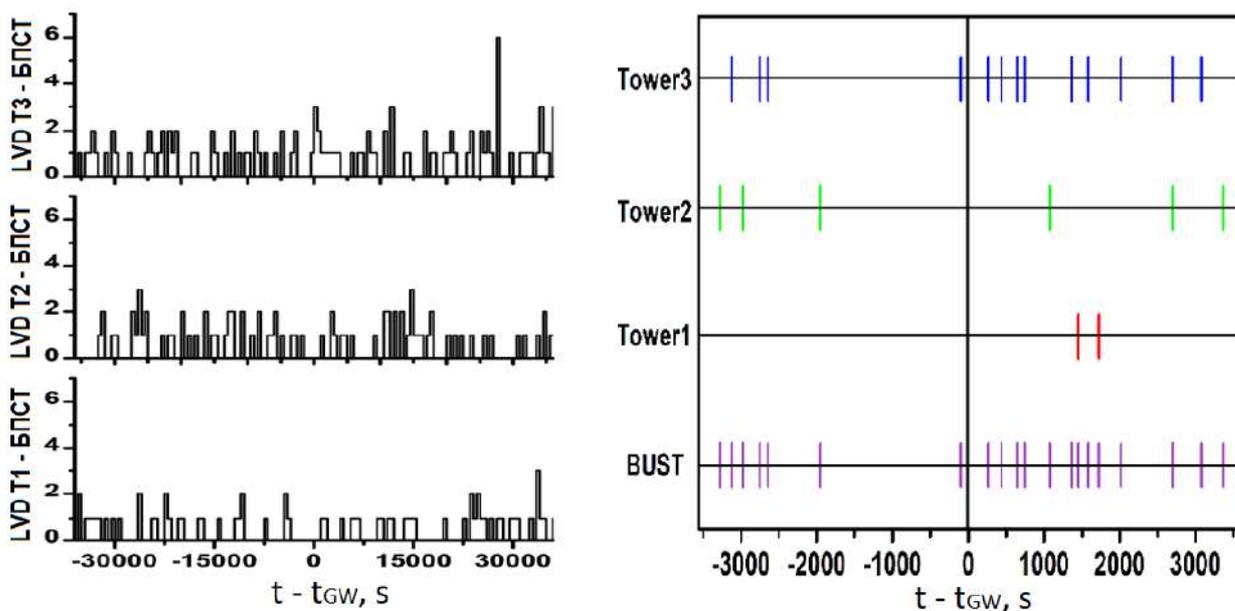


Рис. 8.3.1. Количество совпадений одиночных импульсов за 500 с в LVD и БПСТ (слева);  
Временная диаграмма единичных совпадений импульсов в LVD и БПСТ (справа).

#### 8.4. Поиск точечных источников гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок КОВЕР-2 и ТАИГА. Измерение потока (или получение ограничения на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ

Продолжалась работа по обеспечению режима непрерывного набора информации наливневой установке “Ковер-2” по всем физическим задачам. На качество и объем набранной информации в 2019 году отрицательно повлияли плановые и незапланированные отключения электроэнергии, в отчетном году было десять таких отключений. Проводился непрерывный мониторинг информации, по результатам которого производилась настройка и ремонт сцинтилляционных счетчиков и регистрирующей электроники. Было отремонтировано и настроено 70 логарифмических LC–преобразователей центральной части установки и 4 RC–преобразователя мюонного детектора. Были отремонтировано 12 детекторов (9 жидкостных и 3 пластических),

причиной которых явилось выхода из строя делителей и ФЭУ-49 (заменены 6 ФЭУ). Был отремонтирован годоскоп импульсных каналов (ГИК) Ковра. Для настройки коэффициентов преобразования РС-преобразователей мюонного детектора был разработан и создан специальный блок.

Чистое время набора информации составляет 96% календарного времени для задачи регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ, 95% для регистрации мюонной компоненты ШАЛ на Мюонном Детекторе (МД) и 98% – для регистрации вторичной нейтронной компоненты на нейтронном мониторе (НМ).

Регистрации электронно-фотонной компоненты ШАЛ происходит по триггеру М1, который вырабатывается при совпадении сигналов с 4-х ВП, установленных на расстояниях 30 м от Ковра, с сигналом от Ковра с порогом 150 р.ч. Частота этих событий  $1.2 \text{ сек}^{-1}$ , пороговая энергия для этих ливней  $\approx 5 \times 10^{13} \text{ эВ}$ . В настоящее время это же триггер используется для записи информации в МД, что позволяет увеличить эффективность регистрации ливней от первичных гамма-квантов. Для этого были внесены существенные изменения в триггерный блок МД. Набор информации с новым триггером МД идет с 97 дня 2018 года, чистое время набора новой серии информации составляет 448 суток. По новому набору данных получено распределение превышений над фоном по небесной сфере. Для четырех точечных источников (Mrk 421, Mrk 501, Cyg X-3 и Крабовидная туманность) получены ограничения на поток фотонов сверхвысокой энергии.

В ходе работы получены предварительные результаты поиска космических гамма-лучей очень высокой энергии с помощью данных установки Ковер-2. Благодаря мюонному детектору с площадью  $175 \text{ м}^2$ , становится возможным поиск ливней, вызванных первичными фотонами. Были изучены два набора данных: набор данных с большой экспозицией и условием триггера, позволяющие искать фотоны с энергией  $E_\gamma > 1 \text{ ПэВ}$ , и набор данных с меньшей экспозицией, но более низким порогом для гамма-излучения,  $E_\gamma > 0,3 \text{ ПэВ}$ . Результаты включают в себя верхние пределы с уровнем достоверности 95% для потоков фотонов  $\text{PeV}$  от суммированных направлений высокоэнергетических событий нейтрино IceCube. Также были представляем верхние пределы на потоки фотонов из набора из четырех предварительно определенных точечных источников: Crab, Cyg X-3, Mrk 421 и Mrk 501. Один из источников, Mrk 421, демонстрирует слабое превышение сигнала над фоном в обоих независимых наборах данных установки; его происхождение еще предстоит выяснить. Крабовидная туманность тоже демонстрирует незначительное превышение сигнала над фоном при переходе ко второму набору данных, и будет подвергнута мониторингу.

ИЯИ РАН участвовал в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ.

Произведен физический запуск второй очереди черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE. Количество оптических станций доведено до 54. Общая площадь установки составляет - 0.5 км<sup>2</sup>; энергетический порог – 80-100 ТэВ (40-50 ТэВ для гамма-квантов высоких энергий); угловое разрешение – ~0.1°. Измерен спектр первичных космических лучей в диапазоне энергий 10<sup>14</sup>-10<sup>17</sup> эВ, рис. 8.4.1.

Начаты измерения на втором атмосферном черенковском телескопе изображения TAIGA-IACT. Ведутся совместные наблюдения двух телескопов изображения TAIGA-IACT и установки TAIGA-HiSCORE за локальными источниками гамма-квантов высоких энергий. На рис. 8.4.2. представлены один из атмосферных черенковских телескопов изображения TAIGA-IACT и одна из оптических станций черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE.

По данным сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE установлен предел на диффузный поток гамма-квантов высоких энергий.

В установке Tunka-133 площадью 3 км<sup>2</sup> измерен энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей в диапазоне энергий 10<sup>15</sup>-10<sup>18</sup> эВ установки TAIGA-HiSCORE.

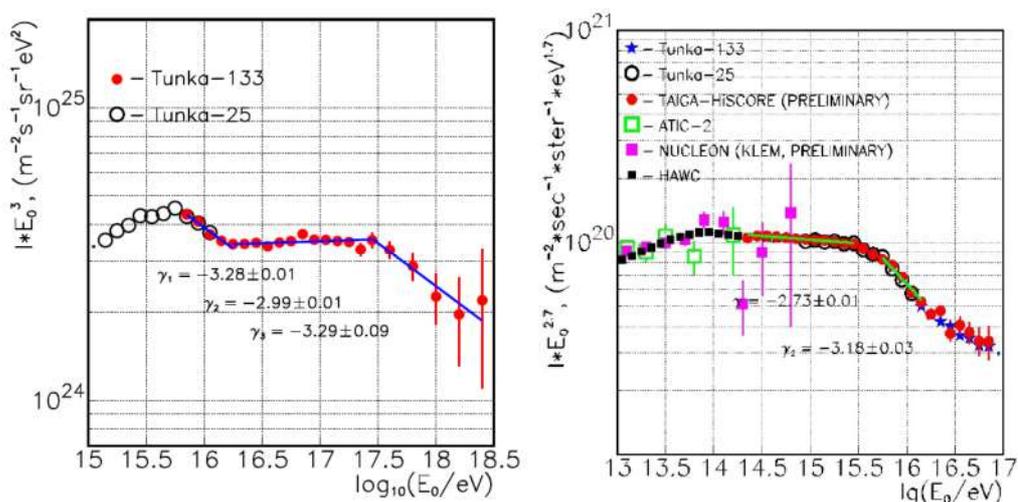


Рис.8.4.1. Энергетический спектр первичных космических лучей, измеренный на установках TAIGA-HiSCORE (слева) и Tunka-133 (справа).



Рис. 8.4.2. Один из черенковских атмосферных телескопов изображения TAIGA-IACT (слева) и одна из оптических станций черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE (справа).

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**1. Задача «Развитие Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, введение в эксплуатацию на оз. Байкал очередного кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Подготовка к экспедициям на озере Байкал».**

Завершены исследования, разработаны, скомплектованы, изготовлены и подготовлены все элементы и системы для установки следующих двух кластеров телескопа Baikal-GVD во время зимней экспедиции 2020 г.

По результатам исследований по теме Задачи 1 в 2019 году было опубликовано 4 статьи и 3 доклада на международных совещаниях и конференциях.

План работ на 2019 год выполнен полностью.

**2. Задача «Развитие экспериментальных комплексов ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН, Троицк-ню-масс и ускорительный комплекс»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Завершен первый этап эксперимента BEST по экспозиции галлиевых мишеней нейтринным источником  $^{51}\text{Cr}$  активностью  $3,41 \pm 0,02$  МКи.

По результатам исследований по теме Задачи 2 в 2019 г. было опубликовано 5 статей и два доклада на международных конференциях.

**3. Задача «Участие учёных ИЯИ РАН в международных экспериментах в международном центре CERN (Женева): эксперимент AEGIS, эксперимент NA64 (SPS CERN), эксперимент CMS, LHCb- эксперимент, эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0, эксперимент SHIP (CERN), детектор Baby-MIND, эксперимент ALICE»**

План работ на 2019 год выполнен полностью. Было опубликовано более 150 статей и сделано более 20 докладов на международных конференциях.

**4. Задача «Работы по модернизации экспериментальных установок ЦЕРН, в работе которых принимают участие российские учёные»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 4 в 2019 году было опубликовано 5 статей и три доклада на международной конференции. По материалам конференции подготовлена статья для публикации.

**5. Задача «Участие сотрудников ИЯИ РАН в экспериментах: эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино, эксперимент E36 (Япония), эксперимент NOVA, эксперимент GERDA»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 5 в 2019 году было опубликовано 2 статьи и 3 доклада на международных конференциях. По материалам конференций подготовлены статьи для публикаций.

**6. Задача «Исследования по физике фотоядерных взаимодействий и по ядерной физике промежуточных и высоких энергий»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

По результатам исследований по теме Задачи 6 в 2019 году было опубликован 1 доклад на международном совещании.

**7. Задача «Фундаментальные и прикладные исследований в области нейтронной физики»**

План работ на 2019 год выполнен полностью. Было опубликовано 3 статьи и сделано 5 докладов.

#### **8. Задача «Новые результаты по физике элементарных частиц, ядерной физики и нейтринной астрофизике»**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

#### **Поиск оптимальной конфигурации и исследование технических характеристик Нового баксанского нейтринного телескопа. Создание установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора».**

В качестве Нового большого сцинтилляционного жидкостного детектора (в частности, Нового баксанского нейтринного телескопа) для регистрации нейтринных потоков от различных природных источников были рассмотрены детекторы двух типов в зависимости от цели. В качестве важнейшей задачи рассматривалась возможность регистрации потоков солнечных CNO нейтрино и геоантинейтрино от распада изотопа  $^{40}\text{K}$  в недрах Земли. Обнаружение и исследование потоков геоантинейтрино от распада изотопа  $^{40}\text{K}$  особенно важно в связи с предсказаниями модели «Богатая водородом Земля».

Произведённый анализ полученных данных малоформатной установки для измерения содержания С-14 в образцах жидкого сцинтиллятора выявил необходимость её модернизации с целью повышения чувствительности. Разработаны мероприятия по её модернизации.

#### **«Непрерывный мониторинг вспышек сверхновых в нашей Галактике на детекторах АСД, LVD и БПСТ».**

План работ на 2019 год выполнен полностью.

В 2019 году велись исследования по поиску нейтрино от коллапсирующих звезд в детекторах LVD и АСД. Так как не было вспышек сверхновых в нашей галактике, то мы установили самое сильное ограничение на частоту вспышек в Галактике: менее 1 события за 18.2 г. на 90% уровне достоверности. Проводился поиск коррелированных событий нейтринных детекторов LVD и БПСТ во время сигнала от слияния нейтронных звезд GW170817. В течение часа около времени сигнала GW170817 увеличивается количество совпадений в БПСТ и в третьей башне LVD. Была найдена группа из 5 совпадений с продолжительностью 477 с.

На установках комплекса БПСТ поддерживался режим непрерывного набора информации всем физическим задачам, и проводились работы по модернизации установок.

Проводилась обработка и анализ экспериментальных данных, полученных на установках, и мониторинг потоков частиц космического излучения. Продолжается набор информации по программе регистрации нейтринных всплесков, получено новое ограничение на среднюю частоту гравитационных коллапсов в нашей Галактике.

**«Поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ по экспериментальным данным установок Ковер-2 и TAIGA. Измерение потока (или получения ограничений на поток) диффузного космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ».**

Были представлены первые результаты поиска первичных фотонов с энергиями  $E > 100$  ТэВ по данным установки Ковер-2.

ИЯИ РАН участвовал в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Получены и опубликованы экспериментальные данные.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Пресс-релиз. Первый кластер глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD вступил в строй на оз. Байкал. Москва, ИЯИ РАН, 19 мая 2015 г. <http://www.inr.ru>
- [2] Пресс-релиз 2019. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD увеличен с трех до пяти кластеров оптических модулей, и его эффективный объем составил  $0.25 \text{ км}^3$ . ИЯИ РАН, Москва, 19 апреля 2019 г., <http://www.inr.ru>
- [3] Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD. Статус 2019 и перспективы. Москва, 2019, <http://www.inr.ru>
- [4] Avrorin A.D. et al. A search for neutrino signal from dark matter annihilation in the center of the Milky Way with Baikal NT200 // *Astropart.Phys.* 81 – 2016 – p. 12-20 // DOI: 10.1016/j.astropartphys.2016.04.004 e-Print: arXiv:1512.01198 [astro-ph.HE]
- [5] Avrorin A.D. et al. Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo. // *JETP Lett.* 101 – 2015 - №5 - p. 289-294 // DOI: 10.1134/S0021364015050021 e-Print: arXiv:1412.3672 [astro-ph.HE]
- [6] Avrorin A.D. et al. Search for neutrino emission from relic dark matter in the Sun with the Baikal NT200 detector Baikal Collaboration. // *Astropart.Phys.* 62 – 2015 - 12-20 // DOI: 10.1016/j.astropartphys.2014.07.006 e-Print: arXiv:1405.3551 [astro-ph.HE]
- [7] K. N. Abazajian et al. Light Sterile Neutrinos: A White Paper // arXiv:1204.5379 [hep-ph], - 2012 - pp.170-175.

- [8] V.Gavrin et al. Current Status of New SAGE Project with  $^{51}\text{Cr}$  Neutrino Source. *Physics of Particles and Nuclei*. 2015. Vol.46, No.2. pp.131-137
- [9] V. N. Gavrin et al. Search for Sterile Neutrinos in Gallium Experiments with Artificial Neutrino Sources. // *Physics of Particles and Nuclei* 48 – 2017 - №6 - p. 967–969
- [10] V. Barinov et al. BEST sensitivity to  $O(1)$  eV sterile neutrino. // *Phys. Rev. D* 93 – 2016 - 073002
- [11] V. Barinov et al. Revised neutrino-gallium cross section and prospects of BEST in resolving the Gallium anomaly // *Phys. Rev. D* 97 – 2018 - 073001; arXiv:1710.06326 [hep-ph].
- [12] M. Aglietta et al. The most powerful scintillator supernovae detector: LVD // *Nuovo Cimento A* 105 – 1992 – p. 1793
- [13] V. Beresnev. et al. 100-tons scintillation detector for the registration of the antineutrino fluxes from collapsing stars in our galaxy and for high energy muon interaction studies // *Proc. XVI ICCR, Kyoto, 7 - 1979 – p. 297-298*
- [14] P. Antonioli et al., Snews: The supernova early warning system // *New journal of physics* 6 -2004 - 114.
- [15] B. P. Abbott et al. GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral // *Phys. Rev. Lett.* 119 – 2017 - 161101
- [16] A. Albert et al., Search for high-energy neutrinos from gravitational wave event GW151226 and candidate LVT151012 with ANTARES and IceCube // *The Astrophysical Journal Letters*, 850:L35 - 2017 – p.18
- [17] A. Albert et al. Search for high-energy neutrinos from gravitational wave event GW151226 and candidate LVT151012 with ANTARES and IceCube // *Phys. Rev. D* 96 – 2017 - 022005
- [18] A. Aab et al. Ultrahigh-energy neutrino follow-up of gravitational wave events GW150914 and GW151226 with the Pierre Auger Observatory // *Phys. Rev. D* 94 – 2016 - 122007
- [19] M. Agostini et al. A search for low-energy neutrinos correlated with gravitational wave events GW150914, GW151226 and GW170104 with the Borexino detector // *Astrophys. J.* 850 – 2017 - 21
- [20] K. Abe et al. Search for Neutrinos in Super-Kamiokande associated with the GW170817 neutron-star merger // arXiv:1802.04379;
- [21] В. Б. Петков и др. Поиск на БПСТ электронных нейтрино от гравитационно-волновых событий // *Письма в ЖЭТФ* 107 – 2018 - №7, с. 418 – 421
- [22] M. Aglietta, Correlation analysis of the data recorded by the Baksan, Kamioka, and Mont Blanc detectors during SN 1987A // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 1989 – p. 571 -584
- [23] A. E. Chudakov // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* – 1989 – p. 571 - 577
- [24] G Rubtsov et al. Anisotropy in the mass composition from the Telescope Array Surface Detector data. // *36th ICRC Madison Wisconsin - 2019*

- [25] D. Dzhappuev et al. Carpet-2 search for PeV gamma rays associated with IceCube high-energy neutrino events // JETP Letters 109 – 2019 - № 4.
- [26] D. Dzhappuev et al. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2 // EPJ Web Conf., 207 (2019) 03004.
- [27] D. Dzhappuev et al. Carpet results on astrophysical gamma rays above 100 TeV // // 36th ICRC Madison Wisconsin, 2019.
- [28] H.P.Dembinski et al. Report on Tests and Measurements of Hadronic Interaction Properties with Air Showers // Proceedings of UHECR2018

## ПУБЛИКАЦИИ

- 1. Развитие Байкальского глубоководного нейтринного телескопа, введение в эксплуатацию на оз. Байкал очередного кластера глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD. Подготовка к экспедициям на озере Байкал**
1. Avrorin et al., “BAIKAL-GVD: The New-Generation Neutrino Telescope in Lake Baikal”, Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 83 (2019) no.8, 921-922, Izv.Ross.Akad.Nauk Ser.Fiz. 83 (2019) no.8, 1016-1018, DOI: 10.3103/S1062873819080057.
2. Avrorin et al., “Spatial positioning of underwater components for Baikal- GVD”, EPJ Web Conf.207 (2019) 07004, 4pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920707004.
3. A.D. Avrorin et al., “Status of the Baikal-GVD Neutrino Telescope”, EPJ Web Conf. 207 (2019) 01003, 6pp. DOI: 10.1051/epjconf/201920701003.
4. A.D. Avrorin et al., “A positioning system for Baikal-GVD”, <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019.
5. A.D. Avrorin et al. “Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Future”, <https://pos.sissa.it/358/1011/pdf>, Proc. of the 36th ICRC2019. 6.1. О.В.Суворова, “Baikal and GVD”, (invited), XVIII International Workshop on Neutrino Telescopes, NEUTEL2019, 18-22 March 2019, Venice, Italy, <https://indico.cern.ch/event/768000/timetable/#20190318>, DOI:10.5281/zenodo.2703478.
6. О.В.Суворова, “GVD in Lake Baikal: status of phase-1”, (invited), Seminar in CPPM - Centre de Physique des Particules de Marseille, and meeting on the research projects KM3Net and GVD-Baikal, 24 June 2019, Marseille, France.
7. О.В.Суворова, “Recent progress of the Baikal-GVD project”, (section), The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2019), 10-17 July 2019, Ghent, Belgium, <https://indico.cern.ch/event/577856/timetable/#20190710>.
- 2. Развитие экспериментальных комплексов ИЯИ РАН, включая установки БНО ИЯИ РАН, Троицк-ню-масс и ускорительный комплекс**
8. Vladislav Barinov, Vladimir Gavrin, Valery Gorbachev, Dmitry Gorbunov, and Tatiana Ibragimova. «BEST potential in testing the eV-scale sterile neutrino explanation of reactor antineutrino anomalies». Phys. Rev. D 99, 111702.
9. Gavrin, V. N., «The history, present and future of SAGE (Soviet-American Gallium Experiment)», Solar Neutrinos Proceedings of the 5th International Solar Neutrino

Conference 5th International Solar Neutrino Conference, Dresden, Germany, 11 – 14 June 2018 (2019).

10. Гаврин В.Н., Горбачев В.В., Ибрагимова Т.В., Корноухов В.Н., Джанелидзе А.А., Злоказов С.Б., Котельников Н.А., Ижутов А.Л., Майнсков С.В., Пименов В.В., Борисенко В.П., Киселев К.В., Цевелев М.П. «О галлиевом эксперименте BEST-2 с источником Zn по поиску нейтринных осцилляций на короткой базе». *Ядерная Физика*, том 82, № 1 (2019), 78-84.
11. V V Gorbachev, V N Gavrin, T V Ibragimova, V N Kornoukhov and A A Shikhin. Experiment BEST-2 with a source of  $^{65}\text{Zn}$  on gallium target for the search of neutrino oscillations on a short baseline. *Journal of Physics: Conference Series* **1390** (2019) 012053, doi:10.1088/1742-6596/1390/1/0120531
12. J P Kozlova, E P Veretenkin, V N Gavrin, S N Danshin, T V Ibragimova, B A Komarov. Fabrication of reactor target from enriched  $^{50}\text{Cr}$  for artificial neutrino source. *Journal of Physics: Conference Series* **1390** (2019) 012100, doi:10.1088/1742-6596/1390/1/012

**3. Участие учёных ИЯИ РАН в международных экспериментах в международном центре CERN (Женева): эксперимент AEGIS, эксперимент NA64 (SPS CERN), эксперимент CMS, LHCb- эксперимент, эксперимент NA62 (CERN) – набор статистики и тест вето ANTI-0, эксперимент SHIP (CERN), детектор Baby-MIND, эксперимент ALICE»**

13. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Non-Gaussian elliptic-flow fluctuations in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  TeV // *Phys.Lett.B789*: 643--665, 2019
14. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for  $\overline{\text{t}}\text{H}$  production in the  $\text{H}\rightarrow\text{b}\overline{\text{b}}$  decay channel with leptonic  $\overline{\text{t}}$  decays in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // *JHEP* 3: 26, 2019
15. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of prompt  $\psi(2\text{S})$  production cross sections in proton-lead and proton-proton collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  TeV // *Phys.Lett.B790*: 509--532, 2019
16. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of nuclear modification factors of  $\Upsilon(1\text{S})$ ,  $\Upsilon(2\text{S})$ , and  $\Upsilon(3\text{S})$  mesons in PbPb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  TeV // *Phys.Lett.B790*: 270--293, 2019
17. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for Higgs boson pair production in the  $\gamma\gamma\text{b}\overline{\text{b}}$  final state in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // *Phys.Lett.B788*: 7-36, 2019
18. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurements of properties of the Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // *Phys.Lett.B791*: 96, 2019
19. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for supersymmetric partners of electrons and muons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // *Phys.Lett.B790*: 140--166, 2019
20. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for heavy Majorana neutrinos in same-sign dilepton channels in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // *JHEP* 1: 122, 2019

21. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of differential cross sections for Z boson pair production in association with jets at  $\sqrt{s} = 8$  and 13 TeV // Phys.Lett.B789: 19-44, 2019
22. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of differential cross sections for inclusive isolated-photon and photon+jets production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Eur.Phys.J.C79: no.1, 20, 2019
23. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Study of the underlying event in top quark pair production in  $\mathit{p}\mathit{p}$  collisions at 13 TeV // Eur.Phys.J.C79: no.2, 123, 2019
24. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of inclusive and differential Higgs boson production cross sections in the diphoton decay channel in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP 1: 183, 2019
25. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for the Higgs boson decaying to two muons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Rev.Lett. 122: no.2, 21801, 2019
26. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for dark matter particles produced in association with a top quark pair at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Rev.Lett. 122: no.1, 11803, 2019
27. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for a W' boson decaying to a  $\tau$  lepton and a neutrino in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Lett.B792: 107--131, 2019
28. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for narrow H $\gamma$  resonances in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Rev.Lett. 122: no.8, 81804, 2019
29. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for heavy resonances decaying into two Higgs bosons or into a Higgs boson and a W or Z boson in proton-proton collisions at 13 TeV // JHEP 1: 51, 2019
30. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for production of Higgs boson pairs in the four b quark final state using large-area jets in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP 1: 40, 2019
31. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for an  $L_{\mu}-L_{\tau}$  gauge boson using  $Z \rightarrow 4\mu$  events in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Lett.B792: 345--368, 2019
32. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for pair production of second-generation leptoquarks at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Rev.D99: no.3, 32014, 2019
33. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for the associated production of the Higgs boson and a vector boson in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV via Higgs boson decays to  $\tau$  leptons // JHEP 6: 93, 2019
34. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for invisible decays of a Higgs boson produced through vector boson fusion in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Phys.Lett.B793: 520--551, 2019
35. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for single production of vector-like quarks decaying to a top quark and a W boson in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // Eur.Phys.J.C79: 90, 2019

36. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Jet Shapes of Isolated Photon-Tagged Jets in Pb-Pb and pp Collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  TeV // Phys.Rev.Lett. 122: no.15, 152001, 2019
37. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Combined measurements of Higgs boson couplings in proton–proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // Eur.Phys.J.C79: no.5, 421, 2019
38. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of exclusive  $\Upsilon$  photoproduction from protons in pPb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  TeV // Eur.Phys.J.C79: no.3, 277, 2019
39. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for new physics in final states with a single photon and missing transverse momentum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // JHEP 2: 74, 2019
40. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Observation of prompt  $J/\psi$  meson elliptic flow in high-multiplicity pPb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$  TeV // Phys.Lett.B791: 172--194, 2019
41. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Measurement of  $B^0$  meson production in pp and PbPb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  TeV // Phys.Lett.B796: 168--190, 2019
42. Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for top quark partners with charge  $5/3$  in the same-sign dilepton and single-lepton final states in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV // JHEP 3: 82, 2019
43. S. Acharya, et al. Study of the Lambda-Lambda interaction with femtoscopy correlations in pp and p-Pb collisions at the LHC. PHYSICS LETTERS B 797 (2019). <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2019.134822>
44. S. Acharya, et al. Production of muons from heavy-flavour hadron decays in pp collisions at  $\sqrt{s}=5.02$  TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2019). [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP09\(2019\)008](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP09(2019)008)
45. S. Acharya, et al. Real-time data processing in the ALICE High Level Trigger at the LHC. COMPUTER PHYSICS COMMUNICATIONS 242 (2019) 25–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2019.04.011>
46. S. Acharya, et al. Measurement of the production of charm jets tagged with D-0 mesons in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV. JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS (2019). [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08\(2019\)133](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP08(2019)133)
47. S. Acharya, et al. One-dimensional charged kaon femtoscopy in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  TeV. PHYSICAL REVIEW C 100 (2019). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.100.024002>
48. S. Acharya, et al. Multiplicity dependence of (anti-)deuteron production in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV. PHYSICS LETTERS B 794 (2019) 50–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2019.05.028>
49. S. Acharya, et al. Energy dependence of exclusive  $J/\psi$  photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 79 (2019). <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6816-2>

50. S. Acharya, et al. Measurement of  $D^0$ ,  $D^+$ ,  $D^{*+}$  and  $D^s(+)$  production in pp collisions at  $\sqrt{s}=5.02$  TeV with ALICE. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 79 (2019). <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6873-6>
51. S. Acharya, et al. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment. JOURNAL OF INSTRUMENTATION 14 (2019). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/P05025>
52. S. Acharya, et al. Charged-particle pseudorapidity density at mid-rapidity in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=8.16$  TeV. EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C 79 (2019). <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-6801-9>
53. S. Acharya, et al. Measuring (KSK +/-)-K-0 interactions using pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV. PHYSICS LETTERS B 790 (2019) 22–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.12.033>
54. S. Acharya, et al. Centrality and pseudorapidity dependence of the charged-particle multiplicity density in Xe-Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.44$  TeV. PHYSICS LETTERS B 790 (2019) 35–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2018.12.048>
55. E.C. Gil, E. Minucci, S. Padolski, ..., S. Fedotov, A. Khotyantsev, E. Gushchin, ..., Yu. Kudenko, V. Kurochka, ..., A. Shaikhiev et al. / First search for  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  using the decay-in-flight technique // Phys.Lett. B791 (2019) 156-166 (arXiv:1811.08508 [hep-ex]). DOI: 10.1016/j.physletb.2019.01.067.
56. E.C. Gil, E. Minucci, S. Padolski, ..., S. Fedotov, A. Khotyantsev, E. Gushchin, ..., Yu. Kudenko, V. Kurochka, ..., A. Shaikhiev et al. / Searches for lepton number violating  $K^+$  decays // Phys.Lett. B797 (2019) 134794 (arXiv:1905.07770 [hep-ex]). DOI: 10.1016/j.physletb.2019.07.041.
57. E.C. Gil, E. Minucci, S. Padolski, ..., S. Fedotov, A. Khotyantsev, E. Gushchin, ..., Yu. Kudenko, V. Kurochka, ..., A. Shaikhiev et al. / Search for production of an invisible dark photon in  $\pi^0$  decays // JHEP 1905 (2019) 182 (arXiv:1903.08767 [hep-ex]). DOI: 10.1007/JHEP05(2019)182.
58. 1) Measurement of the  $B_c^-$  meson production fraction and asymmetry in 7 and 13 TeV pp collisions, LHCb Collaboration (R. Aaij et al.) Phys.Rev. D100 (2019) no.11, 112006.
59. 2) Search for the doubly charmed baryon  $\Xi_{cc}^{++}$ , LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.) Sci.China Phys.Mech.Astron. 63 (2020) no.2, 221062.
60. Search for the lepton-flavour violating decays  $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^- e^+ \mu^-$ , LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). Phys.Rev.Lett. 123 (2019) no.24, 241802.
61. Observation of New Resonances in the  $\Lambda_b^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  System LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.) Phys.Rev.Lett. 123 (2019) no.15, 152001.
62. Observation of the  $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872) p K^-$  decay LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.) JHEP 1909 (2019) 028.
63. Measurement of CP observables in the process  $B^0 \rightarrow DK^{*0}$  with two- and four-body D decays LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). JHEP 1908 (2019) 041.
64. Updated measurement of time-dependent  $\text{it CP}$ -violating observables in  $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$  decays LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.) Eur.Phys.J. C79 (2019) no.8, 706.

65. Precision measurement of the  $\Lambda_c^+$ ,  $\Xi_c^+$  and  $\Xi_c^0$  baryon lifetimes LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). Phys.Rev. D100 (2019) no.3, 032001.
66. Amplitude analysis of  $B^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} K^+ K^-$  decay LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.). Phys.Rev.Lett. 123 (2019) no.23, 231802.
67. Amplitude analysis of the  $B^0_{(s)} \rightarrow K^{*0} \overline{K}^{*0}$  decays and measurement of the branching fraction of the  $B^0 \rightarrow K^{*0} \overline{K}^{*0}$  decay LHCb Collaboration (Roel Aaij et al.) JHEP 1907 (2019) 032.
68. Antonello M. et al. (AEgIS Collaboration). Efficient 23S positronium production by stimulated decay from the 33P level // Phys. Rev. A 100: 063414, 2019
69. Aghion S. et al. (AEgIS Collaboration). Velocity selected production of 2 3S metastable positronium // Phys. Rev. A 99: 033405, 2019
70. Caravita R. et al. (AEgIS Collaboration). The AEgIS experiment at CERN: Probing antimatter gravity // Il Nuovo Cimento 42 C: 123, 2019
71. Khalidova O. et al. (AEgIS Collaboration). The AEgIS experiment: towards antimatter gravity measurements // Jour. of Physics: Conf. Series 1390: 012104, 2019
72. Zurlo N. et al. (AEgIS Collaboration). Monte-Carlo simulation of positronium laser excitation and anti-hydrogen formation via charge exchange // Hyperfine Interactions 240: 18, 2019

**4. Работы по модернизации экспериментальных установок ЦЕРН, в работе которых принимают участие российские учёные**

73. L.Muntenau...S.Suvorov et al. A new method for an improved anti-neutrino energy reconstruction with charged-current interactions in next-generation detectors, arXiv:1912.01511.
74. D. Attie.... S.Suvorov et al. Performances of a resistive MicroMegas module for the Time Projection Chambers, arXiv:1907.07060 to be published in NIM.
75. O. Basille...A.Mefodiev et al. Baby MIND Readout Electronics Architecture for Accelerator Neutrino Particle Physics Detectors Employing Silicon Photomultipliers. JPS Conf.Proc. 27 (2019) 011011.
76. Yu.A. Melikyan, Performance of Planacon MCP-PMT photosensors under extreme working conditions.NIM A – 2019, 61689; DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.004.
77. Amsler C. et al. (AEgIS Collaboration). A  $\sim 100 \mu\text{m}$ -resolution position-sensitive detector for slow positronium // NIM B 457: 44-48, 2019
78. Yu.Melikyan et al., Load capacity and recovery behaviour of ALD-coated MCP-PMTs. NIM A 949 (2020) 162854.

**5. Участие сотрудников ИЯИ РАН в экспериментах: эксперимент ОКА (Россия) на протонном ускорителе ИФВЭ в Протвино, эксперимент E36 (Япония), эксперимент NOVA, эксперимент GERDA**

79. Probing Majorana neutrinos with double- $\beta$  decay GERDA Collaboration (M. Agostini et al.). Sep 6, 2019. 28 pp.

Published in Science 365 (2019) 1445

DOI: 10.1126/science.aav8613. e-Print: arXiv:1909.02726 [hep-ex]

80. Modeling of GERDA Phase II data GERDA Collaboration (A. Abramov (Kurchatov Inst., Moscow) *et al.*). Sep 5, 2019. 31 pp. e-Print: arXiv:1909.02522 [nucl-ex]
81. Characterization of 30  $^{76}\text{Ge}$  enriched Broad Energy Ge detectors for GERDA Phase II GERDA Collaboration (M. Agostini (Munich, Tech. U.) *et al.*). Jan 19, 2019. 29 pp. Published in Eur.Phys.J. C79 (2019) no.11, 978  
DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7353-8. e-Print: arXiv:1901.06590 [physics.ins-det]

## **6. Исследования по физике фотоядерных взаимодействий и по ядерной физике промежуточных и высоких энергий**

82. M. Bashkanov, G.M. Gurevich *et al.* Deuteron photodisintegration by polarized photons in the region of the  $d^*(2380)$ . Phys. Let. B, 789 (2019) 7-12.
83. T. Djude, A.Lapik, V.Nedorezov *e/a/* (коллаборация BGO-OD) // Фоторождение странности в эксперименте BGO-OD (2019) Phys. Part. Nucl. 50 (2019) no.5, 493-500, DOI: 10.1134/S1063779619050113
84. Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, М. В. Мордовской, А. А. Афонин, А. А. Каспаров, В. В. Мицук. Определение энергии виртуального  $pp$ -состояния в реакции  $d+1\text{H}\rightarrow p+p+n$ . ТРУДЫ МФТИ. 2019. Том 11. № 3. С. 102-109.
85. А. А. Каспаров, А. А. Афонин, Е. С. Конобеевский, В. В. Мицук, С. В. Зуев / Кинематическое моделирование квазисвободного рассеяния дейтронов и  $\alpha$ -частиц на кластерах легких ядер // Известия РАН. Серия физическая, 2019, том 83, № 4, с. 479–481
86. Е. С. Конобеевский, А. А. Афонин, С. В. Зуев, А. А. Каспаров, В. В. Мицук, М. В. Мордовской, С. И. Поташев // Данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, извлеченные в реакции  $n + 2\text{H} \rightarrow n + n + p$  при  $E_n = 60$  МэВ // Ядерная Физика 2019, принята в печать
87. E.S. Konobeevski, A.A. Afonin, A.A. Kasparov, V.V. Mitcuk, M.V. Mordovskoy, S.I. Potashev, S.V. Zuyev // Data on neutron-neutron scattering length extracted in the  $n + 2\text{H}\rightarrow p + n + n$  reaction at 60 MeV // arXiv:1911.05450 [nucl-ex]

## **7. Фундаментальные и прикладные исследований в области нейтронной физики**

88. Pis'ma v Zhurnal Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra, 2019 Proton-Accelerator Driven High-Flux Pulsed Neutron Source for Beam Research V. Vinogradova, Yu. N. Pepelysheva, A. D. Rogova, and S. F. Sidorkin
89. Pis'ma v Zhurnal Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra, 2019. Theoretical Optimization of Neutron and Physical Characteristics of a Multiplying Pulsed Neutron Source Based on a Proton Accelerator Yu. N. Pepelysheva, A. D. Rogova, and S. F. Sidorkin
90. Journal of surface investigation: X-ray..., 2019, Vol. 13 No. 5, pp. 894-897. Kuznetsov V.L, Kuznetsova E.V., Sedyshev P.V. and Sirotin A.P. «Investigation of the Characteristics of the Neutron Beam of the First Channel of the IBR-2 Reactor».

## **8. Новые результаты по физике элементарных частиц, ядерной физики и нейтринной астрофизике**

91. Study of Earth's Heat Flux by Means of Geoneutrino Detection I.R. Barabanov, L.B. Bezrukov, V.P. Zavarzina, I.S. Karpikov, A.S. Kurlovich, B.K. Lubsandorzhiyev, A.K. Mezkhokh, V.P. Morgalyuk, V.V. Sinev. 2019. 5 pp. Published in Phys.Atom.Nucl. 82 (2019) no.1, 8-12 DOI: 10.1134/S1063778819010034
92. Л. Б. Безруков, В. В. Синева, Спектры CNO нейтрино и геонейтрино от  $^{40}\text{K}$  в детекторе Борексино, подготовлена для отправки в печать.
93. N.Yu Agafonova, V.V Ashikhmin, E.A Dobrynina, R.I Enikeev, A.S Malgin, O.G Ryazhskaya, I.R Shakyrianova, V.F Yakushev for the LVD and the BUST Collaborations "The search for rare events using Large Volume Detector" ECRS 2018, Journal of Physics: Conf. Series 1181 (2019) 012059.
94. N Yu Agafonova et al. "Search for events in the LVD detector coinciding with gravitational signals from the collapse of close binary systems" Journal of Physics: Conference Series 1390 (2019) 012088
95. R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenya, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov and A.F. Yanin. A search for neutrino bursts in the Galaxy at the Baksan Underground Scintillation Telescope. J. Phys.: Conf. Ser., 1181, 012056, 2019.
96. V.B. Petkov, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenya, Yu.F. Novoseltsev, R V Novoseltseva, P.S. Striganov and A.F. Yanin. Search for electron neutrinos associated with gravitational-wave events at the Baksan Underground Scintillation Telescope. J. Phys.: Conf. Ser., 1181, 012058, 2019.
97. М.М. Кочкаров, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, А.Н. Куреня, Ю.Ф. Новосельцев, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, П.С. Стриганов, А.Ф. Янин. Поиск нейтринных вспышек на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе: 37 лет экспозиции. Известия РАН. Серия физическая, 2019, том 83, № 8, с. 1019–1022.
98. М.М. Кочкаров, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, Ю.Ф. Новосельцев, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, А.Ф. Янин. Фон быстрых нейтронов на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе. Известия РАН. Серия физическая, 2019, том 83, № 8, с. 1023–1026.
99. А.Ф. Янин, И.М. Дзапарова, М.М. Болиев, Е.А. Горбачева, М.М. Кочкаров, А.Н. Куреня, В.Б. Петков. Разработка новой системы сбора информации Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа. Известия РАН. Серия физическая, 2019, том 83, № 5, с.702–705.
100. Yu.F. Novoseltsev, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurenya, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin. Supernova neutrino burst monitor at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Astroparticle Physics 117 (2020) 102404
101. V B Petkov, M M Boliev, I M Dzaparova, M M Kochkarov, A N Kurenya, Yu F Novoseltsev, R V Novoseltseva, P S Striganov and A F Yanin. 38 years of galactic observations in searching for neutrino bursts from core collapse supernovae with the Baksan Underground Scintillation Telescope. J. Phys.: Conf. Ser., 2020 (в печати).
102. V.B. Petkov, E.V. Bugaev, P.A. Klimai. Multimessenger search for evaporating primordial black holes. arXiv:1912.01317
103. I.M. Dzaparova, I.S. Savanov, V.B. Petkov, A.V. Sergeev, D.D. Dzhappuev, A.N. Kurenya, V.B. Puzin, E.A. Gorbacheva, O.I. Mikhailova, M.A. Nalivkin, S.A. Naroenkov, A.A. Shlyapnikov. Quick search for optical partners of bursts of very high energy gamma-ray radiation. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhniy Arkhyz (SAO RAS), Terskol

- (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 60 - 65. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Dzaparova.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Dzaparova.html)
- 104.** Kochkarov M.M., Alikhanov I.A., Boliev M.M., Dzaparova I.M., Novoseltsev Yu.F., Novoseltseva R.V., Petkov V.B., Yanin A.F. Fast neutrons in the Baksan Underground Scintillation Telescope: the background for core-collapse supernova searches. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 94 - 99. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Kochkarov.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Kochkarov.html)
- 105.** A.N. Kurennya, I.M. Dzaparova, D.D. Dzhappuev, E.A. Gorbachev, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, V.S. Romanenko, A.F. Yanin. DAQ system for the complex of BUST – Andyrchy – Carpet-2 facilities. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 111 - 117. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Kurennya.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Kurennya.html)
- 106.** R.V. Novoseltseva, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, A.N. Kurennya, Yu.F. Novoseltsev, V.B. Petkov, P.S. Striganov, A.F. Yanin. A search for neutrino bursts in the Galaxy with the Baksan Underground Scintillation Telescope; 38 years of exposure. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 153 - 160. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Novoseltseva.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Novoseltseva.html)
- 107.** V.B. Petkov. The multi-messenger astronomy: experiments in the Baksan Neutrino Observatory. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 169 - 175. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Petkov.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Petkov.html)
- 108.** R.V. Novoseltseva. Status of the experiment on the search of neutrino bursts with BUST. Particles and Cosmology: 16th Baksan School on Astroparticle Physics. Terskol, April 10-18, 2019. Устный доклад.
- 109.** В.Б. Петков. Нейтринная астрофизика. Эксперименты в Баксанской нейтринной обсерватории. Двадцать пятая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, г. Симферополь, 19 – 26 апреля 2019 г. Устный доклад (лекция).
- 110.** D. Dzhappuev et al. Carpet-2 search for PeV gamma rays associated with IceCube high-energy neutrino events. // JETP Letters vol. 109, issue 4.
- 111.** D. Dzhappuev et al. Search for astrophysical PeV gamma rays from point sources with Carpet-2 // EPJ Web Conf., 207 (2019) 03004.
- 112.** D. Dzhappuev et al. Carpet results on astrophysical gamma rays above 100 TeV // // 36th ICRC Madison Wisconsin, 2019.
- 113.** В.Б. Петков, Д.Д. Джаппуев, А.С. Лидванский, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А. Н. Куреня, О.И. Михайлова, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Измерение верхнего предела потока изотропного диффузного гамма-излучения с энергией выше 700 ТэВ на установке “Ковер-2”. Известия РАН. Серия физическая, 2019, том 83, № 8, с. 1038–1041.

114. V.S. Romanenko, V.B. Petkov, D.D. Dzhappuev, A.S. Lidvansky, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, A.U. Kudzhaev, N.F. Klimenko, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, K.V. Ptitsyna, M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin. Limits on the isotropic diffuse gamma-ray flux between 100 TeV and 1 PeV: experiments Carpet-2 and Carpet-3. Proceedings of the International Conference "The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves", Russia, Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), October, 7 - 14, 2018, Publishing house SNEG, Pyatigorsk, 2019, pp. 186 - 192. [https://www.sao.ru/hq/grb/conf\\_2018/proc/Romanenko.html](https://www.sao.ru/hq/grb/conf_2018/proc/Romanenko.html)
115. A.S. Lidvansky for the Carpet-3 collaboration. Search for cosmic gamma rays of ultra-high energies with the Baksan air shower array. 16th International Conference on "Topics in Astroparticle and Underground Physics" (TAUP 2019), Toyama, Japan, 9-13 September 2019. Устный доклад.
116. Astapov I., Bezyazeev P., Borodin A.,....., Lubsandorzhev B. et al., «Scintillation detectors for the TAIGA experiment» // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A. 2019. V.936. P.254. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.081>
117. L.G. Sveshnikova, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., B.K. Lubsandorzhev et. al. First Season of Operation of the TAIGA Hybrid Cherenkov Array // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 962-966. DOI: 10.3103/S1062873819080379
118. V.V. Prosin, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. al. Energy Spectrum of Primary Cosmic Ray According to Tunka-133 and TAIGA-HiSCORE EAS Cherenkov Light Data // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 1016-1019. DOI: 10.3103/S1062873819080343
119. E.B. Postnikov, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. al. Monte Carlo Simulation of the TAIGA experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 955-958. DOI: 10.3103/S1062873819080331
120. R.D. Monkhoev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. al. Search for Diffuse Gamma Rays Using Data of the Tunka-GRANDE Experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 959-961. DOI: 10.3103/S1062873819080306
121. N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. al. TAIGA: A Complex of Hybrid Systems of Cooperating Detectors for Gamma Astronomy and Cosmic Ray Physics in the Tunka Valley // Bull. Russ. Acad. Sci. 83 (2019) 8. 951-954. DOI: 10.3103/S1062873819080100
122. N.M. Budnev, A. Chiavassa, O.A. Gress, ....., B.K. Lubsandorzhev et al. The primary cosmic-ray energy spectrum measured with the Tunka-133 array // Astroparticle physics. 117 (2020) 102406. / Available online 20 November 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2019.102406>
123. N.M. Budnev, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., B.K. Lubsandorzhev et al. TAIGA – A hybrid array for high energy gamma astronomy and cosmic-ray physics // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2019. DOI:[10.1016/j.nima.2019.04.067](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.067)
124. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev,....., B. Lubsandorzhev et al. Cherenkov EAS arrays in the Tunka astrophysical center: from Tunka-133 to the TAIGA gamma and cosmic ray hybrid detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2019. DOI:[10.1016/j.nima.2019.01.056](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.056)
125. I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko....., B. Lubsandorzhev et al. Optimization of electromagnetic and hadronic extensive air showers identification using the muon detectors of the TAIGA experiment // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2019. DOI:[10.1016/j.nima.2018.12.045](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.045)

126. I. Astapov, P. Bezyazeev, V. Boreyko....., N. Ushakov et al. TAIGA experiment: results and perspectives //Advances in Space Research. В печати.
127. Lubsandorzhev, I. Astapov, P. Bezyazeev, et al. The hybrid installation TAIGA: design, status and preliminary results // PoS (ICRC2019) 729.
128. L. Kuzmichev, I. Astapov, P. Bezyazeev,....., B. Lubsandorzhev et al. TAIGA:results and perspective // The European Physical Journal Conferences 207(5):03003 (2019).
129. V. Prosin, I. Astapov, P. Bezyazeev, ....., B. Lubsandorzhev et al. Cosmic Ray Energy Spectrum derived from the Data of EAS Cherenkov Light Arrays in the Tunka Valley // The European Physical Journal Conferences 210:01003 (2019).
130. D. Kostunin, I.I. Astapov, P.A. Bezyazeev, ....., Lubsandorzhev B.K. et. Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma Astronomy // arxiv:1903.07460