**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор Лаборатории**

**/ /**

**“ “ 202 г.**

**ОТЧЕТ ПО ТЕМЕ / КРУПНОМУ ИНФРАСТРУКТУРНОМУ ПРОЕКТУ**

**ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о теме / КИП**

**1.1. Шифр темы / КИП**

02-0-1081-2009/2024

**1.2. Лаборатория**

ЛЯП, ЛФВЭ, ЛТФ, ЛИТ, ЛНФ

**1.3. Научное направление**

Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика

**1.4. Наименование темы / КИП**

ATLAS. Модернизация установки и физические исследования на LHC

**1.5. Руководитель темы / КИП**

Бедняков В.А.

Заместители:

Храмов Е.В.,

Чеплаков А.П.

**1.6. Проекты в теме / подпроекты КИП**

ATLAS. Физические исследования на LHC

Модернизация детектора ATLAS

**2. Научный отчет об исполнении темы / КИП**

**Аннотация**

Главная цель международного эксперимента ATLAS – это изучение протон-протонных взаимодействий при рекордных энергиях коллайдера LHC (от 7 до 14 ТэВ). В частности, с помощью установки ATLAS уже ведется тщательная проверка современной Стандартной модели физики частиц, определяются границы ее применимости, ищутся ответы на ключевые вопросы современного этапа развития физики и астрофизики, такие, например, как происхождение масс у элементарных частиц, природа темной материи во Вселенной, наличие дополнительных пространственных измерений и другие.

На основе многопланового и всестороннего исследования процессов рассеяния протонов будут получены совершенно новые и уникальные экспериментальные данные. Анализ этих данных даст возможность решить ряд наиболее фундаментальных физических проблем. Сотрудники ОИЯИ в рамках данного проекта примут участие в их решении.

Планируется получить совершенно новые данные и опубликовать статьи по всем физическим задачам, за которые отвечают сотрудники ОИЯИ, включая отмеченные выше. Наиболее важные из них – исследование структуры протона и спектра адронных состояний и проверка Стандартной модели физики частиц при энергиях LHC, поиск и исследование проявлений суперсимметрии, поиск свидетельств существования новых частиц и новых взаимодействий. Помимо этого, сотрудники ОИЯИ получат новые результаты, которые позволят уточнить свойства уже известных элементарных частиц, таких как W- и Z-бозоны, топ-кварк, тяжелые барионы и других.

На этапе работ по данному проекту в 2020–2022гг было опубликовано с решающим участием сотрудников ОИЯИ 19 работ и сделано более 17 выступлений на различных конференциях и митингах, не считая рабочих совещаний в рамках коллаборации ATLAS.

**Введение**

Международная коллаборация ATLAS была создана более 30 лет назад для проведения многоцелевого эксперимента нового поколения по изучению фундаментальных свойств вещества в протон-протонных столкновениях при энергии в центре масс 14 ТэВ на Большом адронном коллайдере (LHC). На сегодняшний день в Коллаборацию входят 2929 авторов и около 5900 участников из 182 институтов в 42 странах. В течение этих 30 лет были спроектированы, построены, введены в эксплуатацию очень сложные детекторные системы ATLAS, которые успешно использовались для исследования множества физических явлений, включая долгожданное открытие бозона Хиггса в 2012 году.

Вклад ОИЯИ в это достижение выглядит весьма заметным на фоне других институтов. Следует отметить, что в ОИЯИ в полном соответствии с обязательствами, возложенными на Институт коллаборацией ATLAS, были проведены следующие очень важные работы:

1. Проектирование, изготовление и ввод в эксплуатацию детекторных модулей для мюонного спектрометра, жидко-аргонового и тайловых калориметров, а также для внутреннего трекера.

2. Калибровка калориметров ATLAS и подготовка к набору данных.

3. Участие в разработке ATLAS Trigger DAQ (TDAQ).

4. Создание в ОИЯИ сети ATLAS GRID (одной из лучших в России).

5. Моделирование и оптимизация магнитной системы ATLAS.

6. Проектирование, изготовление и сборка элементов магнитной системы ATLAS.

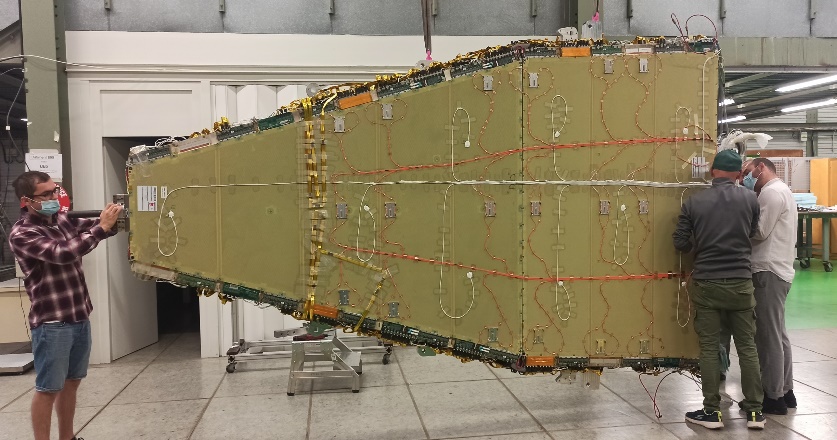
Примечательно, что только Италия, США, ЦЕРН и ОИЯИ внесли свой вклад во все основные подсистемы (TileCal, Muon, LAr, ID, TDAQ) детектора ATLAS. В 2009 г. руководители проекта ATLAS ОИЯИ прямо заявили (при утверждении первой части проекта), что выдающийся вклад ОИЯИ в проектирование, строительство, монтаж и ввод в эксплуатацию детекторных систем ATLAS нельзя переоценить. Поэтому в 2020-2022гг. основной целью руководства группы ATLAS в ОИЯИ было преобразование вышеупомянутых достижений ОИЯИ в интересные физические результаты, полученные учеными ОИЯИ (или при их важном вкладе). Несмотря на ряд сложностей, эта цель была успешно достигнута. Готовится к публикации расширенный отчет о вкладе команды ОИЯИ ATLAS в работу ATLAS и физические результаты за 2020-2022гг.

В течение прошедших 3 лет в рамках проекта команда ОИЯИ активно участвовала в подготовке физических результатов ATLAS, включая набор и подготовку данных, моделирование методом Монте-Карло и анализ данных. Группа принимала соответствующее участие в обязательных общих эксплуатационных задачах ATLAS, включая смены в диспетчерских ЦЕРН-ATLAS и ОИЯИ-удаленный-ATLAS, работу экспертов по вызову, контроль качества данных (удаленно) и так далее. Стандартное техническое обслуживание и эксплуатацию ATLAS (M&O) в эти годы осуществляли наши специалисты. ОИЯИ модернизировал вычислительные средства Grid LHC ОИЯИ и предоставил вычислительные ресурсы, которые позволили успешно использовать фрагмент Tier-2 ATLAS Grid на базе ОИЯИ. Команда ОИЯИ также определила объем своего участия в общей программе модернизации ATLAS для HL-LHC.

Кроме того, в ходе реализации проекта ATLAS в ОИЯИ в 2009-2022гг. руководство ATLAS ОИЯИ провело его внутреннюю реорганизацию. Причина заключалась в общем переходе от конструкции, сборки и ввода в эксплуатацию подсистем детектора ATLAS (тайл- и LAr-калориметры, мюонные системы, внутренние TRT-детекторы и другие) к работе детектора ATLAS с помощью новых общих рабочих задач (OT) - например, смены в диспетчерской ATLAS, дежурная экспертиза, подготовка данных, проверка качества данных и физический анализ. Эти новые требования также вызвали некоторую оптимизацию списка авторов ATLAS. В настоящее время участие как в Operation Tasks, так и в Physics analysis (как правило) обязательно для автора ATLAS (из ОИЯИ). Для усиления ответственности сотрудников ОИЯИ и увеличения вклада ОИЯИ в проект ATLAS необходимо было ввести новое требование для членства в команде ОИЯИ-ATLAS. Чтобы выполнить его, нужно было сначала стать «видимым» на общем уровне сотрудничества ATLAS, прежде чем стать официальным автором ATLAS. Основной практической целью этого правила было создание в ОИЯИ новой эффективно работающей команды ATLAS, способной решать амбициозные задачи на уровне всей коллаборации ATLAS. К 2021 году цель в целом была достигнута. В частности, команда ОИЯИ внесла существенный вклад в физику ATLAS по основным темам Стандартной модели, КХД, поиску бозона Хиггса и суперсимметрии, а также общему изучению физики за пределами Стандартной модели (экзотическая физика). Коллектив ОИЯИ предложил и развил несколько новых направлений физических исследований.

**Модернизация детектора ATLAS**

ОИЯИ вносит важный вклад в модернизацию детектора ATLAS. На этапе I (2014-2020 гг.) программы модернизации ATLAS коллектив ОИЯИ в составе 44 человек (27 FTE) участвовал в модернизации калориметров ATLAS и мюонного спектрометра. В частности, мы отвечаем за разработку электроники «выключенного детектора» для калориметра Тайла и электроники триггера для калориметра с жидким аргоном. ОИЯИ поставил радиационно-стойкие сцинтилляторы для замены модулей MBDT в переходной зоне между центральным и торцевым криостатами. Мы также спроектировали базовую плату для нового считывающего устройства калориметра LAr и разработали несколько прототипов предварительных формирователя для аналоговой части платы LAr Trigger Digitizer Board. Наиболее значительным вкладом коллектива ОИЯИ в проект модернизации I фазы ATLAS явилось массовое производство квадруплетов для нового малого колеса мюонного спектрометра (NSW). В Институте построен специальный цех участок по производству всех наружных модулей типа LM2 для NSW: всего до апреля 2021 года было изготовлено 70 считывающих панелей Микромегаc и 33 квадруплета. В 2021-2022 годах группа принимала активное участие в интеграции, тестирование, вводе эксплуатации и запуске NSW в ЦЕРН (см. фото ниже).

*Члены группы во время интеграции модулей NSW (сторона С) и перед спуском в шахту АТЛАС.*

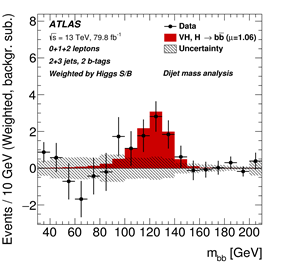
В 2021 году начались работы по вводу в эксплуатации участка по производству триггерных резистивных плоских камер (RPC) для центральной части мюонного спектрометра (Фаза 2 модернизации АТЛАС). RPC камеры представляют собой газовые детекторы с параллельными пластинами, которые сочетают в себе хорошее пространственное разрешение с временным разрешением, сравнимым с разрешением сцинтилляторов. Установка новых триплетных камер RPC во внутреннем слое центральной части мюонного спектрометра значительно снизит геометрические ограничения на аксептанс и сделает триггерную систему устойчивой к снижению эффективности или отказам в старых камерах RPC. Увеличение аксептанса и надежности срабатываний будет достигнуто за счет одновременного ослабления требований к количеству срабатываний в камеры BM и BO и добавления требования совпадения с внутренним слоем BI. Принимаются любые совпадения попаданий как минимум в трех камерах из четырех (считая одну BI, две BM и одну BO). Дубненская группа ответственна за изготовление и тестирование ~ 350 считывающих панелей (т.н. стрип-панели) или 50% от всех панелей типа BIL. В 2022 году была отработана технология производства и методы измерения геометрических характеристик. Были произведены и протестированы 3 панели. Тесты показали высокое, превосходящее требование коллаборации, качества панелей.

В работах по созданию высокогранулярного временного детектора (HGTD) в 2022 году был определен дизайн, подготовлены материалы и завершен важный этап подготовки DCS – SPR (Specification Preliminary Review). Была выполнена основная работа по подготовке к HGTD DCS/Environmental Monitoring PDR (Preliminary Design Review). Сам PDR состоялся уже в феврале 2023г. Выбрана аппаратура для использования в качестве датчика точки росы. Для нее написано программное обеспечение и начато тестирование. Составлено и утверждено специальной комиссией эксперимента ATLAS техническое задание на разработку (Specification Review) Стенда для сборки полудисков детектора HGTD - основных компонентов HGTD, представляющих собой сборку модулей детектора, периферийной электроники и сервисов на пластине охлаждения. HGTD включает 8 таких полудисков. Наряду со сборкой, Стенд должен обеспечить возможность тестирования и затем установки собранных полудисков в корпус HGTD. Разработан эскизный проект Стенда, результаты проработки регулярно докладывались на рабочих совещаниях HGTD. Выполнены работы по размещению и проектированию сервисов HGTD на торцевом калориметре установки ATLAS, создана 3D модель. Предложена концепция внешнего кольца корпуса HGTD, включая способ подключения и интеграции сервисов; спроектирован и создан макет для тестирования концепции. Осуществлялись работы по разработке и уточнению сервисов и инфраструктуры HGTD, в частности, подготовлено и утверждено техническое задание на разработку (Specification Review) системы вентиляции HGTD азотом. Осуществлялось координирование работ по сборке, установке и тестированию детектора, включая разработку детальных планов и проведение отчетов о ходе выполнения работ комиссиям по апгрейду ATLAS (AUG, P2UG). Предлагаемые решения и ход работ по их реализации регулярно докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях HGTD.

Повышение светимости LHC до 7,5×1034 см-2с-1, что соответствует среднему числу μ=200 неупругих pp-столкновений на пересечение пучков, позволит всесторонне измерить свойства бозона Хиггса во всех модах его рождения и распада, а также улучшить измерения всех соответствующих процессов Стандартной модели и поиск явлений за пределами СМ. Например, одним из важнейших результатов эксперимента ATLAS в 2018 году было наблюдение распада бозона Хиггса на пару b-кварков и рождения VH. Члены нашей группы много лет работают в аналитической команде и продолжат эту деятельность в будущем. Комбинация результатов Run 2 для поиска бозона Хиггса, образованного в ассоциации с векторным бозоном, дает наблюдаемую (ожидаемую) значимость 5,3 (4,8) стандартных отклонений с неопределенностью выше 10% для значения силы сигнала.

Модели с расширенным сектором Хиггса, такие как SUSY, предсказывают отклонения констант связи Хиггса от предсказаний СМ, которые могут быть сколь угодно малыми, если состояния Хиггса в SUSY очень тяжелые. Вот почему увеличение статистики (и повышение точности измерений) очень важно для дальнейшего продвижения этого исследования. Специальный анализ показал, что для канала H→bb значение статистической значимости 7,1 может быть получено для интегральной светимости 300 фбн-1, а 10,7 может быть получено для 3000 фбн-1.

Поэтому использование этого беспрецедентного значения светимости имеет решающее значение для всех аспектов будущего физического анализа и разработки программного обеспечения.



*Распределение mbb в данных, полученных с помощью анализа массы двух струй после вычитания всех фонов.*

**Участие в работе детектора ATLAS**

ОИЯИ продолжает участие в общих рабочих задачах ATLAS. Это включает в себя посменную работу сотрудников ОИЯИ в диспетчерских ЦЕРН-АТЛАС, выполнение дежурных экспертных работ, контроль качества данных и т. д. ОИЯИ и в эти годы обеспечивал стандартную поддержку по обслуживанию и эксплуатации (M&O) ATLAS. В частности, ОИЯИ продолжает участие в эксплуатации адронного TILE калориметра: Ираклий Минашвили (ОИЯИ) и Олег Соловьянов (Aubier) являются двумя основными руководителями технического обслуживания детектора. Группа ОИЯИ продолжает эксплуатацию и поддержку жидкоаргонового адронного калориметра. Обязательства ОИЯИ по техническому обслуживанию и эксплуатации включают восстановление блоков электроники, ремонт и приведение в порядок электронных блоков, контроль качества каналов считывания, участие в сменах в качестве «дежурного эксперта» и «локального эксперта».

ОИЯИ продолжит участие в усилиях по контролю безопасности ATLAS. В частности, сотрудники ОИЯИ (В. Батусов, И. Костюхина, М. Шиякова) будут работать в качестве SLIMOS (руководитель смены по вопросам безопасности). Кроме того, они берут на себя обязанности наблюдателей за радиационной защитой, чтобы предотвратить любую утечку радиоактивных материалов из шахты АТЛАС.

**Участие ОИЯИ в реализации физической программы эксперимента АТЛАС**

Стратегической идеей участия ОИЯИ в физической программе ATLAS является научная значимость вклада коллектива ОИЯИ. В отличие от предыдущего этапа проекта (2015-2019 гг., с так называемыми предварительными работами ATLAS на базе ОИЯИ) любая локальная деятельность в области физики ATLAS не будет поддерживаться в ОИЯИ, если у нее нет четких планов, подлежащих рассмотрению, принятию и поддержки для разработки в рамках всего сотрудничества ATLAS (или соответствующих рабочих групп ATLAS). Используя этот подход, группа ОИЯИ приняла активное участие в следующих мероприятиях в период 2020-2022 гг.:

1. Изучение применимости Стандартной модели и проверка ее предсказаний, изучение структуры протона при сверхвысоких энергиях (PDF), настройка и совершенствование соответствующих компьютерных кодов и генераторов событий и т.д.

2. Поиск киральных Z\*/W\*-бозонов в двухструйных распадах, а также в процессе с более сложной топологией их ассоциативного рождения, включая тяжелые b- и t-кварки.

3. Поиск (суперсимметричных) заряженных бозонов Хиггса через их специфические моды распада (3-лептона и т.д.).

4. Анализ ассоциированного рождения СМ Хиггса с парой топ-кварков и поиск продукции Хиггса с одиночным топ-кварком.

5. Поиск валентноподобной непертурбативной компоненты тяжелых кварков в протоне (собственных тяжелых кварков) через специфическую топологию конечного состояния в рр-взаимодействиях.

6. Поиск новых адронов и барионов, содержащих тяжелые c- и b-кварки.

7. Измерение тройного дифференциального сечения Дрелла-Яна и эффективного угла слабого лептонного смешивания в распаде Z-бозона.

8. Новое комплексное исследование глюонной структуры протона.

9. Поиск квантовых черных дыр в канале лептон+струя при энергии 13 ТэВ.

10. Участие в развитии инфраструктуры индексации тригера событий.

11. Сопровождение и развитие системы TDAQ.

Важно отметить, что многие из этих тем были инициированы группой ОИЯИ в ATLAS.

**ОИЯИ в рабочей группе Стандартной модели**

Группа SANC

В рамках этой рабочей группы ОИЯИ заметен благодаря международному проекту SANC (Поддержка аналитических и численных расчетов для экспериментов на коллайдерах, сайт: http://brg.jinr.ru/). Работы по применению результатов SANC к физике LHC ведутся с 2004 г. (под руководством Д.Ю.Бардина). Группа SANC в ОИЯИ (Д. Бардин, А. Арбузов, С. Бондаренко, Л. Калиновская, Р. Садыков, А. Сапронов и др.) очень успешно работает в коллаборации ATLAS на протяжении многих лет.

Они разрабатывают и применяют теоретические предсказания практически для всех трехчастичных и многих четырехчастичных процессов Стандартной модели на однопетлевом уровне точности. Основными целями SANC являются подготовка к очень точному физическому анализу (включая петлевые поправки), например, рождения одиночного топ-кварка в pp-столкновениях на LHC в рамках SANC. Внедрение продуктов SANC в аналитическое программное обеспечение ATLAS имеет первостепенное значение для ОИЯИ.

В 2020-2022 годах группа SANC продолжала теоретическую поддержку для расчетов электрослабых и КХД (EW&QCD) NLO-поправок к процессам, подобным Дреллу-Яну, для данных ATLAS. В частности, это касается EW-поправок высокого порядка для событий нейтрального тока Дрелла-Яна; подгонка эффективных параметров Стандартной модели и соответствующее моделирование методом Монте-Карло; реализация влияния фотонно-индуцированных подпроцессов в генераторе и исследование влияния на конечные результаты. Разработкой программного обеспечения SANC/PHOTOS для ATLAS также занимаются А. Арбузов, Р. Садыков и З. Вас. Они начали с тщательного сравнения расчетов SANC/PHOTOS вне и в резонансных случаях и изучили образование пар легких фермионов.

Другие члены команды участвуют в обновлении известного кода HERAFitter для целей ATLAS, так что, в частности, будет включена эволюция фотонных PDF-файлов.

Кроме того, участники группы (лидер А.Сапронов) занимаются следующими темами:

1. Измерение параметров Стандартной модели на основе данных о продольной асимметрии лептонных мод распада одиночного Z-бозона. Существующие расчеты электрослабых поправок в приближении NLO, реализованные в виде интегратора Монте-Карло MCSANC, позволяют совместно с аппроксимацией партонных распределений протона измерить ряд параметров электрослабой СМ. К последним относятся эффективный угол Вайнберга, так называемый ρ-параметр и, в долгосрочной перспективе, эффективные константы связи.

2. Анализ процессов типа Дрелла-Яна в контексте КХД. Целью данного анализа является уточнение функций распределения партонов на основе экспериментальных данных протон-протонных столкновений. Применение кода HERAFitter для данных Run-I позволяет получить больше информации о плотностях импульсных распределений s-кварков при малых значениях x и глюонов при больших x. Исследование будет продолжено для более широких кинематических диапазонов и более высокой статистики Run-II.

В настоящее время разрабатывается инструментарий SANC для анализа данных ATLAS Run-I. Для Run-II необходимо адаптировать код интерфейса для нового формата и расширить функциональность кода.

Изучение структуры протона

В 2020-2022 годах было продолжено изучение структуры протона в эксперименте ATLAS. Предполагается проверить родившуюся в ОИЯИ гипотезу существования валентно-кварковых состояний в протоне, так называемого внутреннего обаяния и странности, в pp-процессах с непосредственным рождением фотонов или векторных бозонов (W, Z), сопровождаемых c- или b-струями.

Гипотезу проверяют сравнением спектров прямых фотонов и векторных бозонов, полученных по данным Run-I и Run-II, и взятых из теории [В.А. Бедняков, М.А. Демичев, Г.И. Лыкасов, Т. Ставрева, М. Стоктон, hep-ph/1305.3548, Phys.Lett.B 728 (2014) 602].

Эксперименты на LHC можно интерпретировать как «фабрику глюонов», поскольку при энергиях в несколько ТэВ в рр-столкновениях передаваемые импульсы настолько велики, что рождается большое количество глюонов, проявляющихся экспериментально в виде струй адронов, в основном, тяжелых , c- и b-струй.

Группой ОИЯИ было показано, что из данных ATLAS по спектрам адронов при малых и больших поперечных импульсах можно извлечь информацию о распределении глюонов, которые зависят от внутренних продольных и поперечных импульсов, а также квадрата переданного четырех-импульса в рр-столкновениях.

Из анализа данных ATLAS по спектрам легких заряженных адронов, π- и K-мезонов, образующихся в pp-столкновениях в центральной области быстроты и более широком диапазоне начальных энергий (от SPS до LHC), функции распределения глюонов при малых внутренних поперечных импульсах найдены впервые [В.А.Бедняков, А.А. Гринюк, Г.И. Лыкасов, М.Погосян, междунар. J. Mod.Phys., A 27 (2012) 1250042; А.А. Гринюк, А.В. Липатов, Г.И. Лыкасов, Н.П. Зотов, Phys.Rev.D87, 074017(2013); Г.И. Лыкасов, А.А. Гринюк, В.А. Бедняков, ЭЧАЯ 44 (2013) 568-572; А.В. Липатов, Г.И. Лыкасов, Н.П. Зотов, hep-ph/1310.7893, Phys.Rev.D89 (2014) 014001].

Планируется продолжить детальный анализ данных ATLAS о рождении тяжелых адронов, содержащих b- и c-кварки, и тяжелых струй в pp-столкновениях с использованием расчетов КХД, чтобы найти форму распределения глюонов на средних и больших поперечных импульсах. Иными словами, планируется продолжить мониторинг плотности глюонов в широком диапазоне переменных, от которых она зависит, используя набор данных ATLAS, полученных в период 2015-2018 гг.

Тяжелые адроны и барионы

Одним из важных направлений исследований на LHC является исследование барионов, содержащих c- и b-кварки. На В-фабриках это сделать невозможно, и большинство барионов с двумя (и/или тремя) тяжелыми кварками еще не наблюдалось. В период 2020–2022 гг. коллектив ОИЯИ принимал участие в следующих работах:

1. Изучение полулептонных и адронных мод распада Bc по данным RUN-II, в частности для поиска векторных состояний Bс\*→Bc+γ (ранее не наблюдалось в других экспериментах), а также для возможного воспроизведения анализа RUN-I для поиска Bc\*(2S)+ в полулептонном режиме распада Bc, как и в Run-I, но с целью более точного измерения поперечного сечения образования Bc\*(2S)+ с использованием более высокой статистики.

2. Поиск двухзарядного тетракваркового состояния, распадающегося на Bc+ и π+.

3. Измерение относительного сечения образования Bc+/B+.

4. В качестве следующего шага анализа, выполненного в ходе предыдущего проекта (Phys.Lett. B751 (2015) 63-80), планируется измерить амплитуды спиральности и параметр асимметрии нарушения четности αb для Λb0 → J/ψ Λ0 и Λb0 → Ψ(2S) Λ0 каналы распада. Ожидается, что поляризационные эффекты для канала распада Λb0 → Ψ(2S) Λ0 будут измерены впервые.

5. Поиск различных экзотических состояний в процессах Λb0 → J/ψ φ Λ0 или/и Λb0 → J/ψ KS0 Λ0. Например, спектр масс (J/ψ,Λ0) может быть использован для поиска пентакварка со скрытым очарованием с S=-1 в диапазоне масс 4,35 – 4,55 ГэВ.

6. Исследование экзотических структур X → J/ψ φ(1020) в распадах B+ → J/ψ φ K+.

7. Измерение распадов Bc → J/ψ D для пяти распадов с D = Ds+, D\*s+, D+, D\*+, Ds1(2536)+. Первые два наблюдались в Run-I, более точное измерение возможно в Run-II. Остальные распады пока не наблюдались.

Для изучения распадов с J/ψ в конечном состоянии будет использован существующий триггер после его адаптации к повышенной светимости LHC. Команда ОИЯИ намерена продолжить поддержку и развитие пакета для измерения эффективности одно- и двухмюонных триггеров и измерения масштабных коэффициентов, в частности, для анализа измерения сечения B+.

Измерения Z-бозона, рожденного совместно с b- или c-струями

Такие измерения обеспечивают важную проверку пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД) при расчетах следующего за ведущим порядком (NLO). Эти процессы чувствительны к тяжелым ароматам кварков в начальном состоянии. В расчетах пертурбативной КХД (pQCD), содержащих кварки с тяжелым ароматом, обычно используются две схемы. Одной из них является схема с четырьмя ароматами (4FNS), которая учитывает только партонные плотности глюонов и первых двух поколений кварков в протоне. Другая - это схема с пятью ароматами (5FNS), которая допускает плотность b-кварка в начальном состоянии и повышает вероятность того, что измерения рождения тяжелых ароматов могут ограничить функцию плотности партонов b-кварка (PDF) протона. При расчетах во всех порядках методы 4FNS и 5FNS должны давать одинаковые результаты; однако в данном порядке между ними могут возникать различия. Расчеты NLO, сочетающие схемы 4 и 5 ароматов для партонов в начальном состоянии, все еще несут большие неопределенности.

Кроме того, сигнал V + b(анти-b) образует доминирующий фон для многих других процессов с меньшим поперечным сечением, от образования топ кварка до поиска бозона Хиггса Стандартной модели, и многих процессов, выходящих за рамки Стандартной модели, включая SUSY и другие экзотические процессы. Команда ОИЯИ участвовала в доработке анализа на основе данных Run-I и переходе к полному анализу Run-II.

Бозе-Эйншейновские корреляции

Особый интерес представляют исследования зависимости БЭК от множественности и поперечного импульса частиц. Они помогают понять механизм множественных процессов. Было замечено, что размер источника, испускающего коррелированные частицы, увеличивается с увеличением количества частиц. Это можно понять как результат увеличения начальной геометрической области перекрытия сталкивающихся объектов: большое перекрытие подразумевает большую множественность. Хотя эта зависимость естественна для ядерно-ядерных столкновений, увеличение размера с множественностью также наблюдается в адронных и лептонных взаимодействиях. В последнем под ним понимается результат наложения многих источников или связанный с количеством струй. Данные о высокой множественности протон-протонных взаимодействий могут служить отправной точкой для изучения ядерно-ядерных столкновений. Эффект воспроизводится как в гидродинамическом/гидрокинетическом, так и в померонном подходах для адронных взаимодействий, где решающую роль играют высокие множественности. Еще одной важной особенностью эффекта БЭК является зависимость от поперечного импульса пары частиц-эмиттеров. При ядерно-ядерных столкновениях зависимость размера излучателя частиц от поперечного импульса объясняется как «коллективный поток», который порождает характерное уменьшение размера излучателя с увеличением поперечного импульса, в то время как сильные пространственно-временные корреляции импульс-энергия предлагают объяснение в более «элементарных» лептонных и адронных системах, где измерения БЭК служат проверкой различных моделей (Eur. Phys. J. C75 (2015) 466; Phys. Lett. B 758 (2016) 67).

Команда ОИЯИ продолжает измерения БЭК в одномерном и трехмерном случаях, а также исследования распределения заряженных частиц в данных Run-II/III.

**ОИЯИ в рабочей группе бозона Хиггса**

VH-процессы с распадом бозона Хиггса на пару *b*-кварков

Результаты этого исследования были кратко представлены в главе «Модернизация детектора ATLAS». Работая вместе с нашими коллегами из рабочей группы «Распады бозона Хиггса в сложные состояния», мы скоро завершим этот анализ для полного набора данных из Run-2. Настоящий анализ основан на так называемом подходе «простой шаблон», но более сложные методы с несколькими переменными будут применяться после того, как в Run-3 будут доступны статистически более значимые данные.

ttH-измерения в мультилептонном канале

Изучение происхождения нарушения электрослабой симметрии является одной из ключевых целей экспериментов на LHC. В Стандартной модели симметрия нарушается введением дублета сложного скалярного поля, что приводит к предсказанию существования одной физической нейтральной скалярной частицы, широко известной как бозон Хиггса. Открытие коллаборациями ATLAS и CMS бозона Хиггса с массой около 125 ГэВ стало важной вехой. Проведенные до сих пор измерения его свойств согласуются с предсказаниями бозона Хиггса СМ.

Команда ОИЯИ продолжает исследование ttH с полным набором данных Run-2 в следующих направлениях:

1. Анализ сигнатуры с ложным лептоном в однознаковом лептон-тау-адронном канале (2lSS+1τ)

2. Вклад в создание шаблона для анализа в группе 1 (GFW1)

3. Обновление метода ложного фактора ABCD для оценки ложных лептонов.

4. Применение Template Fit для оценки фона и сравнение с результатами обновленного метода FF.

5. Вклад в объединение каналов

tH-рождение

Рождение бозона Хиггса в ассоциации с одним топ-кварком (tH) ищется с помощью распадов бозона Хиггса на пары b-кварков. В Стандартной модели величина сечения этого процесса предсказывается на порядок меньше, чем для рождения бозона Хиггса с парой топ-кварков (ttH). Из-за очень малого выхода событий процесс SM tH не может быть обнаружен с помощью статистики Run-2, можно установить только верхний предел. С другой стороны, этот канал чувствителен к знаку (или, в более общем случае, к комплексной фазе) константы связи Юкавы для топ-кварка. В частности, в модели BSM с инвертированной константой (ITC) сечение увеличено более чем на порядок и статистики Run-2 достаточно, чтобы наблюдать канал ITC tH или исключить эту модель.

К настоящему времени группа ОИЯИ провела исследование канала tH методом Монте-Карло на уровне генератора. Краткое резюме можно найти в работе О.А.Коваль, И.Р.Бойко и Н.Гусейнов, EPJ Web Conf., 201 (2019) 04003. Запланированы следующие работы:

1. Улучшить выбор событий, с примением нейронной сети вместо выбора событий последовательными ограничениями;

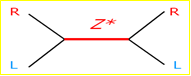
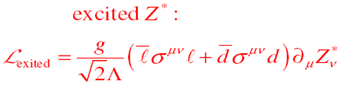
2. Провести полное моделирование методом Монте-Карло, используя опыт, полученный в ходе исследования на уровне генератора;

3. Изучить канал tH (H→bb) с использованием данных ATLAS Run-2 и установить пределы, если сигнал не наблюдается.

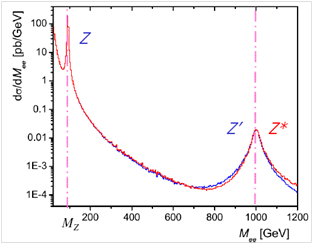
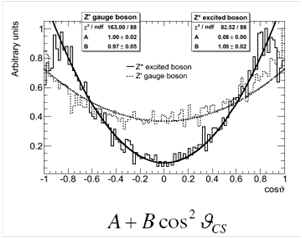
**ОИЯИ в рабочей группе Экзотика**

Перспективы поиска Z\*/W\*

Существование возбужденных бозонов высказывалось еще в ранних работах М.В. Чижова [Мод. физ. лат. А 8 (1993) 2753] (в настоящее время старший научный сотрудник Лаборатории ядерных проблем имени Джелепова). Проект их поиска на LHC был предложен в статье [Phys. Atom.Nucl. (2008) 2096; Nuovo Cimento C 33 (2010) 343] также учеными Лаборатории Джелепова: М.В. Чижовsv, В.А. Бедняковsv и Ю.А. Будаговsv. Проект был принят коллаборацией ATLAS в 2009 году.

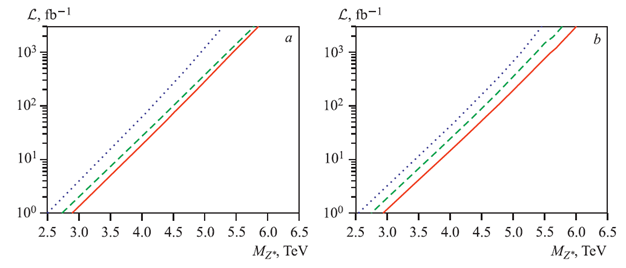
Коллектив ОИЯИ (руководитель М.В. Чижов) совместно с коллективом ATLAS из Санкт-Петербургского ИЯИ (руководитель О. Федин) в рамках рабочей группы Lepton+X Exotics провели исследование на общую тему «Поиск инклюзивно рожденных киральных Z\*-бозонов через их распад на лептон- антилептонные пары». Полученные данные собираются на специальной странице Twiki https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasProtected/ZstarEleEle. В целом, анализ Z\* очень похож на анализ Z’. Однако, специфические особенности возбужденных бозонов приводят к множеству отличий по сравнению с результатами Z’ (рисунок ниже). Это поможет однозначно отличить их от других нейтральных резонансов с разными спинами.

Экспериментальные поиски этих тяжелых возбужденных бозонов с помощью детектора ATLAS в первый период анализа данных LHC основывались на энергиях протон-протонных столкновений 7 (8) ТэВ и интегральной светимости 5 (20) фб-1, соответственно. Результатом этих исследований стали новые верхние пределы сечений и масс новых бозонов. Наблюдаемые пределы массы Z\*(W\*) составляют 2,85 (3,21) ТэВ.

Перспективы дальнейших поисков Z\*, W\* связаны прежде всего с планами увеличения энергии протон-протонных столкновений на LHC до 13-14 ТэВ и увеличения светимости протонных пучков. Ожидаемое количество событий с Z\*, W\* увеличивается пропорционально интегральной светимости коллайдера, а при больших массах выход новых бозонов значительно увеличивается с энергией встречных пучков.

На рисунке ниже показана зависимость интегральной светимости, необходимой для обнаружения (слева) или исключения (справа) с доверительной вероятностью 95% Z\*-бозона в зависимости от его массы для энергии pp-столкновений 13 ТэВ.



*Интегральная светимость протон-протонных столкновений с энергией 13 ТэВ, необходимая для обнаружения (слева) или исключения (справа) существования бозона Z\* в зависимости от массы последнего.*

Следует отметить, что увеличение энергии столкновения сильно увеличивает потенциал поиска новой физики. Например, для pp-столкновений с энергией 14 ТэВ требуется интегральная светимость меньше 1fb-1, чтобы улучшить существующие ограничения на массу Z\*, а анализ данных 100 fb-1 проверит гипотезу существования Z\* до его массы 4,5 ТэВ.

Последние 3 года коллектив ОИЯИ продолжал поиски Z\*-бозона. Вскоре начнется поиск заряженного кирального бозона W\*, образующегося инклюзивно и распадающегося на пару электрон-нейтрино (pp→W\*→µν). Из-за отсутствия энергии нейтрино этот анализ кажется более сложным.

Команда ОИЯИ занимает лидирующие позиции в этом направлении анализа и привлекает к сотрудничеству других участников ATLAS. Руководители исследований (М.В.Чижов и Г.Двали) недавно показали глубокую связь предложенных киральных бозонов и свежих идей за пределами СМ, таких как SUSY и физика дополнительных измерений.

Поэтому в течение 2020 – 2022 гг. коллектив ОИЯИ продолжает поиск возбужденных бозонов не только в дилептонных каналах, но и в конечных состояниях с двумя струями, а также в совместном рождении с тяжелыми кварками [М.В. Чижов, В.А. Бедняков, Ю.А. Будагов, Физ. Атом. ядер 75 (2012) 90; Сотрудничество ATLAS, Phys. Rev. D91, 052007 (2015); М.В. Чижов, В.А. Бедняков, Phys.Atom.Nucl. 79 (2016) 721]. Чтобы подготовиться к анализу всех данных Run-2, новые Монте-Карло моделирования образования возбужденных бозонов должны быть выполнены в программной среде ATLAS для разных каналов. Эта задача является прямой обязанностью нашего института. Группа ОИЯИ планирует продолжить также анализ данных в мюонном канале.

Смешивание и масса Z’-бозона в поисках дибозонных резонансов

Нейтральные векторные Z’ бозоны являются одним из наиболее мотивированных сценариев физики за пределами Стандартной модели. Многие новые физические модели за пределами СМ, включая суперструнные и лево-право-симметричные модели, предсказывают существование таких бозонов. На самом деле они могут быть достаточно легкими, чтобы быть доступными на нынешних и/или будущих коллайдерах. Поиск таких нейтральных калибровочных бозонов Z’ — важный аспект программы экспериментальной физики настоящих и будущих коллайдеров высоких энергий.

В зависимости от рассматриваемой теоретической модели уже исключены массы Z’ порядка 4,5 ТэВ [3,4] и углы смешивания Z-Z’ на уровне 10−3. Эти ограничения исходят из высокоточных экспериментов с полюсом Z на LEP и на Стэнфордском линейном коллайдере (SLC), включая измерения формы линии Z, вероятности лептонных распадов (нормированные на общую ширину адронного распада Z), а также лептонную асимметрию вперед-назад. В то время как эти эксперименты практически не учитывали Z'-бозоны с пренебрежимо малым смешиванием Z-Z', точные измерения при более низких и более высоких энергиях (вдали от полюса Z), достижимые на TRISTAN и LEP2, соответственно, позволили исследовать амплитуду обмена Z' с помощью его интерференции с фотоном и Z-бозоном СМ. Однако, как было показано, на LHC при номинальной энергии коллайдера √s = 14 ТэВ и интегральной светимости Lint ≈ 100 фбн–1 существует высокий потенциал для значительного улучшения существующих ограничений на угол смешивания Z-Z' в дибозонном канале: pp→(Z2→W+ W-) + X.

В отличие от процесса Дрелла-Яна (DY) pp → Z' → l+ l− + X, где l = e, µ, канал с дибозонами не является основным каналом открытия, но может помочь понять происхождение новых калибровочных бозонов.

Команда ОИЯИ планирует:

1. Установить ограничения на угол смешивания W-W’ в процессах рождения WZ-бозонов в Run-1 и Run-2.

2. Установить ограничения на угол смешивания Z-Z’ в процессах образования дибозонов в Run-2.

3. Выполнить поиск резонансных и интерференционных эффектов новых калибровочных бозонов, процессов рождения дилептонов и установить ограничения на динамические параметры и массы в Run-2.

V/H(→ jet-jet)+gamma резонансы

Многие предложения по физике за пределами Стандартной модели включают предсказание новых массивных бозонов. Примерами являются Technicolor или “маленький Хиггс”, а также расширения сектора бозона Хиггса СМ - такие как включение дополнительного электрослабого синглетного скаляра. Режимы распада этих новых бозонов включают конечные состояния с Z- или W-бозоном и фотоном. Кроме того, интересным каналом поиска являются распады тяжелых бозонов со спином 1 на бозон Хиггса с массой 125 ГэВ и фотон. Команда ОИЯИ участвует в поиске массивных нейтральных и заряженных бозонов, распадающихся на фотон и Z бозон, W или бозон Хиггса с последующим адронным распадом этих бозонов. В поиске используется набор данных Run-2 рр-столкновений при энергии в центре масс √s = 13 ТэВ.

Квантовые черные дыры

Модели физики за пределами СМ, такие как ADD-модель, постулируют существование дополнительных измерений, которые могут привести к энергетическому масштабу квантовой гравитации в области ТэВ. Также и модель Рэндалла Сандрама-1 (RS1) постулирует существование дополнительных измерений, ведущих к легкой гравитации в ТэВ-масштабе. Квантовые черные дыры (КЧД) предсказываются в мелкомасштабных моделях гравитации, которые предлагают возможное решение проблемы иерархии масс СМ за счет понижения шкалы гравитации (МД) с планковской шкалы (∼ 1016 ТэВ) до значения примерно 1–10 ТэВ. Здесь MD — многомерная планковская шкала. Многомерная парадигма была развита в такие модели, как модели, предложенные Аркани-Хамедом, Димопулусом и Двали (модель ADD). В моделях с большими дополнительными пространственными измерениями, таких как модель ADD, только гравитационному полю разрешено проникать в n дополнительных пространственных измерений, а все поля СМ локализованы в обычном четырехмерном пространстве-времени. Модель, используемая в этом анализе, имеет следующие особенности. КЧД имеют массы выше MD и спин равный 0. Рождение и распад должны сохранять полный угловой момент, цвет и электрический заряд. КЧД распадаются на конечные состояния двух частиц. Другими словами, КДД демонстрируют поведение квазичастиц в отличие от полуклассических черных дыр, которые распадаются под действием излучения Хокинга на большое количество частиц. В этих моделях барионные и лептонные числа могут нарушаться при рождении КЧД.

Команда ОИЯИ завершает анализ с использованием данных Run-2 и после повторной оптимизации и некоторой подготовительной работы приступает к анализу данных Run-3.

**ОИЯИ в рабочей группе SUSY**

Поиск заряженного бозона Хиггса в распады на суперсиметричные частицы (сложные конечные состояния)

У ОИЯИ есть очень мотивированные планы по продолжению изучения возможности обнаружения заряженного бозона Хиггса в МSSМ. Чтобы доказать открытие SUSY, необходимо когерентно найти как можно больше частиц SUSY, а заряженный бозон Хиггса является одним из основных «игроков» SUSY. Этот поиск будет осуществляться по распаду заряженного бозона Хиггса на конечные состояния SUSY, чарджино и нейтралино. Такие конечные состояния позволяют искать и открывать заряженный бозон Хиггса, когда все остальные каналы его распада на обычные частицы СМ (не-SUSY) запрещены. Этот канал распада SUSY предполагает довольно большую массу этого бозона Хиггса (большую, чем 250 ГэВ/c2), где доминируют ассоциированно заряженный бозон Хиггса и образование топ-кварков. Рассмотрены все нейтралино-чарджино хиггсовские каналы распада, в которых в конечном состоянии находятся три заряженных лептона, два нейтральных стабильных невидимых нейтралино и некоторое количество нейтрино.

Предварительное исследование показало хорошие перспективы выбранного процесса для открытия заряженного бозона Хиггса, предсказанного для достаточно широкого пространства параметров tgβ и mH±. Тем не менее это возможно только при хорошо определенных значениях других важных параметров МSSМ - µ и M2. Поэтому команда ОИЯИ планирует сначала изучить 4-мерное пространство параметров MSSM, чтобы выбрать лучшую стратегию поиска на основе смоделированных выборок, созданных рабочей группой ATLAS Higgs для эталонных точек SUSY. Сначала для определения реального фона (включая фоны SUSY) будут использоваться реальные данные ATLAS низкой светимости, в дальнейшем по мере увеличения данных планируется поиск первых сигналов (Руководитель А.А.Солошенко).

Работы и планы ОИЯИ по поиску заряженного бозона Хиггса одобрены рабочей группой HSG5 и обсуждались на двух семинарах в Дубне.

В целом, изучение SUSY с помощью детектора ATLAS, открытие SUSY и когерентное (SUSY) решение проблемы темной материи входят в число основных целей участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS.

**ОИЯИ и развитие программного обеспечения эксперимента АТЛАС**

Индексирование событий

EventIndex — это полный каталог всех событий ATLAS, содержащий ссылки на все файлы, содержащие данное событие на любом этапе обработки. Он получает информацию о событиях из различных источников данных, таких как CERN и Grid-сайты. Он также проверяет данные на наличие повреждений и непротиворечивость, предоставляет информацию о перекрытии событий или наборов данных различными цепочками триггеров, а также позволяет быстрый обзор данных. Команда ОИЯИ в течение последних 3-х лет участвовала в разработке и поддержке системы управления индексацией данных на серверах GRID, мониторинге системных параметров и обработки, и осуществляла полную поддержку системы EventIdex.

Система TDAQ

Команда ОИЯИ участвует в поддержке компонентов системы TDAQ реального времени, разработке систем оперативного мониторинга и мониторинга сетей.

**Кадровые ресурсы**

Общее количество сотрудников группы ОИЯИ, участвовавших в программе ATLAS Physics, составляет 32 (29 FTE) человека, в том числе 6 профессоров, 12 постдоков и 14 молодых ученых и студентов, в работах по модернизации детектора принимают участие 27 сотрудников (14,4 FTE). Вся команда обеспечивает 43,4 FTE.

Помимо участия в самом анализе, члены команды АТЛАС-ОИЯИ также играли управленческие роли в Сотрудничестве. В последнее время мы брали на себя обязанности координаторов и заместителей руководителей рабочих групп ATLAS (WG), а также технических контактных лиц с другими рабочими группами, такими как WG Стандартной модели, подгруппа B-Physics, Trigger Performance и т. д.

Большая часть сотрудников занимается проектом на протяжении многих лет. У них хорошо зарекомендовавшая себя репутация в Коллаборации АТЛАС и за его пределами, солидный опыт и необходимые навыки для выполнения всех наших обязательств.

Зоны ответственности в работе и обслуживании детектора

Согласно решению руководства ATLAS в 2010 году и в последующие годы устанавливается следующий порядок распределения задач эксплуатации ATLAS:

1. Операционные задачи (ОТ) перегруппированы в три категории:

* Класс 1: Смены ACR – центральные и детекторные смены в контрольной комнате ATLAS в Р1.
* Класс 2: Прочие смены – Дополнительные смены, включая смены в удаленных контрольных комнатах, компьютерные смены, удаленные смены, дежурные смены.
* Класс 3: Экспертные операционные задачи – Эксплуатационные задачи с участием экспертов по системам, подготовке данных, вычислениям, программному обеспечению.

2. Ожидается, что участвующие институты будут вносить вклад в каждый из трех классов в соответствии со своей долей OT. По состоянию на 2015 год класс 1 и класс 2 объединены в OT, поэтому можно делать и то, и другое. Участие в одном классе не могут быть свободно заменены работами другого класса. Например, OT класса 3 (экспертные рабочие задачи) не могут быть заменены OT класса 1 (смены ACR) или класса 2 (дежурные смены). В период 2020-2022 гг. ОИЯИ успешно выполнил все запрошенные работы в ОТ класса 1 и 2, обеспечив:

1. 0,56 FTE при 0,45 FTE, запрошенных в 2020 г.

2. 0,63 FTE при 0,44 FTE, запрошенных в 2021 г.

3. 1,53 FTE при 1,13 FTE, запрашиваемых в 2022 г.

Главной задачей является участие в ATLAS SLIMOS/TI - Safety shifter и мы хотели бы продолжать таким образом охватывать такие смены.

На начало периода 2020-2022 гг. смены 3 класса были покрыты на уровне ~30%.

1. 5,54 FTE при 7,64 FTE, запрашиваемых в 2020 г.

2. 7,50 FTE при 7,60 FTE, запрошенных в 2021 г.

3. 6,93 FTE при 9,52 FTE, запрашиваемых в 2022 г.

Это покрытие было в основном связано с задачами «Обработка и анализ данных сети» и «Управление и конфигурация DAQ/HLT», а также квалификационными задачами для включения в авторский список. Есть несколько второстепенных задач, обычно выполняемых членами команды ОИЯИ в подсистемах детектора.

До начала 2017 года нехватка FTE в этом классе от ОИЯИ не вызывала беспокойства. Но опыт последних лет показал, что в так называемых зонах эксплуатации и обслуживания ощущается нехватка кадров. Было решено принять на себя так называемые институциональные обязательства: когда институты, входящие в ATLAS, обязуются выполнять определенные задачи на долгосрочной основе и предоставлять услуги или определенные результаты для работы детектора или для других областей деятельности (триггер, подготовка данных, компьютинг и программное обеспечение, физика). Руководство группы АТЛАС-ОИЯИ ввело специальные требования для обеспечения квоты смен класса 3. Во-первых, каждый постдок и молодой ученый из нашей группы физических анализов должен взять на себя ответственность как минимум за 0,25 FTE. Это было сделано путем участия в разработке программного обеспечения TileCal, расчете эффективности триггера B-физики, оптимизации и сопровождении его программного обеспечения. Также в 2018 г. на базе ОИЯИ сформирована команда по задаче «Индексирование событий». Изначально частично работали четыре участника, которые предоставили ~1,5 FTE, а с 2019 года к этой команде присоединился еще один участник с 1 FTE. Кроме того, в этом году команда из четырех участников получила грант на разработку программного обеспечения ATLAS, и мы ожидаем, что они будут участвовать на уровне ~2 FTE.

**Список публикаций**

В этом разделе представлен список публикаций со значительным вкладом членов команды АТЛАС-ОИЯИ за период 2020 – 2022 гг.

Журнальные публикации

1. S. Turchikhin et al., ATLAS data quality operations and performance for 2015-2018 data-taking, [JINST 15 (2020) P04003](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/04/P04003)

2. E. Khramov et al., Search for heavy resonances decaying into a photon and a hadronically decaying Higgs boson in pp collisions at √s=13 TeV with the ATLAS detector, [Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 251802](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.125.251802)

3. F. Ahmadov et al., Measurements of WH and ZH production in the H→bb decay channel in $pp$ collisions at 13 TeV with the ATLAS detector, [Eur. Phys. J. C 81 (2021) 178](https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-020-08677-2)

4. D. Kharchenko, V. Kruchonak, V. Elkin et al., Performance of the ATLAS RPC detector and Level-1 muon barrel trigger at √s=13 TeV, [JINST 16 (2021) P07029](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/16/07/P07029)

5. I. Eletskikh et al., AtlFast3: the next generation of fast simulation in ATLAS, [Comput Softw Big Sci 6, 7 (2022)](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s41781-021-00079-7.pdf)

6. T. Lyubushkina, S. Turchikhin et al., Study of Bc+ → J/ψ Ds+ and Bc+ → J/ψ Ds\*+ decays in $pp$ collisions at √s=13 TeV with the ATLAS detector, [JHEP 08 (2022) 087](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP08(2022)087)

7. T. Lyubushkina, S. Turchikhin et al., Performance of the ATLAS muon triggers in Run 2, [JINST 15 (2020) P09015](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/09/P09015)

8. S. Turchkhin et al., Measurements of the production cross-section for a Z boson in association with b-jets in proton-proton collisions at √s=13 TeV with the ATLAS detector, [JHEP 07 (2020) 44](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP07(2020)044?wt_mc=Internal.Event.1.SEM.ArticleAuthorIncrementalIssue&utm_source=ArticleAuthorIncrementalIssue&utm_medium=email&utm_content=AA_en_06082018&ArticleAuthorIncrementalIssue_20200711)

9. D. Dedovich, A. Gongadze, L. Gongadze, V. Kruchonok, I. Minashvili, R. Sotensky and D. Zavazieva, Bulk Micromegas fabrication at JINR, 2019 JINST **14** T07004

10. E. Cherepanova et al., A search for the decays of stopped long-lived particles at √s=13 TeV with the ATLAS detector, [JHEP 07 (2021) 173](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP07(2021)173)

11. G.I. Lykasov, A.V. Lipatov et al., Novel Heavy-Quark Physics Phenomena, *Prog.Part.Nucl.Phys.* 114 (2020) 103802

12. Lipatov, A. V. and Lykasov, G. I. and Malyshev, M. A. and Turchikhin, S. M., Probing the proton structure with associated vector boson and heavy flavor jet production at the LHC, *Phys.Rev.D* 106 (2022) 5, 054017

13. Lipatov, A. V. and Lykasov, G. I. and Malyshev, M. A., Toward the global fit of the TMD gluon density in the proton from the LHC data, *Phys.Rev.D* 107 (2023) 1, 014022

14. Prokhorov, A. A. and Lipatov, A. V. et al., Revisiting the production of J/ψ pairs at the LHC, *Eur.Phys.J.C* 80 (2020) 11, 1046

15. Baranov, S. P., Lipatov, A. V., Prokhorov, A. A., Charm fragmentation and associated J/ψ +Z/W± production at the LHC

16. Baranov, S. P., Lipatov, A. V., Prokhorov, A. A., Role of initial gluon emission in double J/ψ production at central rapidities, *Phys.Rev.D* 106 (2022) 3, 034020

17. A.A. Pankov et al., Updated constraints on Z' and W' bosons decaying into bosonic and leptonic final states using the run 2 ATLAS data, *Phys.Rev.D* 103 (2021) 5, 053009

18. Serenkova, I. A., Pankov, A. A., Bednyakov, V. A., Improved Constraints on the Heavy Gauge Bosons Decaying to Pairs of Electroweak Bosons by Using the Expected Run 3 Data and HL-LHC Options, *Nonlin.Phenom.Complex Syst.* 25 (2022) 4, 318-325

19. Yu. A. Koultchitski, P. Tsiareshka, N.A. Rusakovich, E. Plotnikova et al., Two-particle Bose-Einstein correlations in pp collisions at √s=13 TeV measured with the ATLAS detector at the LHC, [Eur. Phys. J. C 82 (2022) 608](https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-022-10472-0)

Другие публикации

1. F. Ahmadov et al., Measurements of WH and ZH production in the H→bb decay channel in pp collisions at 13 TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2020-006

2. E. Khramov et al., Search for high-mass Wγ and Zγ resonances using 139 fb-1 of pp collisions at √s = 13 TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2021-041

3. T. Lyubushkina, S. Turchikhin et al., Study of the Bc+ → J/ψ Ds+ and Bc+ → J/ψ Ds\*+ decays in pp collisions at $\sqrt{s} =13$ TeV with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2021-046

4. I. Yeletskikh, A. Vasyukov et al., Observation of an excess of di-charmonium events in the four-muon final state with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2022-040

**Список докладов на конференциях и выступлений**

В этом разделе полный список докладов на конференциях, которые представили члены команды АТЛАС-ОИЯИ (17 докладов на 15 конференциях):

1. INSTR-2020

* I. Minashvili: Construction and geometrical precision assessment of the Micromegas detectors for the ATLAS New Small Wheel upgrade

2. PHENO-2020

* T. Lyubushkina: ATLAS results on quarkonia and heavy flavour production (including exotics)

3. Epiphany-2020

* Yu. Koultchitski: Soft QCD at ATLAS and CMS

4. ICHEP-2020

* S. Turchkhin: ATLAS studies of Spectroscopy and exotics

5. [MPI@LHC-2021](mailto:MPI@LHC-2021)

* Yu. Koultchitski: Minimum Bias & Underlying Event studies at ATLAS: review of measurements and MC tuning

6. QWG-2021

* I. Yeletskikh: Quarkonium production studies in pp collisions at ATLAS

7. LHCP-2021

* M. Demichev: Tests of LM2 MicroMegas Modules on Cosmic stand in Dubna

8. FPCP-2021

* I. Yeletskikh: ATLAS results on exotic heavy hadrons
* I. Yeletskikh: Exotics hadrons at hadronic machines

9. EPS-HEP-2021

* T. Lyubushkina: ATLAS results on charmonium production and Bc production and decays

10. HADRON-2021

* T. Lyubushkina: ATLAS results on charmonium production and Bc production and decays

11. ICNFP-2021

* I. Yeletskikh: ATLAS results on charmonium production, Bc production and decays, and exotic heavy hadrons

12. PANIC-2021

* I. Yeletskikh: ATLAS results on J/psi p resonances in the Λb -> J/ψ p K decays
* S. Turchikhin: ATLAS results on charmonium production and Bc production and decays

13. LC-2021

* S. Turchikhin: ATLAS results on charmonium production and Bc production and decays

14. ICNFP-2022

* I. Yeletskikh: ATLAS results on exotic hadronic resonances

15. LHC Days 2022

* I. Yeletskikh: B-physics in ATLAS and CMS

**Диссертации**

1. A. Tropina, Study of the associated production of the Higgs boson and top quark at the ATLAS experiment, Bachelor Thesis
2. A. Didenko, Application of machine learning for the analysis of Higgs boson production in association with single top-quark, Master Thesis
3. A. Vasyukov, Study of tetraquarks Zc(4200) in B0 to J/ψKπ decays, Master Thesis
4. M. Manashova, Study of the associated production of the Higgs boson and W- or Z-boson using different Monte-Carlo generators, Мaster Тhesis

**3. Международное научно-техническое сотрудничество**

Фактически участвующие страны, институты и организации.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Организация** | **Страна** | **Город** | **Участники** | **Тип соглашения** |
| Foundation ANSL | Армения | Ереван | Г.Акопян | Совместная работа |
| IP ANAS | Азербайджан | Баку | Н.Хусейнов + 5 | Совместная работа |
| GSTU | Беларусь | Гомель | A.A. Панков + 3  И.A. Серенкова + 1 | Обмен визитами |
| GSTU |  |  | A.A. Бабич + 1 | Совместная работа |
| GSU |  |  | Н.В. Максименко | Обмен визитами |
| GSU |  |  | В.В. Андреев + 2 | Совместная работа |
| IAP NASB |  | Минск | Р.Г.Шуляковский + 2 | Обмен визитами и совместная работа |
| IP NASB |  |  | Ю.А.Курочкин + 3 | Обмен визитами и совместная работа |
| INP BSU |  |  | A.A. Солин  A.В.Солин  П.M. Старовойтов + 5 | Обмен визитами |
| INP BSU |  |  | A.В. Гриневич | Совместная работа |
| JIPNR-Sosny NASB |  |  | В.В. Гилевский + 2 | Обмен визитами и совместная работа |
| SU | Болгария | София | M.В. Чижов | Совместная работа |
| UdeM | Канада | Монреаль | К. Лерой | Совместная работа |
| TRIUMF |  | Ванкувер | Л.Л.Курчанинов | Совместная работа |
| CERN | ЦЕРН | Женева | M. Винктер  A. Хоккер  K. Якобс | Соглашение |
| LPC | Франция | Клермон-Ферран | Ф. Васи | Совместная работа |
| LAL |  | Орсэ | Д. Фурнье | Совместная работа |
| HEPI-TSU | Грузия | Тбилиси | T. Джобава + 3 | Совместная работа |
| INFN | Италия | Пиза | T. Дел Прет | Совместная работа |
| NIKHEF | Нидерланды | Амстердам | Х. Ва-де-Грааф | Совместная работа |
| ITEP | Россия | Москва | И.Цукерман | Совместная работа |
| LPI RAS |  |  | A.А.Снесарев + 1 | Совместная работа |
| MSU |  |  | Л.Смирнова | Совместная работа |
| IHEP |  | Протвино | С.П. Денисов  A.М.Зайцев | Совместная работа |
| NOSU |  | Владикавказ | И. Tваури | Совместная работа |
| CU | Словакия | Братислава | A. Дубничкова  С.Токар | Совместная работа |
| IP SAS |  |  | С.Дубничка + 3 | Совместная работа |
| IFAE | Испания | Барселона | M. Кавалли-Сфорца | Совместная работа |
| ANL | США | Лемонт, IL | Л.Прайс | Соглашение |
| SSU | Узбекистан | Самарканд | A. Артиков  У.Салихбаев | Совместная работа |

**4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных**

**4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№**  **п/п** | **Категория**  **работника** | **Основной персонал,**  **сумма FTE** | **Ассоциированный персонал,**  **сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 35.8 | 1 |
| 2. | инженеры | 6.3 |  |
| 3. | специалисты | 1.3 |  |
|  | **Итого:** | **43,4** | **1** |

**Фактическая сметная стоимость темы** (в единицах kUSD)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Статьи расходов: | Полная стоимость | 1й год  2020 | 2й год  2021 | 3й год  2022 |
| 1. | Прямые расходы по проекту: конструкторское бюро, техническое обслуживание детектора ATLAS, оплата договорных исследований | 829.4 | 387.2 | 348.1 | 94.1 |
| 2. | Обязательства ОИЯИ по участию в проекте  Модернизации детектора (Фаза-1) | 300,0 | 20,0 | 30,0 | 30,0 |
| 2. | Командировочные: | 566.8 | 154.3 | 194.2 | 218.3 |
|  | **Итого прямые расходы** | **1476.2** | **561.5** | **572.3** | **342.4** |

**Руководитель темы**

**\_\_\_\_\_ / В.А. Бедняков /**

**“ “ 202\_г.**

**Руководитель проекта**

**\_\_ /\_Е.В. Храмов /**

**“ “ 202\_г.**

**Руководитель проекта**

**\_\_ /\_А.П. Чеплаков\_/**

**“ “ 202\_г.**

**Экономист лаборатории**

**/ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/**

**“ “ 202\_ г.**