

ОТЗЫВ
на отчёт по Проекту «ALICE» за период 2021-2025 гг.
и его продление на 2026-2030 гг.
(тема ПТП 1088)

Эксперименты по столкновениям ультра-релятивистских тяжелых ядер позволяют на очень короткое время и в очень малых объемах создавать и исследовать в лаборатории новые формы кварк-глюонной материи (КГМ). Расчеты КХД на решетке указывают на то, что при нулевом значении барионного химического потенциала $\mu_B = 0$ и температуре T порядка 156 МэВ происходит фазовый переход типа кроссовер из состояния адронного газа в состояние КГМ. Ядерные столкновения при энергиях коллайдера LHC нацелены на изучение свойств КГМ в области фазовой диаграммы КХД при температурах в диапазоне $150 < T < 300$ МэВ и практически нулевом барионном химическом потенциале.

По этой причине свойства КГМ, образующейся в столкновениях ядер на LHC, аналогичны свойствам материи, из которой состояла Вселенная на начальном этапе ее развития через несколько микросекунд после Большого взрыва. Исследования при энергиях LHC сосредоточены на определении фундаментальных свойств материи высокотемпературной фазы и идеально подходят для тестирования термодинамических свойств и гидродинамического поведения КГМ.

Установка ALICE (A Large Ion Collider Experiment) является многоцелевым детектором, который специально создавался для изучения столкновений тяжелых ионов при энергиях коллайдера LHC.

Международная коллаборация ALICE включает более 1800 специалистов из 174 институтов из 42 стран.

Группа ОИЯИ является полноправным участником международной коллаборации ALICE. Она внесла значительный вклад в разработку дипольного магнита установки, в конструкцию и создание ярма магнита весом 800 тонн, в производство дрейфовых камер для детектора переходного излучения, в поставку и тестирование кристаллов для электромагнитного калориметра, активно участвует в наборе и анализе экспериментальных данных, в поддержке работы триггерной системы ALICE FIT, в подготовке публикаций результатов в научных журналах и представлении этих результатов на конференциях.

За отчетный период основные усилия группы ОИЯИ были сконцентрированы на изучении: фемтоскопических (Бозе-Эйнштейна) корреляций, рождения лёгких векторных мезонов в ультра-периферических Pb-Pb столкновениях, образования Σ гиперонов в pp столкновениях. Группа ОИЯИ продолжала участвовать в поддержании работы и развитии триггерной системы ALICE FIT, в разработке стратегии триггерного анализа событий, в поддержании и развитии GRID-ALICE технологий для анализа в ОИЯИ.

За период 2021–2025 годов группой ОИЯИ в эксперименте ALICE был сделан существенный вклад в получение новых физических результатов мирового уровня: 1. Проведен детальный анализ фемтоскопических корреляций заряженных каонов ($K^{ch}K^{ch}$) в pp, p-Pb и Pb-Pb соударениях при энергиях 13 ТэВ, 2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ соответственно. Исследования корреляций в pp соударениях проводились с отбором событий по сферичности, что позволяло отбирать отдельно сферичные события и события с образованием струй. Сравнение полученных зависимостей

радиусов источников R_{inv} от поперечной массы пар m_T в этих событиях показывает схожую зависимость, что может означать некоторое проявление коллективных гидродинамических механизмов в pp столкновениях.

2. Впервые показано, что радиусы источника для нетождественных и тождественных каонных пар, в Pb-Pb столкновениях при энергии 2.76 ТэВ, совпадают и уменьшаются с ростом величин центральности и поперечного импульса пары k_T , что соответствует предсказаниям гидродинамических моделей.

3. Сделан 3-D анализ пар идентичных заряженных каонов для Pb-Pb и p-Pb столкновений при энергии 5.02 ТэВ. Впервые получена зависимость времени эмиссии каонов (τ) от средней множественности заряженных частиц $(N_{ch})^{1/3}$, которая показывает схожесть времен τ для p-Pb и Pb-Pb столкновений при одинаковой множественности заряженных частиц.

4. Для ультра-периферических Pb-Pb столкновений (УПС) при энергии 5.02 ТэВ был проделан детальный анализ процессов когерентного рождения одиночных ρ^0 мезонов и образования состояния четырёх пионов ($\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$), которое может быть результатом распада одного ρ^0 состояния либо двух разных ρ^0 состояний, интерферирующих между собой. Впервые при энергиях LHC было получено двойное дифференциальное сечение по быстроте и инвариантной массе четырёх пионов.

5. Получены первые результаты измерения выходов Σ гиперонов в pp столкновениях при энергиях 7 и 13 ТэВ. Показано, что только модель EPOS LHC достаточно хорошо описывает измеренное двойное дифференциальное распределение по поперечному импульсу p_T для заряженных гиперонов, а различные версии модели PYTHIA недооценивают выход в 1.5-2 раза.

6. Продолжено развитие феноменологической модели BWTP для описания спектров поперечного импульса (p_T) различных адронов в центральной области быстрот, измеренных в pp, p-A и A-A столкновениях. В новой версии модели возможно также описание данных по p_T -спектрам и значениям коэффициента эллиптического потока v_2 для различных адронов, полученных при энергиях на RHIC и LHC.

Научная программа эксперимента ALICE в третьем (RUN3) и четвёртом (RUN4) сеансе работы LHC предполагает набор крайне высокой величины интегральной светимости столкновений в различных режимах работы. Для решения данной задачи была разработана и введена в эксплуатацию новая гибридная триггерная система FIT (Fast Interaction Trigger). В 2021-2025 гг. группа ОИЯИ продолжала участвовать в поддержании работы и развитии триггерной системы ALICE FIT, в разработке программного обеспечения для триггерного анализа событий и оценки их качества.

Группа ОИЯИ ответственна за поддержание и развитие системы ALICE-GRID второго уровня (tier 2) в ОИЯИ. Ресурсы и эффективность компьютерного центра ОИЯИ обеспечили лидирующее положение ОИЯИ среди российских компьютерных центров 2-го уровня. После 2024 года ОИЯИ остаётся единственным участником от России в ALICE-GRID.

Результаты, полученные группой ОИЯИ в период 2021-2025 гг., опубликованы в 8 статьях в реферируемых журналах и докладывались 10 раз на различных международных конференциях.

На период 2026-2030 гг. работы в эксперименте ALICE группа ОИЯИ планирует принять участие в следующих пунктах научной программы:

Исследования фемтоскопических корреляций:

1. Провести исследования по фемтоскопическим корреляциям каонных пар для p-Pb столкновений при энергии 5.02 ТэВ с отбором сферичных событий с малым вкладом струйных образований и событий с большим вкладом струй.
2. Провести проверку в рамках модели взаимодействий в конечном состоянии (ВКС) динамики образования источников излучения каонов в системах с малыми размерами при столкновениях p+Pb по сравнению с большими размерами при столкновениях Pb-Pb. Повторение данного анализа для pp столкновений при энергии 13.6 ТэВ.
3. Анализ $K^{\text{ch}}K^{\text{ch}}$ пар для pp столкновений с детальным учётом вклада в корреляционную функцию от известных резонансов (K^* , ϕ , a_0 , f_0). Изучение возможности определения размера источника (r_{cor}), обусловленного только фемтоскопическими корреляциями без влияния частиц, образующихся при распадах резонансов.

Исследования ультра-периферических столкновений:

1. Исследования эффектов глюонных экранировок в УПС Pb-Pb столкновениях при энергии 5.36 ТэВ, полученных в процессе Run 3. Ожидаемая статистика позволит ALICE улучшить точность измерения сечения когерентного рождения J/ψ , и исследовать другие тяжелые векторные мезоны, такие как $\psi(2S)$ и Y .
2. Изучение центрального эксклюзивного рождения (ЦЭР) дифракционных состояний с малой массой в pp столкновениях при энергии 13.6 ТэВ. Предложенный метод анализа наилучшим образом подходит для исследования скалярных и тензорных резонансных состояний мезонов.

Изучение процессов рождения Σ гиперонов:

1. Завершить анализ рождения $\Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0$ гиперонов в pp столкновениях при 7 ТэВ с опубликованием итоговой статьи ALICE.
2. Исследование рождения $\Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0$ гиперонов в pp столкновениях при энергиях 13 ТэВ и 13.6 ТэВ и в столкновениях ядер Pb-Pb, O-O и p-Pb.
3. Поиск нового ядра Σ^0 - гипертритона, состоящего из (p, n, Σ^0) по его распаду на ядро Λ - гипертритон (p, n, Λ) и фотон.
4. Изучение возможности измерения спиновых потоков вращающейся адронной материи, образующихся при нецентральных столкновениях частиц и ядер с передачей большого углового момента в конечные состояния в эксперименте ALICE.

Дальнейшее развитие модели BWTP для рождения адронов в pp, p-A и A-A столкновениях:

1. Обобщение модели с добавлением зависимости от быстроты.
2. Возможность описания высоких гармоник ($n > 2$) азимутальной анизотропии адронов.
3. Возможность описания данных, полученных в Pb-Pb столкновениях при 5.02 ТэВ по рождению ω и D_s мезонов, а также дейтронов и других лёгких ядер;

4. Создания на основе модели генератора частиц в р-р столкновениях.

Сервисные работы по обслуживанию детекторов FIT включают в себя экспертное сопровождение: систем считывания и калибровки данных, системы управления и контроля, оценки качества данных и триггеров. Необходима дальнейшая разработка программного обеспечения и автоматизированное тестирование. Группа ALICE-ОИЯИ разрабатывает и поддерживает специализированный набор программ, которые являются общими для всех анализов и позволяют отбирать рр столкновения и столкновения тяжелых ядер с применением системы триггеров и специально разработанных условий отбора, подавляя при этом события взаимодействия пучков с газом детектора, возможные наложения нескольких событий одновременно (pile-up), а также события с недостаточным качеством данных.

Поддержка GRID структуры эксперимента ALICE в ОИЯИ: переход на новое программное обеспечение, регулярная замена устаревающих вычислительных узлов и систем хранения данных на новые; участие в реализации проекта по использованию мощностей суперкомпьютеров и в развитии других GRID технологий в ALICE.

Группа ОИЯИ планирует на всех этапах исследований по указанным направлениям представлять результаты на международных конференциях и участвовать в подготовке публикаций.

В целом, предложенная в проекте физическая программа исследований хорошо обоснована и её успешная реализация не вызывает сомнений.

Запрошенное авторами проекта финансирование соответствует решаемым задачам.

Предлагаю одобрить отчёт по Проекту «ALICE» за период 2021-2025 гг. Рекомендую принять Проект по участию ОИЯИ в эксперименте ALICE в 2026–2030 годах с первым приоритетом и обеспечить запрашиваемые авторами ресурсы в полном объеме.

Ведущий научный сотрудник ЛФВЭ, PhD

/А.В. Тараненко/

ataranenko@jinr.ru

