

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____/_____/_____
“ ____ “ _____ 202_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ
ПРОЕКТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы 02-1-1088-2009/2025

1.2. Шифр проекта 02-1-1088-1-2010/2025

1.3. Лаборатория ЛФВЭ

1.4. Научное направление Релятивистская ядерная физика

1.5. Наименование проекта ALICE

1.6. Руководитель проекта А. С. Водопьянов

1.7. Заместитель руководителя проекта Б. В. Батюня

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

ALICE является многоцелевым экспериментом для исследования взаимодействий тяжёлых ионов, который был создан для изучения физики сильно взаимодействующей материи и кварк - глюонной плазмы в ядро-ядерных столкновениях на LHC. Проводятся также изучение pp столкновений для проверки предсказаний моделей на основе КХД. В настоящее время в этом эксперименте участвуют более 1800 специалистов из 174 институтов из 42 стран.

Главные усилия группы ОИЯИ в анализе данных и в физическом моделировании сконцентрированы на изучении фемтоскопических корреляций, рождения лёгких векторных мезонов и тяжёлых кваркониев в ультра-периферических Pb-Pb столкновениях, образования Σ гиперонов в pp столкновениях. Кроме того, группа ОИЯИ участвует в поддержании работы триггерной системы ALICE FIT и в разработке стратегии триггерного анализа событий, а также продолжает участвовать в поддержании и развитии GRID-ALICE анализа в ОИЯИ.

2.2. Исследование фемтоскопических корреляций

2.2.1. Работы, выполненные за период 2021-2025 гг.

Экстремально высокие плотности энергии, достигаемые в столкновениях тяжёлых ионов на LHC, могут приводить к образованию кварк-глюонной плазмы (КГП): состоянию материи с характерными партонными степенями свободы. Считается, что возникающая в результате столкновения сжатая сильно

взаимодействующая система подвергается продольному и поперечному расширению. Экспериментально такое расширение может проявлять себя через фемтоскопические корреляции Бозе-Эйнштейна для пар тождественных частиц или через корреляции пар нетождественных частиц за счёт сильных взаимодействий в конечном состоянии.

За период 2021-2025 гг группа ОИЯИ провела целый ряд различных типов анализа 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 (на пару нуклонов) соответственно. При этом был использован опыт, накопленный в предыдущие годы по методическим исследованиям (отбору отдельных частиц и их пар, идентификации каонов и учёту фона) и использованию различных Монте-Карло генераторов событий.

Исследования корреляций в pp соударениях проводились с отбором событий по сферичности, которая определялась по формуле

$$S_{XY} = \frac{1}{\sum_i p_T^i} \sum_i \frac{1}{p_T^i} \begin{pmatrix} (p_x^i)^2 & p_x^i p_y^i \\ p_x^i p_y^i & (p_y^i)^2 \end{pmatrix},$$

(p_T , p_x , p_y компоненты импульсов частиц), что позволяло отбирать отдельно сферичные события с $S_{XY} > 0,7$ и события с образованием струй с $S_{XY} < 0.3$. Основным интересом является в сравнении зависимостей радиусов источников от поперечной массы пар m_T в этих событиях, для проверки возможного проявления коллективных эффектов в pp столкновениях. Корреляционная функция (КФ) исследовалась аппроксимацией по формуле

$$C(q_{inv}) = N[1 - \lambda + \lambda K(r, q_{inv})(1 + \exp(-R_{inv}^2 q_{inv}^2))]D(q_{inv}), \quad q_{inv} = \sqrt{|\mathbf{q}|^2 - q_0^2} \quad (1),$$

где N — коэффициент нормировки, R_{inv} — радиус источника, K — функция кулоновского взаимодействия с радиусом r , D — функция, отражающая фоновые эффекты, и λ — фактор силы корреляции. Зависимости R_{inv} от поперечной массы (m_T) для пар пионов и каонов в событиях разных множественностей и S_T (S_{XY}) показаны на Рис.1, где видно, что R_{inv} уменьшаются с ростом m_T в обоих случаях отборов по S_T , т.е. и в событиях без образования струй, что может означать некоторое проявление коллективных гидродинамических механизмов в pp столкновениях. Эти результаты представлялись на конференции “5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2020), October 7, 2020, MEPhI, Moscow”, и опубликованы в работе [1].

В Pb-Pb столкновениях при энергии 2.76 ТэВ (на пару нуклонов) исследовались корреляции пар K^+K^- мезонов. Типичная форма КФ показана на Рис.2, где синие точки получены в эксперименте, а красная кривая — результат аппроксимации в модели по формуле

$$C_{FSI}(p_1, p_2) = 1 + c_{sFSI}(p_1, p_2) + N_1 C_{\phi\text{-direct}}(p_1, p_2) + N_2 C_{\phi}(p_1, p_2). \quad (2)$$

Детально приведенная выше формула рассмотрена в работах [2]. Здесь отметим, что C_{sFSI} определяет вклад f_0 и a_0 мезонов, а $C_{\phi\text{-direct}}$ и C_{ϕ} — вклады ϕ мезонов, образующихся соответственно на кварк-глюонном этапе и на этапе взаимодействий в конечном состоянии (ВКС).

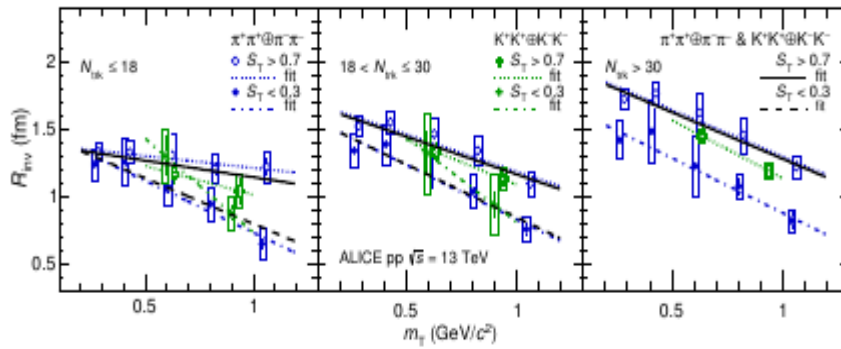


Рис. 1

В качестве свободных параметров берутся: радиус источника излучения K^+ и K^- , масса f_0 мезона, константы связи для каналов $f_0 \rightarrow K^+K^-$, $f_0 \rightarrow \pi\pi\pi$ и доли вкладов N_1 , N_2 . Остальные величины взяты из ранее проведенных исследований. В течение 2020-2021 гг. совместно с автором модели Р. Ледницки были сделаны уточнения полученных из аппроксимации значений массы и ширины f_0 , которые составили $967 \pm 3 \pm 7 \text{ MeV}/c^2$ и $43,8 \pm 8,8 \pm 6,9 \text{ МэВ}$, что соответствует табличным величинам. Кроме того, более детально исследовались возможные значения N_1 и N_2 с привлечением дополнительной корреляции параметров модели. В результате параметры N_1 и N_2 были получены соответственно в пределах 0,7–0,8 и 0,3–0,2, т.е. доля образования ϕ мезонов на стадии FSI не превышает 30%. Рисунок 3 показывает зависимости радиусов источника (R_{inv}) от поперечного импульса пары K^+K^- (k_T) для событий с различными центральностями. Для сравнения приведены также результаты, полученные группой ОИЯИ для пар тождественных каонов (K^+K^+/K^-K^-) [3]. Из Рис.3 видно, что радиусы для нетождественных и тождественных каонных пар совпадают и уменьшаются с ростом величин центральности и k_T , что соответствует предсказаниям гидродинамических моделей [4]. Приведённые результаты опубликованы в работе [5].

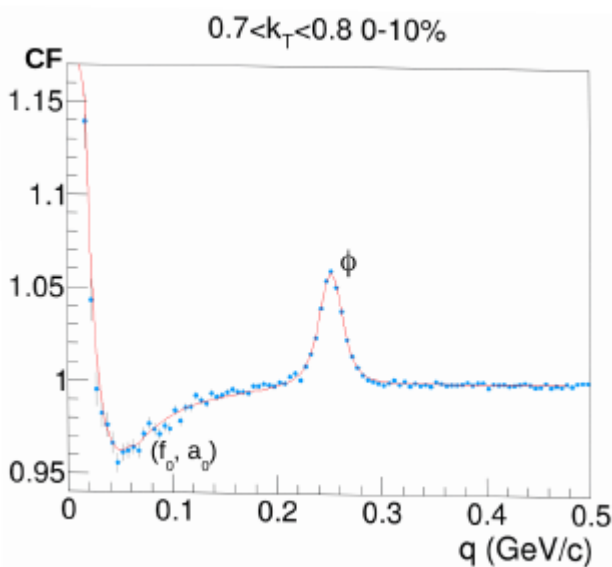


Рис. 2

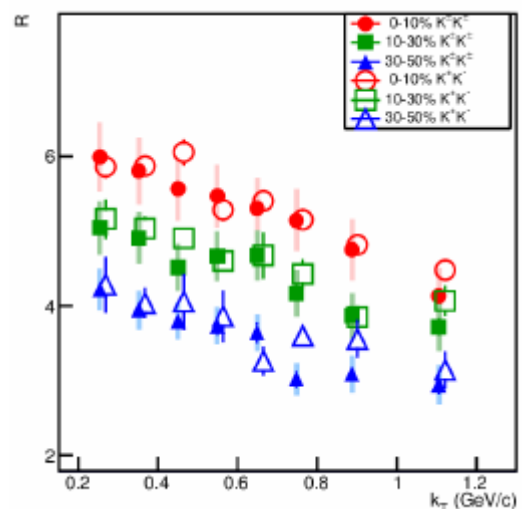


Рис. 3

Сделан 3Д анализ пар идентичных заряженных каонов для Pb-Pb и p-Pb столкновений при энергии 5.02 ТэВ (на пару нуклонов). Интересные новые

результаты получены для предсказанного в гидродинамической модели [6] времени эмиссии каонов (τ) в зависимости от средней множественности заряженных частиц (N_{ch})^{1/3} (Рис.4). Значение τ получено комбинированным фитированием зависимости продольной компоненты радиуса источника излучения (R_{long}) от поперечной массы пары каонов (m_T) и спектров частиц. Среднее значение τ ($2,7 \pm 0,25 \pm 0,15$ fm/c), полученное для p-Pb, совпадает с аналогичным в Pb-Pb столкновениях при одинаковой множественности заряженных частиц, что соответствует одинаковому источнику излучения частиц. Точечная линия на рисунке — предсказание модели. На рисунке 5 показана зависимость R_{long} от k_T для p-Pb столкновений разных центральностей. Видно, что значение R_{long} уменьшается

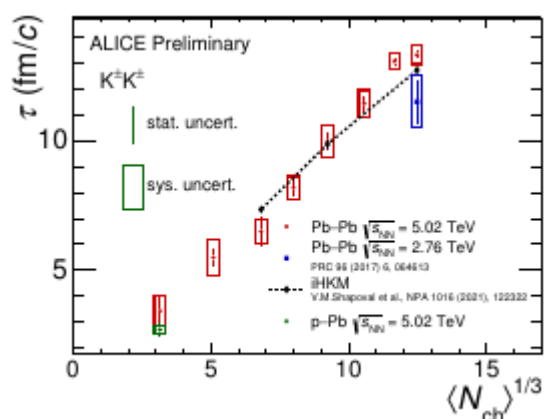


Рис. 4

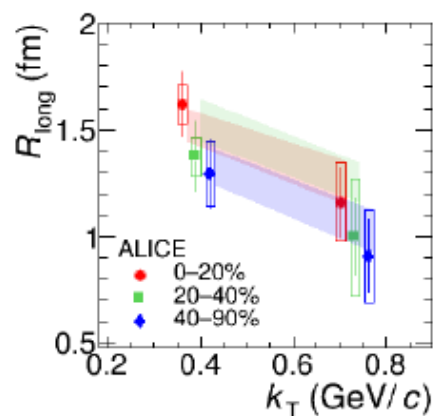


Рис. 5

для менее центральных событий и с ростом поперечных импульсов пар каонов. Закрашенные полосы — предсказание гидродинамической модели EPOS [7] (ширина полос — неопределённости модели). Подобные зависимости получены также для поперечных компонент радиуса источника излучения (не показаны на рисунках), что указывает на присутствие коллективных эффектов, характерных при взаимодействии тяжёлых ионов. Результаты докладывались на конференции ICISE-2024, 20th Rencontres du Vietnam, Еленой Рогочей, и две публикации находятся на завершающей стадии подготовки в ALICE в 2025 году.

2.2.2. Планы на 2026-2030 гг.

В планируемый период продления Проекта предполагается провести исследования по фемтоскопическим корреляциям каонных пар для p-Pb соударений при 5.02 ТэВ и pp соударений при 13.6 ТэВ. Изучение идентичных $K^{\text{ch}}K^{\text{ch}}$ пар в p-Pb соударениях будет проводиться методом, описанным в 2.1 с отбором (по величине S_T) сферических событий с малым вкладом струйных образований и событий с большим вкладом струй. Здесь наибольший интерес в сравнении результатов с показанными на Рис.1 для проверки выводов о влиянии коллективных эффектов в рамках механизмов гидродинамики.

Следующая запланированная задача включает исследование в p-Pb взаимодействиях корреляции K^+K^- пар по методу, описанному в 2.1. Основная цель заключается в проверке в рамках модели ВКС динамики образования источников излучения каонов в системах с малыми размерами по сравнению с большими размерами при столкновениях Pb-Pb. Сравнение будет делаться с результатами, представленными на Рис. 2 и 3. Нужно отметить, что эти работы будут проводиться на имеющейся статистике, поскольку следующий набор p-Pb взаимодействий

запланирован в 2029—2032 гг.

Далее планируется анализ такого же типа для pp взаимодействий (с наименьшими размерами источника излучения) при энергии 13.6 ТэВ, полученных в процессе сеанса 3 (Run 3) работы LHC, со статистикой, превышающей в 3 раза статистику сеанса 2 (Run 2). В pp столкновениях из-за малых размеров источников повышается чувствительность КФ к ВКС что возможно потребует более детального рассмотрения механизмов ВКС на основе решения уравнения Шредингера. Подобные исследования были сделаны другой группой АЛИСЕ для пар $K_s^0 K_s^0$ и $K_s^0 K^{*0}$ (в pp при 7 ТэВ) [8] и получены хорошие результаты в рамках модели ВКС для радиусов порядка 1 фм. Но для $K^+ K^-$ пар требуется дополнительный учёт кулоновского взаимодействия и влияния образующегося резонанса ϕ (1020 МэВ), что осложняет анализ.

Запланирован также анализ $K^{*0} K^{*0}$ пар для pp столкновений с детальным учётом вклада в КФ от известных резонансов (K^* , ϕ , a_0 , f_0). Подобного типа анализ был предложен и выполнен коллегами из разных групп АЛИСЕ при исследовании целого набора пар идентичных и неидентичных частиц. Основная идея заключается в возможности определения размера источника (r_{cor}), обусловленного только фемтоскопическими корреляциями без влияния частиц, образующихся при распадах резонансов. При этом было предположено, что зависимость r_{cor} от m_T универсальна для всех типов пар. Эта зависимость, полученная в работе [9], где подробно описан применяемый метод со ссылками на используемые модели, показана на Рис. 6.

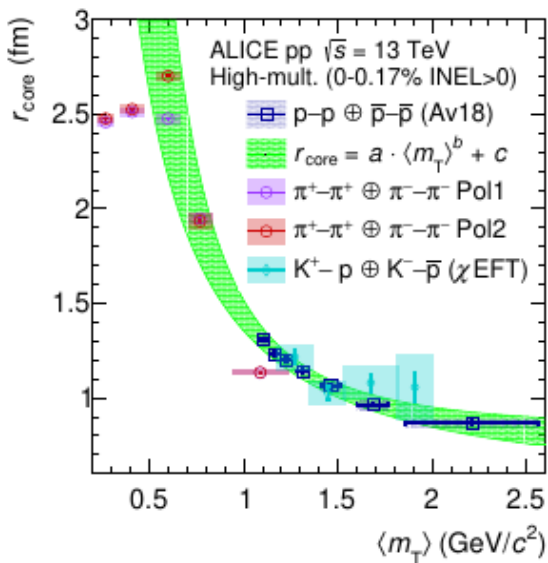


Рис. 6

Из рисунка видно, что предположенная универсальность выполняется за исключением значений r_{cor} для пар идентичных пионов при самых малых m_T . Причина этого, в предположении авторов, связана с некоторыми свойствами гиперповерхности источника адронизации. Из представленной картины виден реальный интерес в добавлении результатов для пар каонов, поперечные массы которых занимают положение между парами пионов и остальными, показанными на рисунке.

2.3. Изучение ультра-периферических столкновений тяжелых ионов

2.3.1. Работы, выполненные за период 2021-2025 гг.

Ультра-релятивистские тяжелые ионы являются источником сильного ($\sim Z^2$) электромагнитного поля - потока квазиреальных фотонов в рамках подхода Вайцекера-Вильямса. В случае больших (больше суммы радиусов) прицельных параметров сталкивающихся ионов взаимодействия называют ультра-периферическими столкновениями (УПС). В таких взаимодействиях возможно фоторождение векторных мезонов - фотон поля одного ядра флуктуирует в связанную кварк-антикварковую пару, которая затем упруго рассеивается на другом

ядре через обмен помероном. Подобный процесс может происходить на ядре как целом (когерентный, с p_T мезона <150 МэВ/с) или же на нуклоне ядра (некогерентный, с p_T мезона >150 МэВ/с). В период 2021-2025 гг. группа ОИЯИ-ALICE участвовала в исследованиях когерентного рождения одиночных ρ^0 мезонов в Pb-Pb при 5.02 ТэВ (на пару нуклонов). Далее изучался также процесс когерентного 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.

Когерентное рождение одиночных ρ^0 мезонов изучалось по распадам $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ с отбором событий по триггеру, включающему комбинированную информацию от детекторов, расположенных под малыми углами в продольном направлении, в том числе от калориметров. Отбирались только события с двумя треками противоположных зарядов в центральных трековых детекторах с дальнейшей идентификацией π мезонов. На Рис.7 показано распределение по инвариантной массе $\pi^+\pi^-$ пар, наблюдаемых в области быстрот TPC. Большая статистика, полученная в процессе Run 2 LHC, позволила выделить пик ρ^0 с хорошей точностью и наблюдать более тяжёлое состояние ρ^0 , показанное на Рис.8. Синяя кривая на Рис.7 показывает сумму вкладов резонанса (Breit-Wigner — зелёная кривая), ρ^0 - $\pi\pi$ интерференции (зелёный пунктир), и вклада мюонных распадов (красный пунктир). Полученные фитированием значения массы и ширины равнялись соответственно $769,5 \pm 1,2 \pm 2,0$ MeV/c² и $156 \pm 2,0 \pm 3,0$ MeV/c², совпадающими со значениями для ρ^0 (770) в PDG.

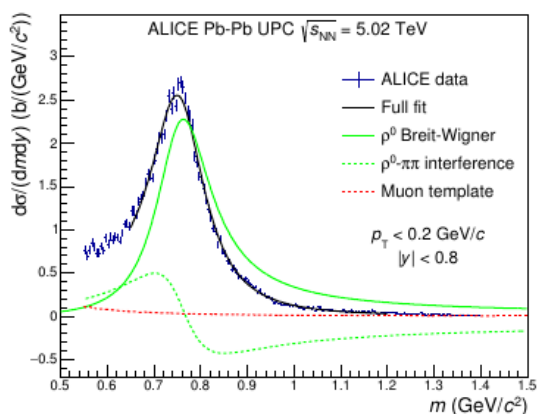


Рис. 7

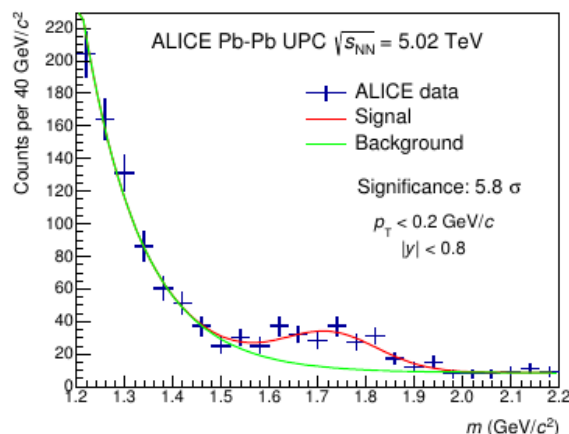


Рис. 8

Масса и ширина более тяжёлого резонанса, полученные из фитирования (Рис.8), равнялись 1725 ± 17 и 143 ± 21 MeV/c², что соответствует PDG значениям ρ^0 (1700). Показанные результаты были представлены в публикации ALICE [10].

Когерентное образование состояния четырёх пионов ($\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$) изучалось ранее в эксперименте STAR (RHIC) в УПС Au-Au при энергии 200 ГэВ (на пару нуклонов). В результате фитирования наблюдавшегося широкого пика функцией Breit-Wigner были определены в качестве параметров масса и ширина резонанса со значениями 1540 ± 40 МэВ/c² и 570 ± 60 МэВ/c² соответственно. Эти значения близки с учётом ошибок табличному состоянию $\rho^0(1700)$. Предполагаемая возможность интерференции двух близких по массе состояний не была проверена из-за недостаточной статистики. На Рис.9 показано двойное дифференциальное сечение по быстроте и инвариантной массе четырёх пионов, полученное в АЛИСЕ [11]. Красная кривая — результат фитирования данных функцией Breit-Wigner с

полученными значениями массы и ширины резонанса равными $1463 \pm 2 \pm 15 \text{ МэВ}/c^2$ и $448 \pm 6 \pm 14 \text{ МэВ}/c^2$ соответственно, которые близки к PDG величинам $\rho^0(1450)$. На Рис.10 те же данные профитированы двумя функциями Breit-Wigner с результатами масс и ширин $1385 \pm 14 \pm 36 \text{ МэВ}/c^2$ и $431 \pm 36 \pm 82 \text{ МэВ}/c^2$ для первого резонанса (близкими к значениям $\rho^0(1450)$ в PDG) и $1663 \pm 13 \pm 22 \text{ МэВ}/c^2$ и $357 \pm 31 \pm 49 \text{ МэВ}/c^2$ для второго резонанса (близкими к значениям $\rho^0(1700)$ в PDG). Угол смешивания равнялся $1.52 \pm 0.16 \pm 0.19$ (рад). Из надписей на Рис.9 и 10 видно, что качество фитирования заметно лучше в предположении интерференции двух резонансов.

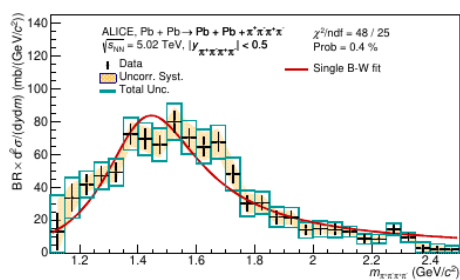


Рис. 9

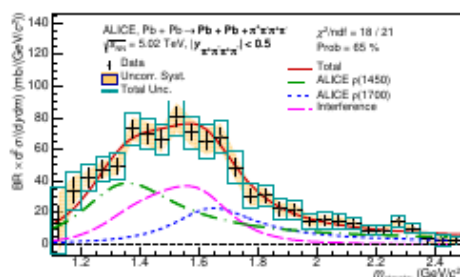


Рис. 10

2.3.2. Планы на 2026-2030 гг.

В планируемый период продления Проекта предполагается провести исследования эффектов глюонных экранировок в УПС Pb-Pb столкновениях при 5.36 ТэВ (на пару нуклонов), полученных в процессе Run 3 на LHC. Ранее такие исследования проводились в ALICE для Pb-Pb столкновений при 5.02 ТэВ (Run 2) [12]. Такой анализ базируется на теоретическом предсказании связи функции распределения партонов в ядрах с сечением когерентного фоторождения тяжелых векторных мезонов, таких как J/ψ , $\psi(2S)$ и Y , и на предположении что сечение когерентного фоторождения пропорционально квадрату глюонной плотности на масштабе переданного импульса $Q = m_V/2$, m_V - масса векторного мезона. На Рис.11 показана зависимость фотоядерного сечения процесса $\gamma + Pb \rightarrow J/\psi + Pb$ от энергии взаимодействия в системе центра масс процесса (на нижней оси x), которая определяется из выражения $W_{\gamma Pb}^2 = (s_{NN})^{1/2} M_{J/\psi} e^{-y}$, где s_{NN} - энергия Pb-Pb столкновения, $M_{J/\psi}$ масса, y - быстрота J/ψ . На верхней оси x отложена переменная x Бьёркена. Показаны результаты, полученные в данном анализе и ранее при энергии 2.76 ГэВ/с. Линии представляют предсказания разных моделей. Видно, что предсказания моделей «Impulse approximation» и «STARlight», где отсутствуют вклады глюонных экранировок, сильно расходятся с данными эксперимента с увеличением энергии (уменьшением x Бьёркена). Остальные модели, с присутствием глюонных экранировок, в той или иной степени согласуются с экспериментальными результатами.

В процессе Run 3 ожидается увеличения статистики в 6-7 раз, с увеличением до 330000 и 6000 событий с рождением J/ψ и $\psi(2S)$ соответственно, а также до 300 событий с Y , что позволит ALICE улучшить точность измерения сечения когерентного рождения J/ψ , и исследовать другие тяжелые векторные мезоны, такие как $\psi(2S)$ и Y .

Следующей планируемой задачей является изучение центрального эксклюзивного рождения (ЦЭР) дифракционных состояний с малой массой в pp столкновениях на статистике Run 3. Такие процессы обычно описывают в терминах

двойного померонного обмена, который наилучшим образом подходит для исследования скалярных и тензорных резонансных состояний мезонов, а также для поиска связанных состояний глюонов (глюболов) [13].

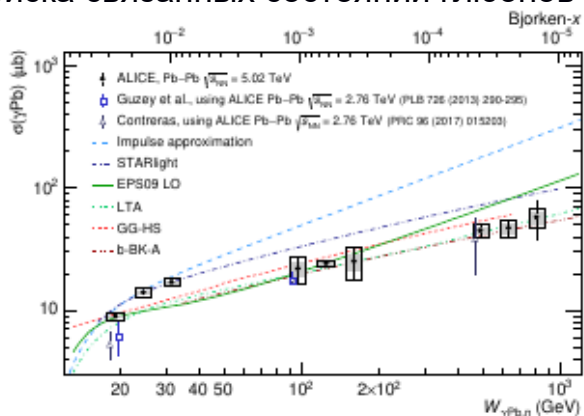


Рис. 11

к отбору событий УПС. Кроме того, используются отборы по интервалам в распределениях по быстроте. Группа ALICE-ОИЯИ уже выполнила первые предварительные исследования ЦЭР с использованием данных Run 2. На Рис. 12 показаны нескорректированные спектры по инвариантной массе пар ππ, КК в событиях ЦЭР из выборки данных, собранной ALICE в протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ. В спектрах можно легко увидеть несколько резонансных структур: для пар ππ видны пики, соответствующие $f_0(980)$, $f_2(1270)$, а в спектре КК видны вклады от резонансов $f_0(1500)$, $f_0(1710)$ и $f_2(1525)$.

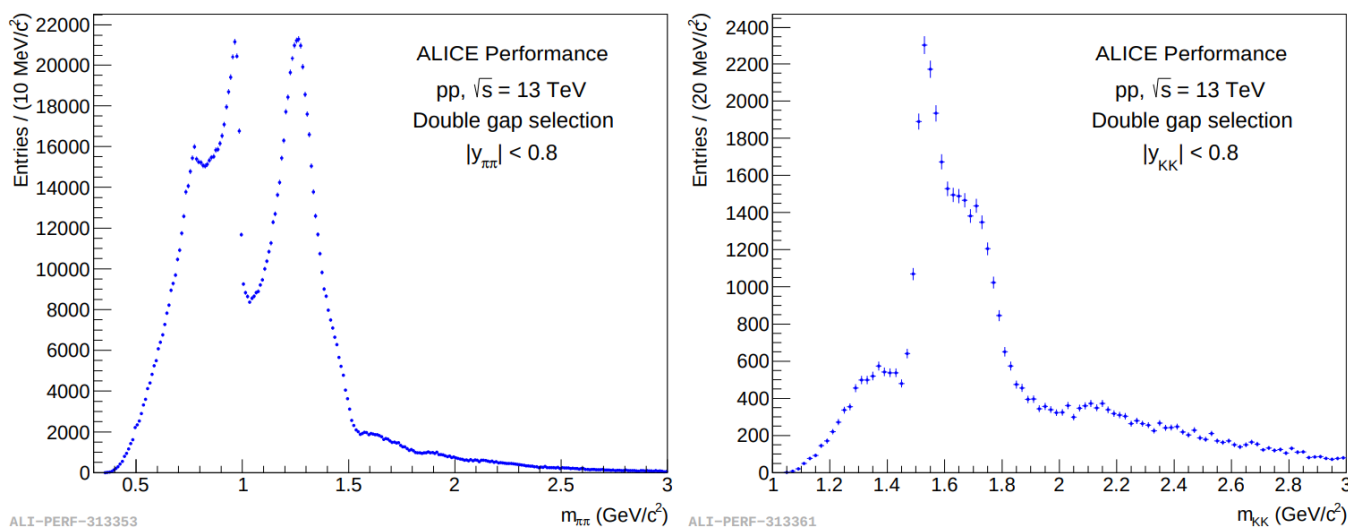


Рис. 12

В Run 3 в коллаборации ALICE будет получена большая выборка данных по событиям центрального эксклюзивного рождения в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 13.6$ ТэВ. Кроме того, будут набраны данные по pp столкновениям при $\sqrt{s} = 5.5$ ТэВ, что позволит произвести исследования энергетической зависимости центрального эксклюзивного рождения.

2.4. Изучение процессов рождения Σ гиперонов

2.4.1. Работы, выполненные за период 2021-2025 гг.

Первые результаты исследования Σ гиперонов были получены в ALICE для pp соударений при энергиях 7 и 13 ТэВ. Для нейтральных гиперонов изучались распады $\Sigma^0 (\bar{\Sigma}^0) \rightarrow \Lambda (\bar{\Lambda}) + \gamma$, а заряженные гипероны (антигипероны) исследовались по распадам на $p(\bar{p}) + \pi^0 (\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma)$.

Присутствие фотонов в этих модах распада несколько затрудняет анализ по сравнению с другими странными барионами. Фотоны реконструировались либо в трековых детекторах по конверсиям на e^+ и e^- , либо по сигналам в электромагнитных калориметрах. На Рис.13 приведено распределение по инвариантной массе $\gamma\Lambda$, из которого виден сильный пик от Σ^0 (просуммированный с антигиперонным).

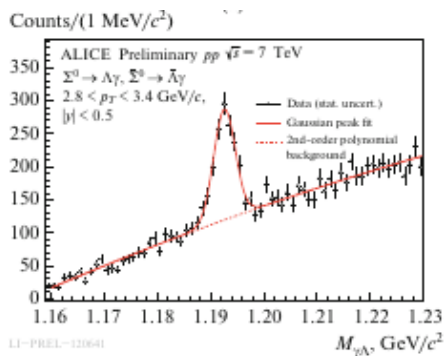


Рис. 13

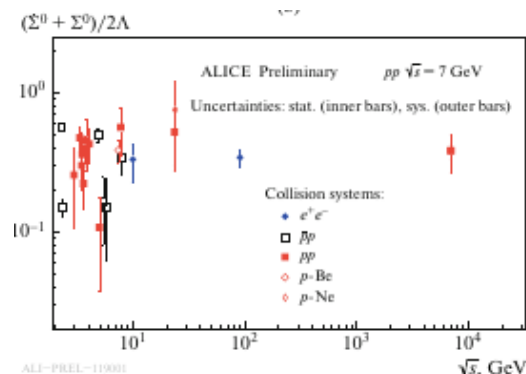


Рис. 14

Пунктирная линия на рисунке обозначает фоновое распределение, а сплошная кривая — результат фитирования функцией Гаусса. Пик от суммы заряженных гиперонов и антигиперонов в спектре инвариантных масс $p\gamma(\bar{p}\gamma)$ наблюдается с аналогичной значимостью (не показано). На Рис.14 представлено отношение выходов суммы $(\Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0)$ и удвоенного выхода Λ гиперонов в зависимости от энергии pp столкновений. Из рисунка видно, что это отношение не меняется в пределах ошибок начиная с энергии ~ 10 ГэВ. Нужно также отметить, что данные ALICE позволили продвинуться по энергии почти на два порядка. На Рис. 15 представлено двойное дифференциальное распределение по поперечному импульсу p_T $(\Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0)/2$ (в интервале по быстроте $|y| < 0.5$). Точки — данные ALICE, кривая линия — предсказание модели PYTHIA, которая, как видно, недооценивает значения эксперимента. На Рис.16 показаны аналогичные результаты для заряженных гиперонов (в интервале по быстроте $|y| < 0.8$). Чёрные точки — данные ALICE, цветные точки — предсказания разных моделей, из которых только модель EPOS LHC достаточно хорошо описывает экспериментальные значения.

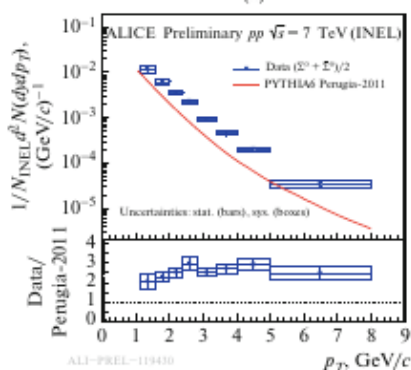


Рис. 15

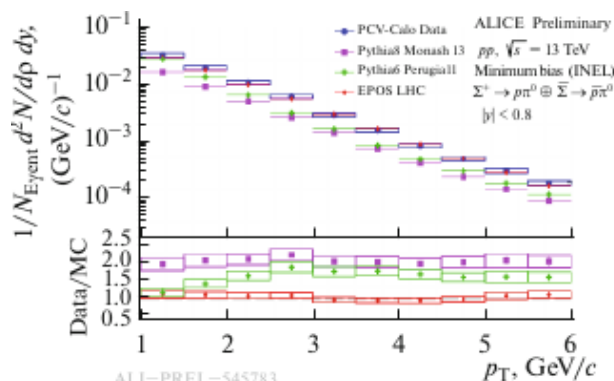


Рис. 16

Приведённые предварительные результаты были представлены на международных конференциях и опубликованы в работах [15,16].

2.4.2. Планы на 2026-2030 гг.

В планируемый период продления Проекта предполагается завершить анализ рождения $\Sigma^0 + \bar{\Sigma}^0$ гиперонов в pp столкновениях при 7 ТэВ с опубликованием итоговой статьи ALICE.

В процессе завершения анализа включаются дополнительные методы вычитания комбинаторного фона, делается фитирование пика различными функциями и рассматриваются новые, более полные, оценки систематических погрешностей. Проводятся дополнительные исследования по моделированию методом Монте Карло образования Σ^0 гиперона в результате распадов тяжелых резонансов в pp столкновениях.

Следующим этапом рассматривается возможное 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.

Далее планируется провести поиск нового ядра Σ^0 - гипертритона, состоящего из (p, n, Σ^0) по его распаду на ядро Λ - гипертритон (p, n, Λ) и фотон. Возможность данного исследования опубликована в [17] и представлена на конференции. Данные о наблюдении ядра (p, n, Σ^0) или его отсутствия представляют существенный вклад в развитие моделей по энергии связи в гиперядрах [18].

Следующая рассматриваемая задача связана с исследованием спиновых потоков вращающейся адронной материи, образующихся при нецентральных столкновениях частиц и ядер с передачей большого углового момента в конечные состояния, т.е. поиск специальной многочастичной наблюдаемой - handedness (закрученности) [19,20]. Handedness определяется как отношение разницы между левосторонним и правосторонним потоком вращения наблюдаемых частиц к их сумме. Данные ALICE об асимметрии потоков частиц в Pb-Pb столкновениях и поляризации Λ гиперона позволяют исследовать новую макроскопическую переменную handedness для различных видов элементарных частиц в широком импульсном диапазоне. Проводимый впервые анализ экспериментальных данных необходим как для проверки теоретической гипотезы о наличии эффекта handedness и дальнейшей ее разработки, так и для поиска наиболее оптимальной кинематической области наблюдения данного эффекта.

2.5. Феноменологическая модель BWTP для рождения адронов в pp, p-A и A-A столкновениях

2.5.1. Работы, выполненные за период 2021-2025 гг.

С 2020 года в группе ALICE ОИЯИ разрабатывается, на основе ранее опубликованной работы [21], феноменологическая модель BWTP для описания спектров поперечного импульса (p_T) различных адронов в центральной области быстрот, измеренных в pp, p-A и A-A столкновениях. В модели предполагается, что в столкновениях высоких энергий образуется горячая и плотная материя (кварк-глюонная плазма), которая расширяется, остывает, термализуется и адронизуется, проходя через фазы химического и кинетического freeze-out. Модель включает три

компоненты (первые буквы в названии которых дают BWTP): 1) стандартная blast-wave модель (BW) [22] для описания гидродинамических процессов радиального расширения и кинетического freeze-out рождённой адронной материи; 2) Tsallis-распределение (T) [23,24] для учёта вклада от распадов резонансов; 3) слагаемое имеющее степенную (P) зависимость от p_T для описания жёстких КХД процессов. Были анализированы данные по спектрам тринадцати частиц (от пионов до чармониев), рожденных в pp и Pb-Pb, для разных энергий и центральностей столкновений на LHC. Модель хорошо описывает все эти данные, а также данные по ядерной модификации спектров. Подробное описание модели и результаты работы были опубликованы в работе [25]. Далее модель BWTP была развита и обобщена для нескольких целей:

- Уменьшено число параметров модели с учётом соответствующих зависимостей экспериментальных данных и теоретических подходов. Показано, что новый вариант модели описывает данные Pb-Pb соударений так же хорошо, как и вариант в [25].
- Сделано описание p_T -спектров различных адронов, измеренных в Xe-Xe столкновениях с энергией 5.44 ТэВ и с разными центральностями на LHC.
- Добавлено описание для A-A столкновений эффекта роста выходов странных частиц относительно выхода пионов с ростом центральности столкновений.
- Добавлен для A-A столкновений эффект подавления выходов короткоживущих резонансов ρ^0 и K^{*0} с ростом центральности.
- Сделано описание p_T -зависимости коэффициентов v_2 эллиптического потока для различных адронов, измеренных в A-A при разных энергиях и центральностях столкновений. Для достижения этой цели в модель добавлена азимутальная асимметрия физических процессов, характерная для периферических столкновений ядер, с использованием обобщённой blast-wave модели [26].

В новой версии модели возможно также описание данных по p_T -спектрам и v_2 для различных адронов, полученных при низких энергиях на RHIC. Текущая версия модели успешно описывает упомянутые экспериментальные данные, полученные коллаборацией ALICE, а также другими коллаборациями на LHC и RHIC. Рис. 17 показывает отношения выходов различных адронов в зависимости от множественности заряженных частиц в Pb-Pb столкновениях, полученные в ALICE. На рисунке виден рост выходов странных частиц и эффект подавления выходов ρ^0 и K^{*0} с ростом центральности (множественности). Предсказания модели, представленные в виде линий, хорошо согласуются с данными эксперимента. Рис. 18 показывает хорошее описание моделью (линии) данных ALICE и CMS по эллиптическому потоку v_2 для пионов, каонов, протонов и всех заряженных частиц в Pb-Pb при разных центральностях.

2.5.2. Планы на 2026-2030 гг.

В планируемый период продления Проекта предполагается дальнейшее развитие модели, цель которого достижение следующих дополнительных возможностей:

- 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;
- описания новых данных, полученных в Pb-Pb столкновениях при 5.36 ТэВ, а также в других A-A столкновениях;
- описания кроме v_2 других характеристик азимутальной асимметрии в A-A

столкновениях, таких как v_3 и v_4 ;

- описания pp и p-A данных на LHC по p_T -спектрам и по v_2 , v_3 и v_4 для различных адронов;
- обобщения модели с добавлением зависимости от быстроты;
- создания на основе модели генератора частиц в p-p столкновениях.

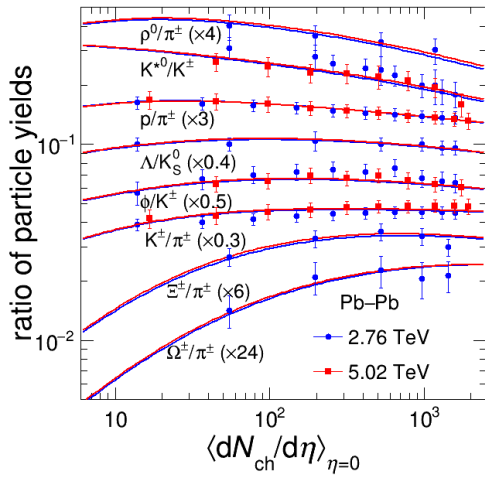


Рис. 17

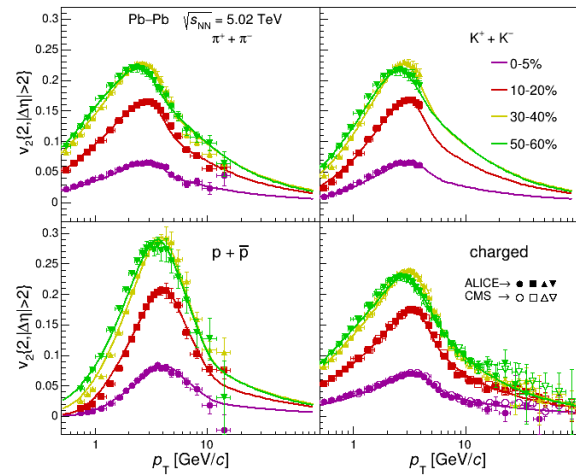


Рис. 18

2.6. Новая триггерная система ALICE FIT

В рамках программы модернизации детекторных систем установки ALICE разработана и введена в эксплуатацию новая гибридная триггерная система FIT (Fast Interaction Trigger), состоящий из трех подсистем FT0 (FIT Time-zero detector), FV0 (FIT Vertex-zero detector), FDD (FIT Forward Diffractive Detector) с различной технологией регистрации частиц. Подсистемы FT0, FDD состоят из двух сборок, расположенных по обе стороны (сторона A и C) от точки взаимодействия (IP – Interaction Point). На всех этапах активное участие в работах принимала группа ОИЯИ (ассоциированных членов). На рисунке 19 схематически показано расположение этих детекторов относительно точки взаимодействия пучков ускорителя.

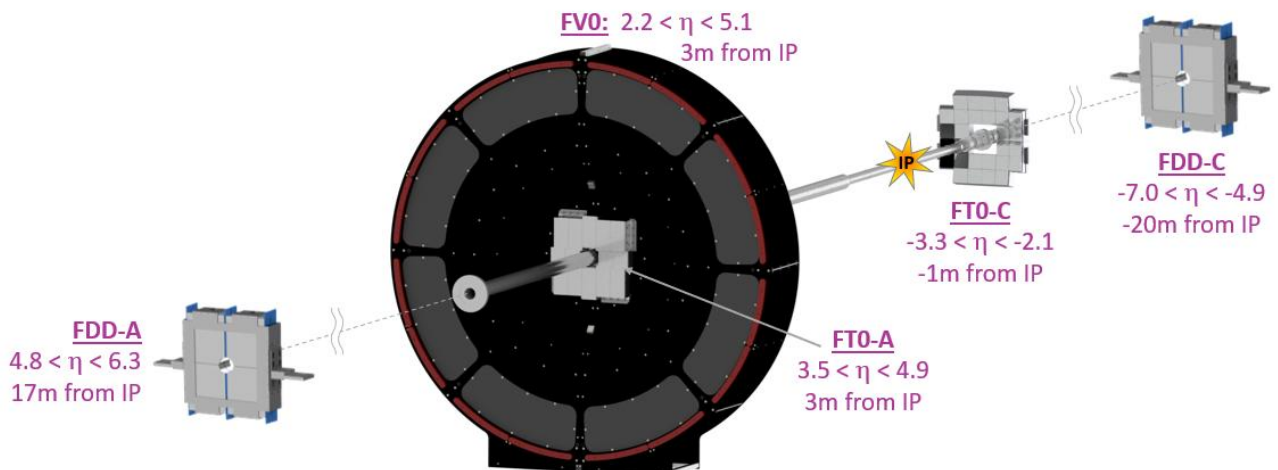


Рис. 19

Подсистема FT0 детектора FIT состоит из 24-х и 28-ми черенковских модулей на основе радиаторов из плавленного кварца толщиной 2 см. Электронные платы для фотоумножителей специально разработаны в ИЯИ. Подсистема FV0 создана на основе пластин пластмассового сцинтиллятора EJ-204 толщиной 4 см со съёмом световых сигналов на фотоумножители с сетчатыми динодами Hamamatsu H6614-70-Y001. Подсистема FDD представляет собой сборку из четырех плоскостей сцинтилляторов BC-420, объединенных в квадранты. Свет собирается с помощью WLS-пластин и оптических волокон, ведущих к ФЭУ H8409-70.

2.6.1. Основные функции детекторов системы FIT

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. Система FIT обеспечивает следующие требования ALICE:

- возможность считывания данных с мертвым временем ~ 15 нс (Bunch Cross interval 25 нс);
- минимальная задержка решений о запуске - 425 нс от столкновения до входа процессора распределения триггеров ALICE (включая задержку кабеля 150 нс);
- Эффективная работа при полной частоте столкновений LHC Pb-Pb (50 кГц) и pp (до 1 МГц);
- устойчивость к полю соленоида $B = 0,5$ Тл и жестким условиям радиации;
- работоспособность вне режима «стабильных пучков» LHC.

Детекторы системы FIT являются триггерными детекторами и используются для:

- измерения светимости - в режиме онлайн и офлайн, FT0 является основным люминометром эксперимента ALICE;
- синхронизации по BC (Bunch Cross) остальных детекторов ALICE;
- мониторинга частоты столкновений и предоставления обратной связи по светимости в режиме реального времени для LHC;
- измерения точного времени столкновения, необходимого для идентификации частиц на основе времени пролета (TOF) с рекордным временным разрешением 17 пс и 4 пс для протонных и ионных столкновений соответственно;
- определения глобальных параметров столкновения на основе множественности вторичных частиц:
 - центральности столкновений;
 - плоскости реакции событий;
- физики дифракции, в основном с FT0, FDD в качестве вето;
- мониторинга фоновых событий (гало пучка, взаимодействия на газе).

2.6.2. Необходимые сервисные работы по обслуживанию детекторов FIT

Подсистемы FT0, вся электроника системы детекторов FIT и системы управления и контроля были разработаны сотрудниками ИЯИ РАН, поэтому участие экспертов имеет решающее значение для обеспечения круглосуточного экспертного

сопровождения детекторной системы fit и участия в круглосуточных дежурствах в сменах.

FT0 детектор является триггерным детектором, поэтому для стабильной эффективной работы триггерной системы детектора необходимо проводить коррекцию амплитуды сигналов. Для этого требуется проводить мониторинг старения мкп-фэу и регулярно проводить корректировку коэффициента усиления фотоумножителей.

Работы по обслуживанию FIT из базы данных ALICE:

1. оценка качество данных и триггеров;
2. моделирование и реконструкция событий;
3. экспертное сопровождение системы считывания данных;
4. калибровка данных;
5. разработка и поддержка алгоритмов;
6. экспертное сопровождение системы управления и контроля;
7. разработка программного обеспечения и автоматизированное тестирование;
8. отключение - перепоключение системы FIT.

2.6.3. Разработка и поддержка системы отбора событий ALICE

Отбор событий - один из важных этапов в каждом физическом анализе, выполняемом на эксперименте ALICE. Группа ALICE-ОИЯИ разрабатывает и поддерживает специализированный набор программ, применяемый при анализе данных в Run 3. Разработанные программы являются общими для всех анализов и позволяют отбирать pp 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. Кроме того, определяется статистика по сработавшим триггерам, что позволяет извлекать соответствующую интегральную светимость.

Стандартная стратегия отбора событий в Run 3 основана на условии одновременного срабатывания обеих сторон детектора FT0 с временными сигналами, совпадающими с ожидаемым временем прихода сигнала от столкновений пучков. Это требование подавляет большинство событий взаимодействия пучков с газом. Однако иногда фоновые события накладываются на сигнальные протон-протонные события (с вероятностью приблизительно 10^{-5}). В результате фон от событий взаимодействия пучков с газом создает значительные трудности для исследований pp столкновений тем, что ограничивает максимальную доступную множественность событий. Разработка стратегии подавления таких событий будет одной из главных задач группы ALICE-ОИЯИ в течение ближайших нескольких лет. В данный момент рассматриваются несколько возможностей: фильтрация событий с применением сигналов детекторов FDD и FV0, исследование корреляции сигналов FT0 и детекторов центрального барреля, исследование поканальных распределений в детекторе FT0 и другие. Разработка программ для минимизации неправильной привязки вершин и сигналов передних детекторов — также одна из главных задач группы ALICE-ОИЯИ.

В Run 3 набор данных в детекторе ITS осуществляется порциями по ~5 мкс для протон-протонных сеансов и по ~15 мкс для ядро-ядерных сеансов ("ITS readout frame"). Порция данных в TPC соответствует ~1 мс. События, которые оказываются на границе считывания, реконструируются не полностью, часть треков теряется. Группой ALICE-ОИЯИ были разработаны специальные процедуры фильтрации

таких событий с учетом особенностей набора данных. В дальнейшем планируется оптимизация отбора и мониторинг качества в условиях меняющихся схем столкновения пучков.

Наконец, группа ALICE-ОИЯИ отвечает за контроль качества отбора событий. Ряд проверок по различным показателям осуществляется с помощью специально разработанного программного инструмента event-selection-QA. Результаты таких проверок для каждого сеанса набора данных публикуются на специальном сайте — <https://evsel-qa.web.cern.ch>. В течение ближайших лет группа ALICE-ОИЯИ продолжит мониторинг качества отбора событий и работу над улучшением комплекса разработанных инструментов.

2.7. Поддержание и развитие системы ALICE-GRID в ОИЯИ

В период 2021-2025 гг продолжалось поддержание и развитие системы ALICE-GRID ОИЯИ 2-го уровня (tier 2). Мощности компьютерного центра ОИЯИ-ALICE составляют 1200 ядер (cores) CPU и 1530 Tb дисковой памяти (Disk-SE), что позволяло проводить 40% вычислений среди всех российских центров 2-го уровня. Общий вклад всех российских институтов в ALICE-GRID, с учётом центра уровня 1 в институте имени Курчатова, составлял 4%. После наложения санкций от CERN на институты России ОИЯИ остаётся единственным участником от России в ALICE-GRID. На Рис.20 показана диаграмма вкладов разных стран в полное количество часов CPU, затраченных в 2024 году на вычисления всех задач. Из диаграммы видно, что вклад ОИЯИ (обозначен RDIG) составляет 0.5% и равен по уровню вкладам ряда отдельных стран (Словакии, Польши, Чехии, Австрии, Китая).

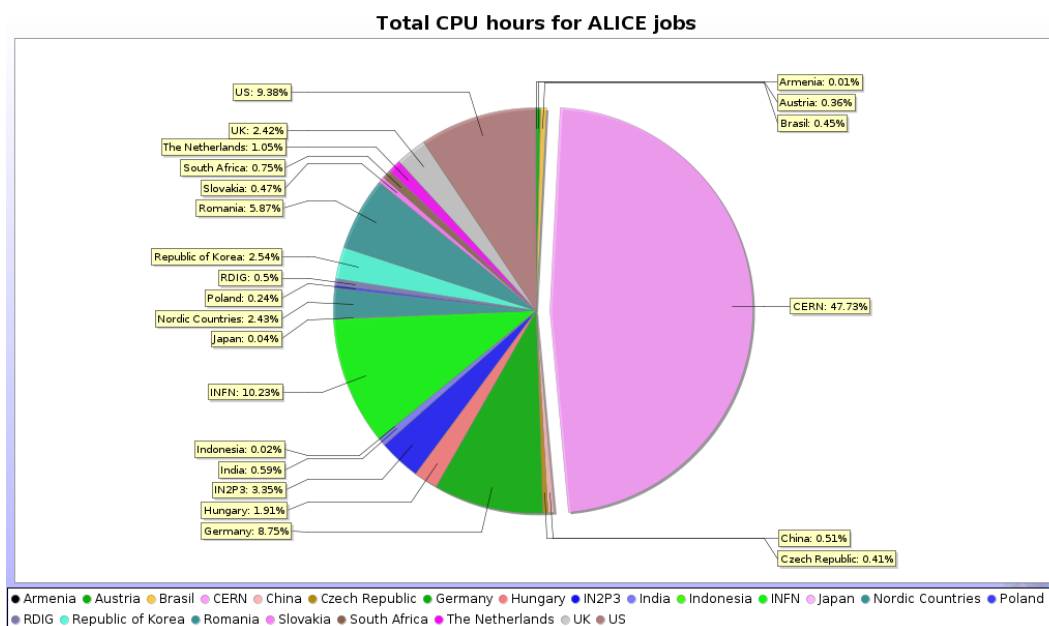


Рис. 20

В планируемый период продления Проекта группой ОИЯИ-ALICE предполагается:

- поддержание системы ALICE-GRID 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.

Список публикаций (жирным шрифтом выделены публикации группы ОИЯИ)

- 1. ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), “Femtoscopic correlations of identical charged pions and kaons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with event-shape selection”, Phys. Rev. C 109 (2024) 024915.**
- R.Lednicky and V.L. Lyuboshitz, Sov. J. Nucl. Phys. 35 (1982) 770; R.Lednicky, Phys. of Part. and Nucl. Lett. 8 (2011) 965.
- 3. ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), “Kaon femtoscopy in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. C 96 (2017) 064613.**
- V.M.Shapoval et al., Nucl. Phys. A 929 (2014) 1-8.
- 5. ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), “Investigation of K^+K^- interactions via femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV at the LHC.”, Phys. Rev. C 107 (2023) 054904.**
- Yu.M.Sinyukov et al., Nucl. Phys. A 946 (2016) 227-239.
- K.Werner et al., Phys. Rev. C 83 (2011) 044915.
- ALICE Collaboration (B.Abelev et al.) Phys. Lett. B 717 (2012) 151-161; ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), Phys. Lett. B 790 (2019) 22-34.
- ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), Eur. Phys. J. C 85 (2025) 198.
- 10. ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), «Coherent photoproduction of ρ^0 vector meson in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», JHEP 06 (2020) 35.**
- 11. ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), “Exclusive four pion photoproduction in ultraperipheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, arXiv:2404.07542 (2024).**
- 12. ALICE Collaboration (S.Acharya et al.), “Energy dependence of coherent photonuclear production of J/Ψ in ultraperipheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, JHEP 10 (2023) 119.**
- P.Azzi et al., CERN Yellow Rep. Monogr. 7 (2019) 1.
- L.A.Harland-Lang et al., Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1714.
- 15. A.Borissov, “Production of Σ Hyperons in pp and p-PB Collisions at LHC with ALICE”, Physics of Particles and Nuclei 55, No. 4 (2024) 1070-1074.**
- 16. A.Borissov, “Production of Σ Hyperons and Search of Σ Hypernuclei at LHC with ALICE”, Physics of Atomic Nuclei 86, No. 6 (2023) 1336-1340.**
- Z.Citron et al., CERN Yellow Rep. Monogr. 7 (2019) 1159.
- Nagae et al., Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 1605.
- A.V.Efremov et al., Phys. Lett. D 284 (1992) 394-400.
- O.Teryaev, R.Usubov, arXiv:1406.4451.
- 21. S.Grigoryan, “Using the Tsallis distribution for hadron spectra in pp collisions: Pions and quarkonia at $\sqrt{s} = 5 - 13000$ GeV”, Phys.Rev. D 95 (2017) 056021.**
- E.Schnedermann, J.Sollfrank, and U.Heinz, Phys. Rev. C 48 (1993) 2462.
- C.Tsallis, J. Stat. Phys. 52 (1988) 479.

24. S.Grigoryan, “A three component model for hadron p_T -spectra in pp and Pb-Pb collisions at the LHC”, *Eur. Phys. J. A* 57 (2021) 328.

25. F.Retiere and M.A.Lisa, *Phys. Rev. C* 70 (2004) 044907.

Доклады на конференциях

1. E.Rogochaya (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Determination of the strong interaction for hyperon-nucleon pairs with ALICE” The 55th Rencontres de Moriond “QCD & High Energy Interactions” 27.03-3.04, 2021.
2. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Recent results on ultra-peripheral collision studies with ALICE at the LHC”, 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, 19-25.08, 2021.
3. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Coherent photoproduction of ρ^0 vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb and Xe-Xe collisions with ALICE”. XXVIII International Workshop on Deep- Inelastic Scattering and Related Subjects. Stony Brook University, 12-14.04.2021.
4. G.Romanenko (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration) “Identical charged kaons femtoscopic analysis in PbPb collisions at 5.02 TeV in ALICE”, Nucleus-2022, Fundamental problems and applications, Moscow State University, 2022.
5. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration) “Photoproduction of vector mesons in Ultra-peripheral heavy-ion collisions with ALICE”, 56th Rencontres de Moriond 2022, Italy.
6. E.Rogochaya (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Studying the size of the emitting source of particles and their strong interaction using femtoscopy”, HEP2023 Conference, Hamburg.
6. E.Rogochaya (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Studying the size of the emitting source of particles and their strong interaction using femtoscopy”, HEP2023 Conference, Hamburg.
7. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Exclusive and dissociative J/ψ photoproduction off protons with ALICE”, DIS-23 Conference, Michigan SU, USA.
8. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Vector meson photoproduction in UPC with ALICE”, Conference SPIN Physics 2023, Durham, USA.
9. E.Rogochaya (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Particle emitting source dynamics via femtoscopy at the LHC energies with ALICE”, PASCOS 2024, QUY NHON, Vietnam, July 7-13, 2024.
10. K.Mikhaylov (NRC, JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Charged kaon femtoscopy with ALICE at the LHC”, Session of Russian Academy of Sciences, Dubna, April 1-5, 2024.

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные	Водопьянов А.С.	НЭОФТИ-ЛHC	Нач. отдела	1
	работники	Батюня Б.В.	НЭОФТИ-ЛHC	Нач.сект.	1

		Горбунов Н.В.	НЭОФ-СМС	Нач.сект.	0.3
		Григорян С.	НЭОФТИ-ЛНС	В.н.с.	1
		Крышень Е.Л.	НЭОФТИ-ЛНС	В.н.с.	0.5
		Михайлов К.Р.	НЭОФТИ-ЛНС	С.н.с.	0.5
		Номоконов П.В.	НЭОФТИ-ЛНС	В.н.с.	1
		Рогочая Е.П.	НЭОФТИ-ЛНС	В.н.с.	1
		Руфанов И.А.	НЭОФСТИ	С.н.с.	0.3
2.	инженеры	Вертоградова Ю.Л.	НЭОФТИ-ЛНС	Инж.	0.5
		Стифоров Г.Г.	САСУТП	Зам. нач.	0.3
		Кузнецов А.В.	НЭОФТИ-ЛНС	Ст. Инж.	1
3.	специалисты				
4.	рабочие				
	Итого:	12			8.4

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	ИЯИ РАН МИФИ МФТИ	6 1 1
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	Итого:		8

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта / Подпроекта КИП

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования	Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
		1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Международное сотрудничество (МНТС)	520	110	100	100	100	110
Материалы	600	120	120	120	120	120
Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)						
Пуско-наладочные работы						
Услуги научно-						

		исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения						
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы						
		– сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,						
		– реактора,.....						
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	1120	230	220	220	220	230
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____ / А.С.Водопьянов /
Экономист Лаборатории _____ / _____ /