

На правах рукописи



Гордеев Павел Петрович

**Измерение спектров анти- $\Sigma^{\pm}$ -гиперонов с помощью
электромагнитного калориметра PHOS эксперимента
ALICE**

Специальность 1.3.15.

Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва.

Научный руководитель: **Блау Дмитрий Сергеевич**,
кандидат физико-математических наук,
руководитель отделения ядерной физики и
пучковых технологий Курчатовского ядерно-
физического комплекса НИЦ «Курчатовский
институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Бережной Александр Викторович**,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
заведующий Лабораторией тяжелых
кварков и редких распадов
Научно-исследовательского института
ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова, г. Москва;

Гуськов Алексей Вячеславович,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
Лаборатории ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт ядерных
исследований» Российской академии наук,
г. Москва.

Защита состоится 17 июня 2026 г., начало в 16:30, на заседании диссер-
тационного совета 02.1.003.05 НИЦ «Курчатовский институт» по адресу:
Москва, 123182, пл. Академика Курчатова, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский
институт» и на сайте <http://nrcki.ru>.

Автореферат разослан "___" _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.1.003.05,
доктор физико-математических наук

Б.р.Ск

А. Л. Барабанов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Изучение свойств сильно взаимодействующей материи при экстремальных температурах и плотностях является одной из важнейших задач современной физики высоких энергий. Релятивистские столкновения протонов и тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН создают условия, при которых возможно кратковременное образование кварк-глюонной плазмы (КГП) — вещества, в котором кварки и глюоны находятся в практически свободном состоянии. Так как КГП в результате расширения и остывания адронизируется, для ее наблюдения были предложены различные *сигналы*: увеличение выхода странных частиц из-за снижения порога рождения s -кварка, подавление выходов тяжелых кваркониев из-за Дебаевского экранирования в КГП, гашение струй из-за потерь энергии быстрым партоном в КГП. Исторически, увеличение выхода странных частиц было одним из первых предложенных сигналов образования КГП [1]. Такое увеличение было обнаружено сравнительно быстро в ядро-ядерных (А-А) столкновениях, а затем и в протон-ядерных (p-А) и даже в протон-протонных (pp) столкновениях с высокой множественностью, причем увеличение относительного выхода странных частиц происходит плавно с ростом множественности от pp до А-А столкновений [2]. Это говорит о том, что наивное представление о резком росте выхода странных кварков в случае образования КГП, предложенное Рафельским, должно быть серьезно пересмотрено. В настоящее время предложено несколько альтернативных объяснений увеличению выхода странных адронов (образование КГП даже в малых системах [3], слияние цветовых веревок [4]), которые должны быть проверены с помощью различных наблюдаемых, в том числе — измерением выходов различных изотопических триплетов.

Σ -гипероны занимают особое место среди адронов, содержащих странный кварк. Три изоспиновые компоненты семейства Σ -гиперонов имеют схожие массы и содержат по одному странному кварку, различаясь лишь комбинацией легких кварков. Благодаря этому Σ -гипероны являются удобным объектом для исследования механизмов рождения странности и барионов в целом в различных системах столкновений — от протон-протонных до ядро-ядерных. Кроме того, из-за сравнительно высокого выхода Σ -гипероны дают значительный вклад в выход более легких гиперонов, что должно учитываться при прецизионном сравнении предсказаний моделей и данных.

Существенный вклад в изучение Σ -гиперонов внесла программа исследований на коллайдере LEP. В адронных распадах Z -бозона при энергии 91 ГэВ в системе центра масс коллаборации DELPHI, L3 и OPAL выполнили прецизионные измерения инклюзивного рождения Σ -гиперонов

в электрон-позитронных (e^+e^-) столкновениях. Коллаборация OPAL впервые раздельно измерила все три изоспиновых состояния, получив средние множественности $n_{\Sigma^+} = 0.099 \pm 0.008 \pm 0.013$, $n_{\Sigma^0} = 0.071 \pm 0.012 \pm 0.013$ и $n_{\Sigma^-} = 0.083 \pm 0.006 \pm 0.009$. Эти измерения показали систематические расхождения с предсказаниями моделей адронизации JETSET и HERWIG, указывая на необходимость уточнения механизмов рождения барионов.

Несмотря на существенный прогресс в изучении странных частиц [2], экспериментальные данные по рождению Σ -гиперонов в адронных столкновениях остаются ограниченными. До сих пор в таких столкновениях при энергиях БАК измерены спектры в зависимости от поперечных импульсов для Σ^0 - [5], Σ^{+-} и $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов [6]. Измеренные спектры существенно расходятся с предсказаниями распространенных генераторов Монте-Карло (PYTHIA 6, PYTHIA 8, EPOS LHC), занижающих их выход примерно в два раза.

Σ -нуклонное взаимодействие играет важную роль для описания уравнения состояния ядерной материи и, в частности, для моделирования внутренней структуры нейтронных звезд. При этом теоретические модели дают противоречивые предсказания вплоть до вопроса о том, является ли это взаимодействие в среднем притягивающим или отталкивающим. Экспериментальное изучение Σ - N -взаимодействия, в том числе с использованием метода двухчастичной фемтоскопии, требует надежной реконструкции Σ -гиперонов и их античастиц в широком диапазоне поперечных импульсов. На сегодняшний день существует лишь одна публикация [7], в которой исследовано взаимодействие пары p - Σ^0 . Однако полученные результаты характеризуются значительными статистическими неопределенностями и заметным вкладом фонового p - Λ -взаимодействия.

Отдельный интерес представляет разработка методов регистрации антинейтронов в электромагнитном калориметре. Антинейтроны являются естественными продуктами распада антибарионов и позволяют исследовать механизмы рождения и аннигиляции барионов и антибарионов в релятивистских столкновениях различных систем — от протон-протонных до столкновений тяжелых ядер. В то же время отсутствие электрического заряда делает невозможной их идентификацию в трековых системах, что делает актуальной разработку методик их идентификации по сигналу в калориметрах. Нейтроны и антинейтроны могут быть зарегистрированы в адронном калориметре. При этом энергетическое разрешение адронного калориметра на уровне 30-40% не позволит изучать распределения по инвариантной массе пар нейтрон-адрон в условиях высокой множественности p - A и A - A столкновений. Использование высокогранулярного электромагнитного калориметра позволяет улучшить ситуацию: (анти-)нейтронный ливень может быть идентифицирован по форме, а импульс частицы может быть измерен по времени пролета. Так как временное разрешение

электромагнитных калориметров быстро ухудшается с уменьшением энергии, антинейтроны, выделяющие в калориметре значительную энергию в случае аннигиляции, позволяют измерять время пролета с достаточной точностью, в отличие от нейтронов, выделяющих, как правило, очень незначительную долю своей энергии в электромагнитном калориметре. Именно поэтому данная работа сконцентрирована на измерении выходов анти-барионов. Создание и верификация такой методики открывают возможность систематического исследования широкого класса проблем в существующих и будущих сеансах набора данных на БАК, а также в других экспериментах в области физики высоких энергий.

Целью работы является изучение механизмов рождения странных частиц в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях. Механизмы рождения странности исследуются через комплексный анализ нескольких ключевых наблюдаемых величин. Дифференциальные спектры в зависимости от поперечного импульса p_T несут детальную информацию о динамике процессов рождения: форма спектров чувствительна к механизмам фрагментации партонов, эффектам перерассеяния в ядерной среде и возможному формированию коллективных явлений. Интегральные выходы частиц на единицу быстроты предоставляют количественную информацию об общей множественности рождения странных барионов и позволяют провести прямое сравнение с предсказаниями статистических моделей адронизации, проверяя гипотезу о химическом равновесии системы. Фактор ядерной модификации R_{pPb} является ключевой величиной для исследования эффектов взаимодействия жестких партонов с горячей или холодной ядерной материей — он количественно характеризует влияние ядерной среды на рождение частиц. Для столкновений pp и $p-Pb$ фактор ядерной модификации определяется как

$$R_{pPb}(p_T) = \frac{dN_{pPb}/dp_T}{\langle N_{coll} \rangle dN_{pp}/dp_T}, \quad (1)$$

где $\langle N_{coll} \rangle$ — среднее число бинарных нуклон-нуклонных столкновений в одном $p-Pb$ столкновении, dN_{pPb}/dp_T и dN_{pp}/dp_T — спектры в зависимости от поперечного импульса в $p-Pb$ и pp столкновениях соответственно. Отклонение фактора R_{pPb} от единицы свидетельствует о наличии ядерных эффектов, таких как модификация партонных распределений в налетающем ядре (ядерное затенение, анти-затенение), энергетические потери партонов в начальном состоянии или эффект Кронина. Совместный анализ спектров и интегральных выходов частиц, а также фактора R_{pPb} позволяет разделить вклады различных механизмов и получить целостную картину рождения странных частиц.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы проводится экспериментальное исследование особенностей рождения странных барионов на примере анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов в pp и $p-Pb$ столкновениях при

энергии в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ с использованием детектора ALICE. Основным исследуемым каналом распада является $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{p}\pi^{\pm}$ с регистрацией антинейтрона в электромагнитном калориметре PHOS.

Для получения указанных наблюдаемых величин (спектров поперечного импульса p_T и интегральных выходов частиц, фактора ядерной модификации R_{pPb}) необходимо решить следующий комплекс взаимосвязанных задач.

Первая задача заключается в разработке метода идентификации и измерения импульса антинейтронов в электромагнитном калориметре PHOS эксперимента ALICE. На основе разработанного метода необходимо реконструировать распады $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{p}\pi^{\pm}$ и получить распределения инвариантных масс для анти- $\Sigma^{\pm}$ -гиперонов, что позволит выделить сигнал в данных и определить эффективность реконструкции распадов в Монте-Карло моделировании.

Следующий этап работы — измерение дифференциальных спектров $\bar{\Sigma}^{+}$ - и $\bar{\Sigma}^{-}$ -гиперонов в зависимости от поперечного импульса в pp и p -Pb столкновениях. Полученные спектры требуют коррекции на эффективность детектирования распадов и аксептанс детектора. Параллельно необходимо определить интегральные выходы $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов на единицу скорости и их отношения к интегральным выходам других адронов, что позволит провести сравнительный анализ с другими странными и нестранными частицами и проверить предсказания статистических моделей адронизации.

На основе измеренных спектров анти- $\Sigma^{\pm}$ -гиперонов в pp и p -Pb системах вычисляются факторы ядерной модификации R_{pPb} во всем измеренном диапазоне поперечных импульсов. Анализ зависимости фактора R_{pPb} от поперечного импульса p_T позволит количественно оценить влияние холодной ядерной материи на рождение странных барионов и сравнить эти эффекты с наблюдаемыми для других типов частиц.

Заключительная задача — проведение всестороннего сравнительного анализа полученных результатов (спектров поперечного импульса p_T и интегральных выходов частиц, фактора ядерной модификации R_{pPb}) с предсказаниями современных генераторов Монте-Карло, таких как PYTHIA 8, EPOS LHC, EPOS4, DPMJET, PHOJET, а также со статистической моделью Thermal-FIST. Это позволит оценить применимость различных теоретических подходов к описанию рождения странных частиц и выявить возможные расхождения, требующие дальнейшего теоретического осмысления.

Научная новизна заключается в том, что впервые реализована и экспериментально проверена методика идентификации антинейтронов по форме электромагнитно-адронного ливня и времени пролета в калориметре PHOS. Методика позволила реконструировать антинейтроны

с использованием электромагнитного калориметра и была применена для восстановления распадов $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{p}\pi^{\pm}$. Впервые измерены спектры анти- $\Sigma^{\pm}$ -гиперонов в зависимости от поперечного импульса в адронных столкновениях, а именно в столкновениях pp и $p\text{-Pb}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. Впервые получены оценки интегральных выходов $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов и их отношений к выходам других адронов в адронных столкновениях, а именно в столкновениях pp и $p\text{-Pb}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. Впервые определены факторы ядерной модификации R_{pPb} для анти- $\Sigma^{\pm}$ -гиперонов для $p\text{-Pb}$ столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. Полученные результаты представляют собой новый набор экспериментальных данных для проверки и развития теоретических моделей рождения странных барионов в релятивистских столкновениях и создают основу для будущих, более прецизионных измерений на БАК и других экспериментов по физике высоких энергий.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в следующем: измеренные спектры по поперечному импульсу и интегральные выходы $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов, а также факторы ядерной модификации предоставляют возможность тестирования и улучшения теоретических моделей образования странных частиц в pp и $p\text{-A}$ взаимодействиях на основе нового набора наблюдаемых величин, что открывает дополнительные перспективы для изучения динамики столкновений. Величина фактора ядерной модификации R_{pPb} дает возможность исследовать процессы взаимодействия партонов с холодной ядерной материей, поскольку она количественно отражает воздействие ядерной среды на процессы рождения частиц. Комплексное рассмотрение спектров по поперечному импульсу и интегральных выходов $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов, а также факторов ядерной модификации дает возможность выделить вклады отдельных механизмов образования странных частиц и сформировать единую физическую картину.

Предложенная методика идентификации и измерения импульса антинейтрона в электромагнитном калориметре обеспечивает возможность анализа спектров и корреляций нового класса частиц без необходимости создания отдельного специализированного детектора. Данная методика применима в любом эксперименте по физике высоких энергий, оснащенном электромагнитным калориметром с приемлемыми гранулярностью и точностью измерения времени пролета частиц.

Предложенный метод реконструкции $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов создает экспериментальную базу для исследования $\Sigma\text{-}N$ взаимодействия посредством двухчастичной фемтоскопии. Данное взаимодействие имеет критическое значение для формулирования уравнения состояния сверхплотной ядерной материи, поскольку существующие теоретические подходы приводят к противоречивым предсказаниям даже в отношении знака эффективного

потенциала (притяжение или отталкивание). Достоверная реконструкция заряженных Σ -гиперонов и их античастиц дает возможность расширить имеющиеся измерения для системы p - Σ^0 [7] и установить более жесткие ограничения на параметры барион-барионного взаимодействия, что напрямую сказывается на моделировании внутреннего строения нейтронных звезд, включая проблему возможности присутствия гиперонной материи в их центральных областях.

Методология и методы исследования. В работе используются следующие методы:

- **Экспериментальный метод** — анализ данных, полученных на экспериментальной установке ALICE на Большом адронном коллайдере.
- **Метод Монте-Карло** — моделирование процессов взаимодействия частиц с детектором и отклика калориметра с использованием программных пакетов GEANT3 и AliRoot.
- **Статистические методы** — статистический анализ распределений, аппроксимация спектров по поперечному импульсу частиц и других распределений, оценка статистических и систематических неопределенностей.
- **Сравнительный анализ** — сопоставление экспериментальных данных с предсказаниями теоретических моделей и генераторов событий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика идентификации и измерения импульса антинейтронов в электромагнитном калориметре по форме ливня, энергосвечению и времени пролета, и ее апробация на данных эксперимента ALICE.
2. Дифференциальные спектры рождения анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов в зависимости от поперечного импульса, впервые измеренные в каналах распадов $\bar{\Sigma}^\pm \rightarrow \bar{p}\pi^\pm$ в протон-протонных и протон-свинцовых столкновениях при энергии в системе центра масс на пару нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ.
3. Интегральные выходы $\bar{\Sigma}^\pm$ -гиперонов, впервые измеренные в каналах распадов $\bar{\Sigma}^\pm \rightarrow \bar{p}\pi^\pm$ в протон-протонных и протон-свинцовых столкновениях при энергии в системе центра масс на пару нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, а также отношения выходов $\bar{\Sigma}^\pm$ -гиперонов к выходам $\pi^\pm$, $K^\pm$, p ($\bar{p}$) и Λ -гиперонов в этих столкновениях.
4. Факторы ядерной модификации R_{pPb} , впервые измеренные для анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов в протон-свинцовых столкновениях при энергии в системе центра масс на пару нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ЦЕРН, а также на

отечественных и международных конференциях по физике высоких энергий и физике тяжелых ионов:

- "Antineutron reconstruction and identification in electromagnetic calorimeter" на конференции "The 6th International Conference on particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2022)" (Москва, 2022);
- "Production of Σ baryons as a function of multiplicity in pp collisions at the LHC with ALICE" на конференции "The 21-st International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2024)" (Страсбург, 2024);
- "Production of Σ baryons in pPb and pp collisions at the LHC with ALICE" на конференции "LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications" (Дубна, 2024);
- "Strangeness enhancement studies at the ALICE experiment" на конференции "The XXV International Workshop-School High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'270)" (Москва, 2025);
- "Production of $\bar{\Sigma}^{\pm}$ baryons in p-Pb and pp collisions at the LHC with ALICE" на конференции "The XXVIth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" (Дубна, 2025).

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие во всех этапах выполнения диссертационной работы, включая:

- разработку и реализацию методики идентификации и измерения импульса антинейтронов в калориметре PHOS;
- разработку алгоритмов реконструкции распадов $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{p}\pi^{\pm}$ и оптимизацию критериев отбора сигналов;
- проведение анализа данных, включая построение распределений инвариантных масс, извлечение сигналов, оценку эффективности и систематических неопределенностей;
- сравнение полученных экспериментальных результатов с предсказаниями моделей Монте-Карло и статистической модели;
- подготовку основных результатов к публикации и их обсуждение в рамках коллаборации ALICE.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях [A1–A5], 3 из которых изданы в журналах [A1–A3], рекомендованных ВАК, 2 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus [A4, A5].

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, дается краткий обзор экспериментальных результатов по усилению рождения странных частиц в релятивистских адронных столкновениях, обсуждаются преимущества изучения Σ -гиперонов, формулируется цель и ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору современного состояния физики кварк-глюонной плазмы и роли странных частиц для изучения ее свойств.

В **параграфе 1.1** описываются типы систем столкновений (A–A, p–A, pp), используемых для изучения КГП, и их геометрические характеристики. Обсуждается роль модели Глаубера для определения центральности и числа участвующих нуклонов N_{part} и бинарных нуклон-нуклонных столкновений N_{coll} .

В **параграфе 1.2** рассматривается явление "гашения струй" (jet quenching) — подавления выхода жестких адронов и струй в столкновениях тяжелых ионов вследствие взаимодействия партонов с горячей и плотной средой. Обсуждается фактор ядерной модификации R_{AA} и его зависимость от центральности и энергии столкновения.

В **параграфе 1.3** описывается статистическая модель рождения адронов, предполагающая химическое равновесие при температуре химического замерзания $T_{\text{ch}} \approx 155\text{--}160$ МэВ и барионном химическом потенциале $\mu_{\text{B}} \approx 1$ МэВ для центральных Pb–Pb столкновений на БАК.

В **параграфе 1.4** обсуждается эффект увеличения выхода странных частиц. Приводятся результаты экспериментов WA97 и NA57 на ускорителе SPS, демонстрирующие усиление странности, возрастающее с числом странных кварков в частице. Описываются результаты эксперимента ALICE по изучению увеличения выхода странных частиц в pp столкновениях с высокой множественностью и обсуждается роль Σ -гиперонов в исследовании странности. Приводится обзор экспериментальных данных по Σ -гиперонам, включая измерения резонансов $\Sigma(1385)^{\pm}$ в Pb–Pb столкновениях и первое фемтоскопическое исследование взаимодействия p– Σ^0 [7].

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки ALICE на Большом адронном коллайдере.

В **параграфе 2.1** обсуждается роль эксперимента ALICE в программе БАК и его ключевые возможности для изучения КГП в широком диапазоне систем столкновений и энергий.

В **параграфе 2.2** описывается трековая система и детекторы идентификации частиц: внутренняя трековая система ITS, время-проекционная камера TPC, время-пролетная система TOF, детектор переходного излучения TRD и кольцевой черенковский детектор HMPID [8].

В параграфе 2.3 описываются электромагнитные калориметры PHOS и ECal. Детально рассматривается конструкция калориметра PHOS на основе сцинтиллирующих кристаллов PbWO_4 , его энергетическое и пространственное разрешение, а также вето-детектор заряженных частиц (CPV). Описывается устройство калориметра ECal и его роль в измерении нейтральных мезонов и струй [8].

В параграфе 2.4 описываются детекторы глобальных характеристик событий и триггерные системы: V0 и T0, передний детектор множественности FMD, калориметры нулевого градуса ZDC и детектор фотонной множественности PMD [8].

В параграфе 2.5 описывается мюонный спектрометр эксперимента ALICE, предназначенный для регистрации мюонов в области псевдобыстрот $-4.0 < \eta < -2.5$ [8].

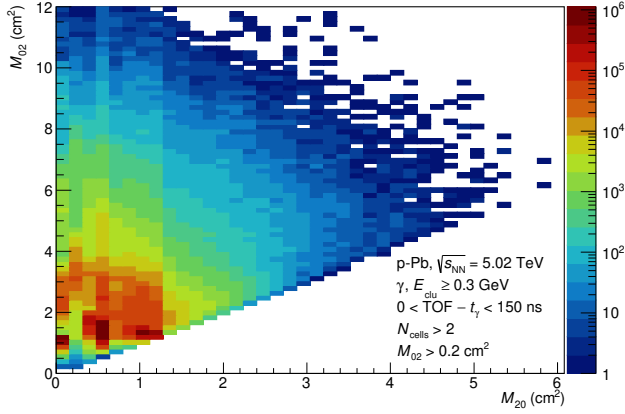
В параграфе 2.6 описывается система сбора данных и триггера, включая иерархическую триггерную систему (уровни L0, L1, L2/HLT) и архитектуру системы приема данных DAQ.

Третья глава посвящена обработке экспериментальных данных и обсуждению результатов.

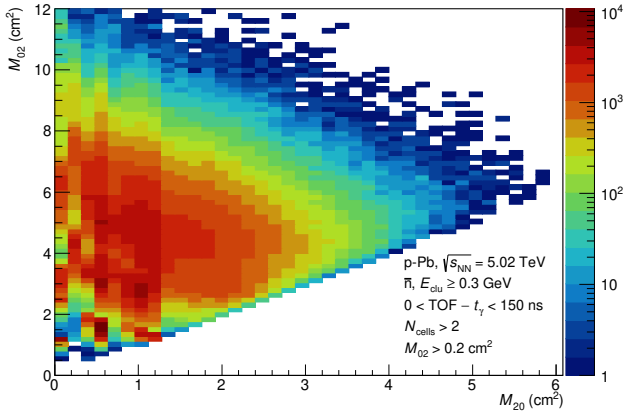
В параграфе 3.1 описываются наборы данных, использованные в анализе: данные p-Pb столкновений и pp столкновений, а также соответствующие наборы данных, смоделированные методом Монте-Карло (МК) на основе генераторов DPMJET, EPOS LHC, PYTHIA 8 и PHOJET.

В параграфе 3.2 описывается процедура отбора событий, включающая физический отбор, требование на срабатывание триггера минимального взаимодействия (одновременное срабатывание двух частей детектора V0), ограничение на положение первичной вершины $|z_{\text{vtx}}| < 10$ см и подавление наложений событий (pile-up).

В параграфе 3.3 описывается методика отбора кластеров в калориметре PHOS и измерение импульса антинейтронов [A1, A5]. Обсуждаются критерии идентификации $\bar{p}$ по выделенной энергии кластера E_{clu} , числу ячеек N_{cells} , форме ливня (параметры M_{20} и M_{02}) и нейтральности кластера (подавление кластеров от заряженных частиц, CPV отбор). Для количественной оценки формы ливня используются две переменные, M_{20} и M_{02} , которые являются собственными значениями двумерной дисперсионной матрицы $S_{ij} = \sum w_k (x_{i,k} - \bar{x}_i)(x_{j,k} - \bar{x}_j)$, где веса $w_k = \max[0, 4.5 + \ln(E_k/E_{\text{clu}})]$, E_k — энергия k -й ячейки кластера, E_{clu} — энергия кластера, а $x_{j,k}$ — j -я координата в плоскости калориметра (вдоль или перпендикулярно направлению пучка) k -й ячейки. Фотоны образуют симметричные и компактные кластеры с $M_{20} \sim M_{02} \sim 1.5$ см², в то время как кластеры, образованные $\bar{p}$, как правило, больше и более асимметричны. На рисунке 1 показаны распределения M_{20} и M_{02} для γ и $\bar{p}$, полученные с помощью Монте-Карло моделирования с использованием генератора событий DPMJET 3.0-5 [A1, A5].



а)



б)

Рис. 1 — Двумерное распределение параметров кластера M_{20} и M_{02} в р-Pb столкновениях для γ (а), $\bar{n}$ (б).

Приводится зависимость выделенной энергии кластера от импульса для антинейтронов и распределения по числу ячеек N_{cells} для различных типов частиц. Описывается процедура оптимизации отборов путем максимизации произведения эффективности на чистоту. Показана доля кластеров, созданных частицами разных типов, до и после применения

стандартного набора критериев отборов. Доля кластеров от антинейтронов возрастает до $\sim 50\%$.

Детально рассматривается реконструкция импульса антинейтрона по времени пролета по формуле:

$$p_{\text{rec}} = \frac{m_{\bar{n}}}{\sqrt{\left(\frac{t_{\text{TOF}} \cdot c}{L}\right)^2 - 1}},$$

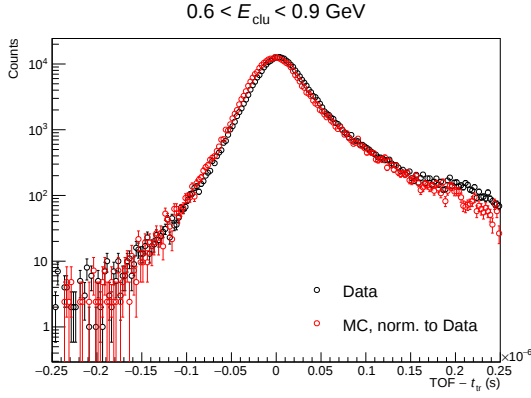
где $m_{\bar{n}}$ — масса антинейтрона, L — длина траектории антинейтрона по прямой от вершины взаимодействия до поверхности калориметра PHOS, t_{TOF} — время пролета, которое измеряется относительно времени прилета фотона $t_{\gamma} = L/c$ в калориметре PHOS.

Временное разрешение электромагнитного калориметра PHOS было параметризовано в моделировании методом Монте-Карло путем сравнения времени пролета антипротонов, определенного двумя независимыми методами. Первый метод использовал информацию из трековой системы эксперимента ALICE (ITS+TPC) для расчета времени пролета с учетом кривизны трека антипротона, второй — прямое измерение времени регистрации кластера в калориметре PHOS. Распределение разности этих двух величин позволило параметризовать вклад временного разрешения детектора. После применения параметризации, было достигнуто согласие временного отклика калориметра PHOS в данных и Монте-Карло (рис. 2).

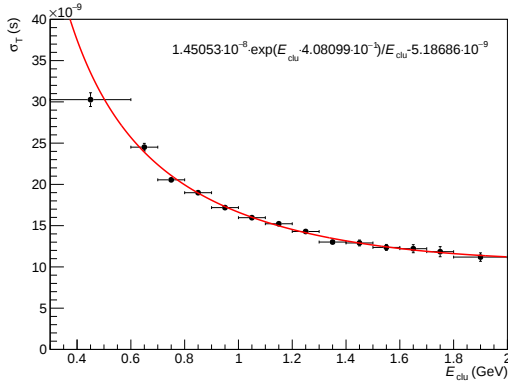
В параграфе 3.4 описывается процедура отбора треков заряженных π -мезонов, включающая стандартные требования качества для треков, ограничение по псевдобыстроте $|\eta| \leq 0.8$ и идентификацию по удельной потере энергии dE/dx в детекторе TPC с требованием совпадения с линией потерь пионов $|n_{\pi}^{\sigma}| < 3$ стандартных отклонения. Приводятся распределения n_{π}^{σ} детектора TPC в зависимости от импульса трека для данных и Монте-Карло моделирований.

В параграфе 3.5 описывается алгоритм реконструкции $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов по распаду $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{n}\pi^{\pm}$ (рис. 3). Обсуждается влияние упрощения траектории антинейтрона (предположение о прямолинейном движении от первичной вершины до калориметра PHOS) на восстановленный импульс. Показано, что различие между упрощенной и уточненной траекториями не превышает $\sim 0.5\%$ по расстоянию и времени, что существенно меньше других экспериментальных неопределенностей. Приводятся распределения разностей истинных координат вторичной вершины распада $\bar{\Sigma}^{+}$ - и $\bar{\Sigma}^{-}$ -гиперонов, полученных в Монте-Карло моделировании, и реконструированных (ΔX , ΔY , ΔZ) в p-Pb и pp столкновениях.

В параграфе 3.6 описывается процедура оптимизации топологических отборов по расстоянию наибольшего сближения дочерних частиц (DCA_{daug}), косинусу направляющего угла (CPA) и расстоянию между первичной и вторичной вершинами (PV-SV) путем максимизации



а)



б)

Рис. 2 — Распределения времени пролета кандидатов в антипротоны для диапазона выделенной энергии кластера $0.6 < E_{\text{clu}} < 0.9$ ГэВ в данных и Монте-Карло для р-Рb столкновений (а). Параметризация временного разрешения для кандидатов в антипротоны в зависимости от выделенной энергии кластера E_{clu} (б).

произведения значимости на эффективность. Приводятся распределения топологических переменных для всех комбинаций трек-кластер и для сигнальных пар. Показано, что отбор по кратчайшему расстоянию (DCA) π -мезона к первичной вершине не дает выигрыша в отношении сигнал/фон.

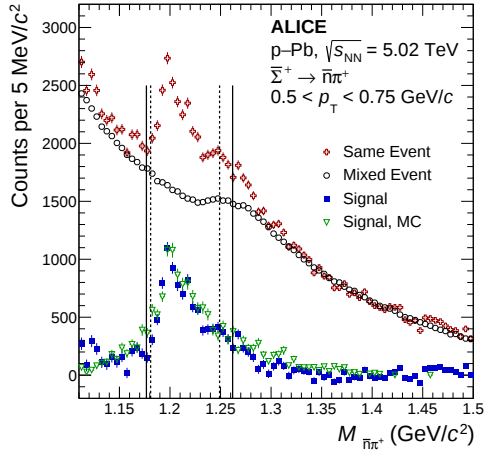
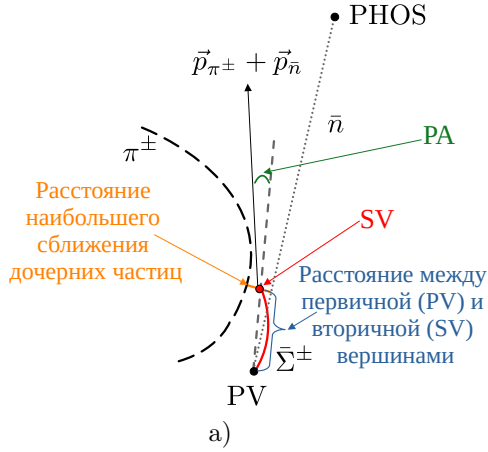


Рис. 3 — Топология распада $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{\pi} \pi^{\pm}$ (а). Распределение инвариантных масс для распада $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{\pi} \pi^{\pm}$ в p-Pb столкновениях в диапазоне поперечных импульсов $0.5 < p_T < 0.75$ ГэВ/c (б).

В параграфе 3.7 проводится сравнение различных наборов данных. Прием данных и их реконструкция проводилась в эксперименте ALICE в нескольких конфигурациях. В первой конфигурации при приеме данных и реконструкции использовались все подсистемы детектора ITS, включая дрейфовые детекторы SDD, что обеспечивает наилучшее разрешение по координате z_{vtx} вдоль пучка и по параметрам треков, но ограничивает

максимальную скорость приема данных. Во второй конфигурации детектор SDD также принимает информацию, но исключен из реконструкции данных. Третья конфигурация не использует детектор SDD, что позволяет увеличить статистику ценой небольшого ухудшения параметров треков. Показаны распределения отношения распределений инвариантных масс пар в одном событии (Same-Event) и в разных событиях (Mixed-Event) для различных конфигураций. Установлено, что выборка с использованием детектора SDD демонстрирует несколько лучшее отношение сигнал/фон, однако выигрыш невелик, поэтому в основном анализе используются объединенные выборки второй и третьей конфигурации данных.

В параграфе 3.8 описывается процедура расчета эффективности реконструкции $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов $\varepsilon(p_T)$. Обсуждается итерационная процедура взвешивания Монте-Карло спектров $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов для согласования с измеренными данными и коррекции временного разрешения калориметра PHOS. Приводятся распределения суммы параметров дисперсии $M_{20} + M_{02}$ в данных и Монте-Карло моделированиях, демонстрирующие удовлетворительное согласие.

В параграфе 3.9 детально описывается оценка систематических неопределенностей, включающая вклады от отбора кластеров в калориметре PHOS (форма ливня, CPV, порог по энергии, временной отклик), отбора треков (псевдобыстрота, число TPC-кластеров, идентификации частиц (PID)), топологических отборов, процедуры извлечения сырого выхода частиц и глобальных неопределенностей (описание материала, эффективность сопоставления ITS-TPC, эффективность триггера). Показаны зависимости от поперечного импульса p_T относительных систематических неопределенностей для $\bar{\Sigma}^+$ - и $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов в p-Pb и pp столкновениях.

В четвертой главе представлены результаты исследования.

В параграфе 4.1 представлены p_T -дифференциальные спектры $\bar{\Sigma}^+$ - и $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов, измеренные в pp и p-Pb столкновениях в диапазоне $0.5 < p_T < 3$ ГэВ/с по поперечному импульсу в области центральных быстрот (рис. 4) [A2–A5]. Проведено сравнение с предсказаниями моделей EPOS LHC и EPOS4, PYTHIA 8, PHOJET и DPMJET. Установлено, что модели EPOS LHC и EPOS4 удовлетворительно воспроизводят как абсолютный выход частиц, так и форму спектров $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов в пределах экспериментальных неопределенностей. Модели PYTHIA 8 и PHOJET предсказывают выход $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов примерно в 2–3 раза ниже измеренного при поперечных импульсах $p_T > 1$ ГэВ/с. Модель DPMJET дает существенно более высокий выход при низких поперечных импульсах p_T и примерно в четыре раза меньший выход при высоких поперечных импульсах p_T в p-Pb столкновениях.

В параграфе 4.2 представлены отношения спектров по поперечному импульсу p_T $\bar{\Sigma}^+$ - к $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонам в pp и p-Pb столкновениях

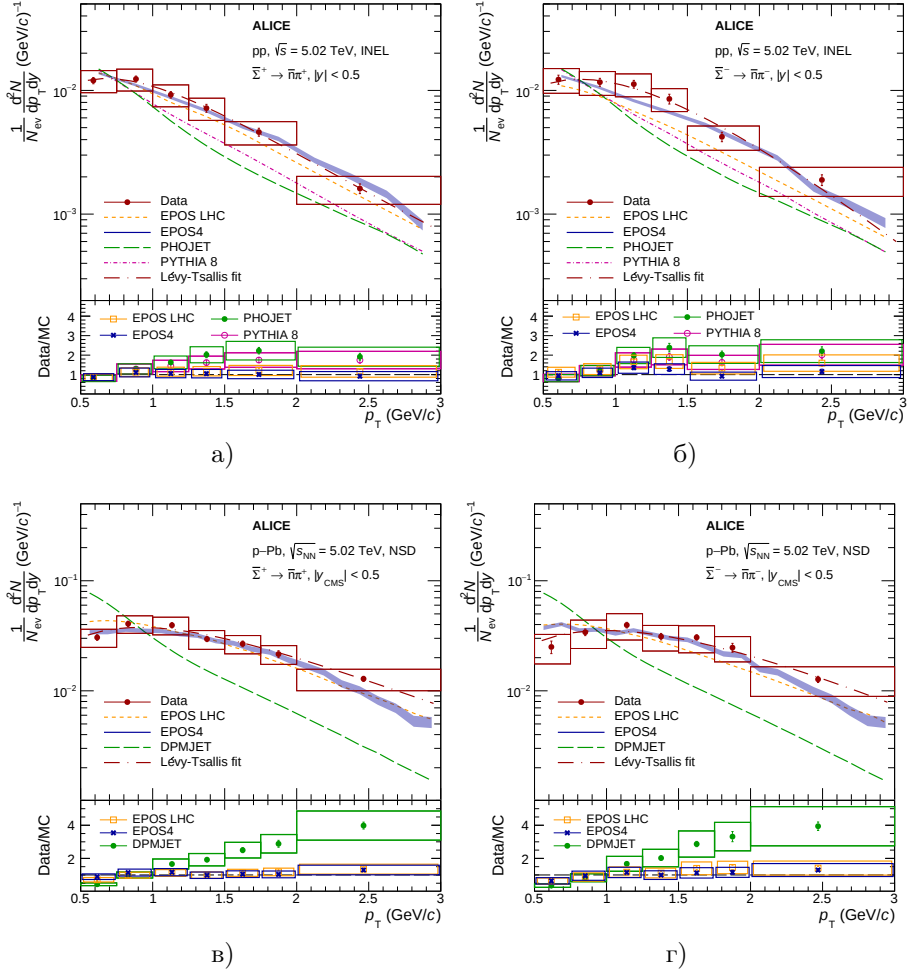


Рис. 4 — Спектры поперечного импульса p_T $\bar{\Sigma}^+$ (левый столбец) и $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов (правый столбец), измеренные в pp (верхний ряд) и p-Pb (нижний ряд) столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, в сравнении с предсказаниями моделей EPOS LHC и EPOS4, PYTHIA 8, PHOJET и DPMJET. Также показана аппроксимация функцией Леви–Цаллиса измеренных спектров [A2–A5].

[A5]. Измеренные отношения согласуются с единицей во всем изученном диапазоне поперечных импульсов p_T , что говорит об отсутствии заметных эффектов отклонения от изоспиновой симметрии при рождении анти- Σ -гиперонов.

В параграфе 4.3 представлены p_T -дифференциальные отношения спектров $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов и других адронов к заряженным π -мезонам, протонам и Λ -гиперонам [A3, A5]. Показано, что отношения $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов к заряженным π -мезонам растет вплоть до максимальных измеренных значений поперечного импульса $p_T \approx 3$ ГэВ/с, тогда как для остальных частиц наблюдается насыщение при высоких поперечных импульсах p_T . Это может указывать на более сильное вовлечение $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов в радиальное коллективное расширение среды.

В параграфе 4.4 представлены интегральные выходы dN/dy для $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов в pp и p -Pb столкновениях (табл. 1), а также отношения интегральных выходов для различных адронов [A3, A5]. Обсуждается процедура экстраполяции спектров в ненаблюдаемые области поперечного импульса с использованием различных функциональных форм. В pp столкновениях вклад экстраполируемых областей составляет 16–24 % (низкие поперечные импульсы p_T) и 1–3 % (высокие поперечные импульсы p_T), в p -Pb столкновениях — 8–14 % и 5–12 % соответственно, что обеспечивает надежность определения полных выходов частиц. Параметры, полученные при описании интегральных выходов частиц с помощью модели Thermal-FIST, равны: для pp столкновений $T = 148.69 \pm 0.03$ МэВ, $\mu_B = 0 \pm 0.09$ МэВ; для p -Pb столкновений $T = 147.31 \pm 0.06$ МэВ, $\mu_B = 0 \pm 0.2$ МэВ.

Таблица 1 — Интегральный выход $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов в pp и p -Pb столкновениях по сравнению с предсказаниями моделей. Все значения умножены на 10^3 .

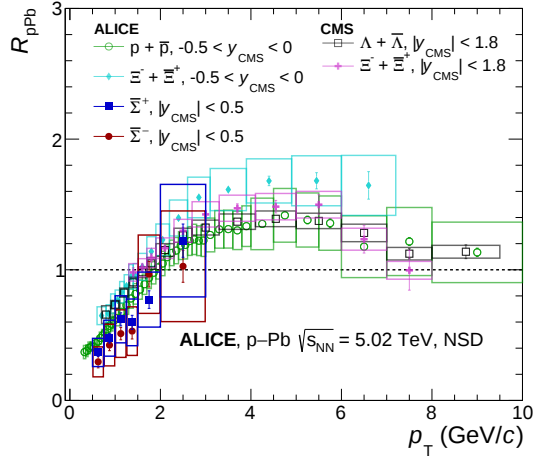
Частица	$\bar{\Sigma}^+$	$\bar{\Sigma}^-$
pp столкновения (INEL)		
Эксперимент ($\frac{dN}{dy}$)	$18.1 \pm 0.5 \pm 4.0 \pm 0.7$	$18.3 \pm 0.7 \pm 4.7 \pm 0.7$
EPOS4	21.4 ± 0.2	20.4 ± 0.2
EPOS LHC	18.44 ± 0.004	14.74 ± 0.004
PHOJET	16.45 ± 0.05	16.55 ± 0.05
PYTHIA 8	17.71 ± 0.03	17.77 ± 0.03
Thermal-FIST	16.7	17.2
p-Pb столкновения (NSD)		
Эксперимент ($\frac{dN}{dy}$)	$75 \pm 3 \pm 16 \pm 3$	$72 \pm 2 \pm 20 \pm 3$
EPOS4	71.9 ± 0.8	73.8 ± 0.8
EPOS LHC	74.1 ± 0.1	69.1 ± 0.1
DPMJET	78.39 ± 0.05	78.47 ± 0.05
Thermal-FIST	63	65

Также представлено сопоставление экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями статистической модели Thermal-FIST, а также динамических моделей EPOS LHC, EPOS4, DPMJET и PYTHIA 8.

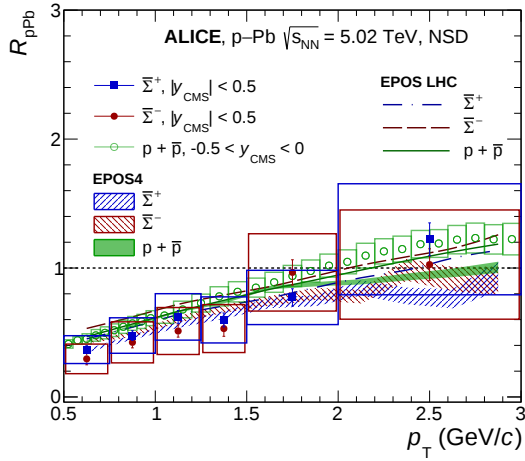
Во всех рассмотренных случаях модельные расчеты находятся в согласии с экспериментальными значениями в пределах полных систематических и статистических неопределенностей как для pp , так и для p -Pb столкновений. Это указывает на отсутствие значительных аномалий в интегральном выходе анти- $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов.

Примечательно, что выход Λ -гиперонов традиционно представляет трудность для динамических моделей, и отношение $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов к Λ -гиперонам в большинстве случаев не воспроизводится ими с количественной точностью (за исключением $\bar{\Sigma}^{-}$ -гиперонов в модели EPOS LHC). Статистическая модель Thermal-FIST, напротив, демонстрирует существенно лучшее описание данного отношения. В то же время отношение $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов к каонам показывает лучшее согласие с предсказаниями большинства динамических моделей, тогда как статистическая модель систематически занижает его значение. Подобная разница в описании различных отношений может свидетельствовать о специфике механизмов рождения странных кварков и о важной роли резонансных распадов в процессе адронизации.

В параграфе 4.5 представлены факторы ядерной модификации R_{pPb} для $\bar{\Sigma}^{+}$ - и $\bar{\Sigma}^{-}$ -гиперонов, определяемые согласно уравнению (1), с использованием среднего числа бинарных нуклон-нуклонных столкновений $\langle N_{coll} \rangle = 6.9 \pm 0.7$ для не-дифракционных (NSD) p -Pb событий (рис. 5) [A5]. Проведено сравнение с факторами ядерной модификации для протонов, а также странных адронов Λ - и Ξ -гиперонов. Значения факторов R_{pPb} для $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов согласуются с таковыми для других барионов в пределах неопределенностей и не демонстрируют заметной зависимости от количества странных частиц. Модели EPOS LHC и EPOS4 удовлетворительно воспроизводят экспериментальные значения фактора R_{pPb} как для протонов, так и для анти- Σ -гиперонов.



a)



б)

Рис. 5 — Факторы ядерной модификации R_{pPb} , измеренные для $\bar{\Sigma}^{+}$ - и $\bar{\Sigma}^{-}$ -гиперонов [A5], по сравнению с таковыми для протонов и Ξ (а) и с предсказаниями моделей EPOS4 и EPOS LHC (б).

В заклучении приведены основные результаты работы:

1. Предложена и успешно апробирована на экспериментальных данных методика идентификации и измерения импульса антинейтронов в электромагнитном калориметре PHOS в эксперименте ALICE на основе анализа профиля адронного ливня и измерения времени пролёта. Методика впервые позволила реконструировать антинейтроны с использованием электромагнитного калориметра и была применена для восстановления распадов $\bar{\Sigma}^{\pm} \rightarrow \bar{p}\pi^{\pm}$.
2. Впервые измерены p_T -дифференциальные спектры $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов в pp и p -Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ в диапазоне поперечных импульсов $0.5 < p_T < 3$ ГэВ/с в области центральных быстрот. Измерения проведены для изучения механизмов рождения странности. Сравнение с предсказаниями генераторов Монте-Карло показало, что модели EPOS LHC и EPOS4, учитывающие коллективные эффекты и многопартонные взаимодействия, удовлетворительно воспроизводят как форму спектров так и полный выход частиц в обеих сталкивающихся системах, в то время как модели PYTHIA 8, PHOJET и DPMJET демонстрируют существенные расхождения (недооценивают выход в 3–4 раза при высоких поперечных импульсах p_T), что указывает на необходимость учёта коллективных явлений даже в малых системах. Измерены отношения спектров по поперечному импульсу p_T $\bar{\Sigma}^+$ - к $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов в pp и p -Pb столкновениях для проверки изоспиновой симметрии. Благодаря кварковому составу $\bar{\Sigma}^+$ -гиперонов ($\bar{u}\bar{u}\bar{s}$) и $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов ($\bar{d}\bar{d}\bar{s}$) данные отношения в два раза более чувствительны к возможным нарушениям изоспиновой симметрии, чем отношение выходов нейтронов к протонам. Наблюдаемое согласие с единицей во всём диапазоне поперечных импульсов p_T указывает на отсутствие существенных изоспиновых эффектов в исследуемых системах.
3. Определены интегральные выходы $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов на единицу быстроты в pp и p -Pb столкновениях с применением экстраполяции спектров частиц в области фазового пространства, недоступные для прямого измерения. Измерения выполнены для проверки предсказаний статистических моделей адронизации и оценки степени химического равновесия системы. Как статистическая термодинамическая модель Thermal-FIST, так и динамические генераторы согласуются с измеренными интегральными выходами $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов в пределах экспериментальных неопределённостей. Однако отношения выходов $\bar{\Sigma}^{\pm}$ -гиперонов к другим странным и нестранным адронам воспроизводятся моделями с различной степенью точности: динамические модели систематически завышают

отношение Σ -гиперонов к Λ -гиперонам и испытывают затруднения при описании абсолютных выходов Λ -гиперонов, в то время как статистическая модель Thermal-FIST хорошо описывает отношение Σ -гиперонов к Λ -гиперонам, но несколько занижает отношения к каонам. Это указывает на высокую чувствительность относительных выходов частиц к механизмам адронобразования.

4. Измерен фактор ядерной модификации $R_{p\text{Pb}}$ для $\bar{\Sigma}^+$ - и $\bar{\Sigma}^-$ -гиперонов с целью количественной оценки эффектов холодной ядерной материи на рождение странных барионов. Значения факторов $R_{p\text{Pb}}$ для $\bar{\Sigma}^\pm$ -гиперонов согласуются в пределах неопределённостей с данными для протонов, Λ - и Ξ -гиперонов во всём исследованном диапазоне поперечных импульсов p_T , что свидетельствует об отсутствии выраженной зависимости ядерных эффектов от содержания странности. Модели EPOS LHC и EPOS4 корректно описывают экспериментальные значения фактора $R_{p\text{Pb}}$ для анти- Σ -гиперонов.
5. Представленные результаты измерений, включающие дифференциальные спектры, интегральные выходы и факторы ядерной модификации для частиц $\bar{\Sigma}^\pm$ -гиперонов в системах pp и $p\text{-Pb}$, служат для верификации теоретических расчетов. Эти данные необходимы для уточнения параметров феноменологических моделей, описывающих механизмы рождения странных барионов в релятивистских столкновениях протонов и ядер. Разработанная методика реконструкции антинейтронов в электромагнитном калориметре создаёт фундаментальную возможность для систематического изучения широкого спектра физических наблюдаемых и закладывает основу для будущих высокоточных измерений в будущих сеансах на Большом адронном коллайдере и других экспериментах по физике высоких энергий.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. *P. Gordeev, for the ALICE Collaboration.* Antineutron Reconstruction and Identification in Electromagnetic Calorimeter // Phys. Atom. Nucl. — 2023. — Vol. 86, no. 5. — P. 827—831.
- A2. *Pavel Gordeev, for the ALICE Collaboration.* Production of Σ Baryons in p-Pb and pp Collisions at the LHC with ALICE // Phys. Atom. Nucl. — 2024. — Vol. 87, Suppl 3. — S432—S437.
- A3. *P. P. Gordeev.* Strangeness enhancement studies at the ALICE experiment // Moscow Univ. Phys. Bull. — 2025. — Vol. 80, Suppl. 2. — S826—S834.
- A4. *Pavel Gordeev, for the ALICE Collaboration.* Production of Σ baryons as a function of multiplicity in pp collisions at the LHC with ALICE // EPJ Web Conf. — 2025. — Vol. 316. — P. 03003.
- A5. *P. Gordeev, I. J. Abualrob, [et. al.] (ALICE Collaboration).* $\bar{\Sigma}^{\pm}$ production in pp and p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE // Eur. Phys. J. C. — 2026. — Vol. 86, no. 132.

Список литературы

- 1. *Rafelski J., Muller B.* Strangeness Production in the Quark-Gluon Plasma // Phys. Rev. Lett. — 1982. — Vol. 48. — P. 1066. — [Erratum: Phys.Rev.Lett. 56, 2334 (1986)].
- 2. The ALICE experiment: a journey through QCD / S. Acharya [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2024. — Vol. 84, no. 8. — P. 813.
- 3. *Koch P., Muller B., Rafelski J.* Strangeness in Relativistic Heavy Ion Collisions // Phys. Rept. — 1986. — Vol. 142. — P. 167—262.
- 4. *Bierlich C., Christiansen J. R.* Effects of color reconnection on hadron flavor observables // Phys. Rev. D. — 2015. — Vol. 92, no. 9. — P. 094010.
- 5. *Borissov A.* Production of Σ^0 Hyperons and Search of Σ^0 Hypernuclei at LHC with ALICE // Phys. Atom. Nucl. — 2023. — Vol. 86, no. 6. — P. 1336—1340.
- 6. Σ^+ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV / I. J. Abualrob [et al.] // Eur. Phys. J. C. — 2026. — Feb. — Vol. 86, no. 101.
- 7. Investigation of the p- Σ^0 interaction via femtoscopy in pp collisions / S. Acharya [et al.] // Phys. Lett. B. — 2020. — Vol. 805. — P. 135419.
- 8. The ALICE experiment at the CERN LHC / K. Aamodt [et al.] // JINST. — 2008. — Vol. 3. — S08002.

Гордеев Павел Петрович

Измерение спектров анти- $\Sigma^{\pm}$ -гиперонов с помощью электромагнитного
калориметра PHOS эксперимента ALICE

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____