

# ИЗМЕРЕНИЕ АДРОНОВ С ОТКРЫТЫМ ОЧАРОВАНИЕМ В ДЕТЕКТОРЕ ALICE-3 НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ

© 2024 г. М. В. Малаев<sup>1,2,\*</sup>, В. Г. Рябов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) Долгопрудный, Россия

\*e-mail: mалаев\_mv@npi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 16.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

ALICE-3 является модернизацией существующего эксперимента ALICE для работы на Большом адронном коллайдере высокой светимости в ЦЕРН после 2030 года. Одной из физических задач установки ALICE-3 является исследование свойств плотной и горячей партонной среды, образующейся в столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер, посредством измерения адронов с открытым очарованием. Детектор ALICE-3 хорошо оснащен для измерения D-мезонов в основном и возбужденном состояниях в каналах распада с заряженными частицами в конечном состоянии. Представлены результаты исследования возможности регистрации адронов с открытым очарованием в каналах распада с нейтральными фотонами или мезонами в конечном состоянии при использовании электромагнитного калориметра с большим акцептансом.

**Ключевые слова:** релятивистские столкновения тяжелых ионов, открытое очарование, тяжелый аромат, реконструкция частиц

**DOI:** 10.31857/S0367676524080182, **EDN:** OPRPFQ

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение структуры фазовой диаграммы состояния сильновзаимодействующей материи является одной из приоритетных задач теоретической и экспериментальной физики высоких энергий на протяжении десятилетий [1]. Расчеты фундаментальной теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики на решетке указывают, что в области больших температур  $T \sim 150\text{—}160$  МэВ и близких к нулевым значениям барионного химического потенциала должен происходить фазовый переход из адронной материи в состояние с квазисвободными кварками и глюонами, получившее название кварк-глюонной плазмы (КГП) [2]. Экспериментально подобные состояния могут быть реализованы в центральных столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер [3]. В 2005 году все эксперименты, работающие на коллайдере тяжелых ионов RHIC в США, заявили об обнаружении нового состояния материи в столкновениях тяжелых ядер при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 100\text{—}200$  ГэВ — сильносвязанной КГП [4, 5]. Запуск коллайдера LHC в Швейцарии позволил увеличить энергию взаимодействия тяжелых ядер более чем на порядок величины, а проведенные

исследования в основном подтвердили ранее сделанные выводы об обнаружении фазового перехода.

Эксперимент ALICE является одной из основных экспериментальных установок, предназначенных для изучения столкновений тяжелых релятивистских ядер на коллайдере LHC [6]. Одной из стадий модернизации эксперимента должно стать создание новой экспериментальной установки ALICE-3, которая, как планируется, должна быть введена в строй со стартом работы ускорителя HL (High Luminosity) LHC в 2030 году [7]. В своей конструкции новый детектор будет использовать новейшие разработки в области кремниевых детекторов, что позволит ему работать при светимостях пучков тяжелых ионов, которые станут доступными после модернизации ускорителя LHC [8]. Новый детектор также будет обладать превосходным разрешением и близким к 4л покрытием по телесному углу, что позволит установке измерять с высокой точностью даже самые редкие сигнатуры.

Изучение процессов рождения мезонов с открытым очарованием в области больших поперечных импульсов является важной частью физической программы эксперимента ALICE-3. Тяжелые  $c$ -кварки рождаются на самых ранних этапах взаимодействия

ядер и несут на себе отпечаток эволюции взаимодействующей системы, включая фазу КГП. Это делает такие частицы удобным инструментом для изучения свойств взаимодействующей системы через измерение их факторов ядерной модификации и азимутальных угловых корреляций в широком динамическом диапазоне. Как правило, свойства  $D$ -мезонов экспериментально измеряются в каналах распада с заряженными адронами в конечном состоянии. В одной из предыдущих работ мы продемонстрировали принципиальную возможность восстановления сигналов от распадов основного и возбужденных состояний  $D^0$ -мезона в каналах распада с нейтральными пионами и фотонами в конечном состоянии, регистрация которых происходит с использованием электромагнитного калориметра эксперимента ALICE-3 [9]. Использование каналов распада с фотонами в конечном состоянии позволяет эффективно увеличить интегральную светимость используемой для анализа выборки данных за счет использования онлайн-триггеров, отбирающих события, содержащие как минимум один высокоэнергетический сигнал в калориметре. Данные каналы распада также характеризуются достаточно большими выходами (каналы, BR) [10]. В данной работе мы обсуждаем возможности экспериментальной установки ALICE-3 для измерения  $D^0$ -мезона в канале

распада  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  с использованием более реалистичного подхода для моделирования отклика электромагнитного калориметра, который среди прочего учитывает конечную вероятность перекрытия электромагнитных ливней в условиях высокой множественности рождающихся частиц в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ.

### ЭФФЕКТ ПЕРЕКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЛИВНЕЙ

Поперечный размер электромагнитного ливня, образуемого в калориметре, определяется используемыми материалами калориметра (значением радиуса Моляра для выбранных материалов). Гранулярность калориметра, или поперечный размер его башен определяет точность, с которой может быть измерена форма образовавшегося ливня. Как правило, поперечный размер башен калориметра выбирается близким к характерному поперечному размеру электромагнитного ливня. В случае прохождения через калориметр двух близкорасположенных частиц существует ненулевая вероятность, что сгенерированные двумя частицами ливни сольются в один без возможности их экспериментального разделения (эффект “слипшихся” ливней). На рис. 1 схематически показаны примеры энергетических выделений в калориметре

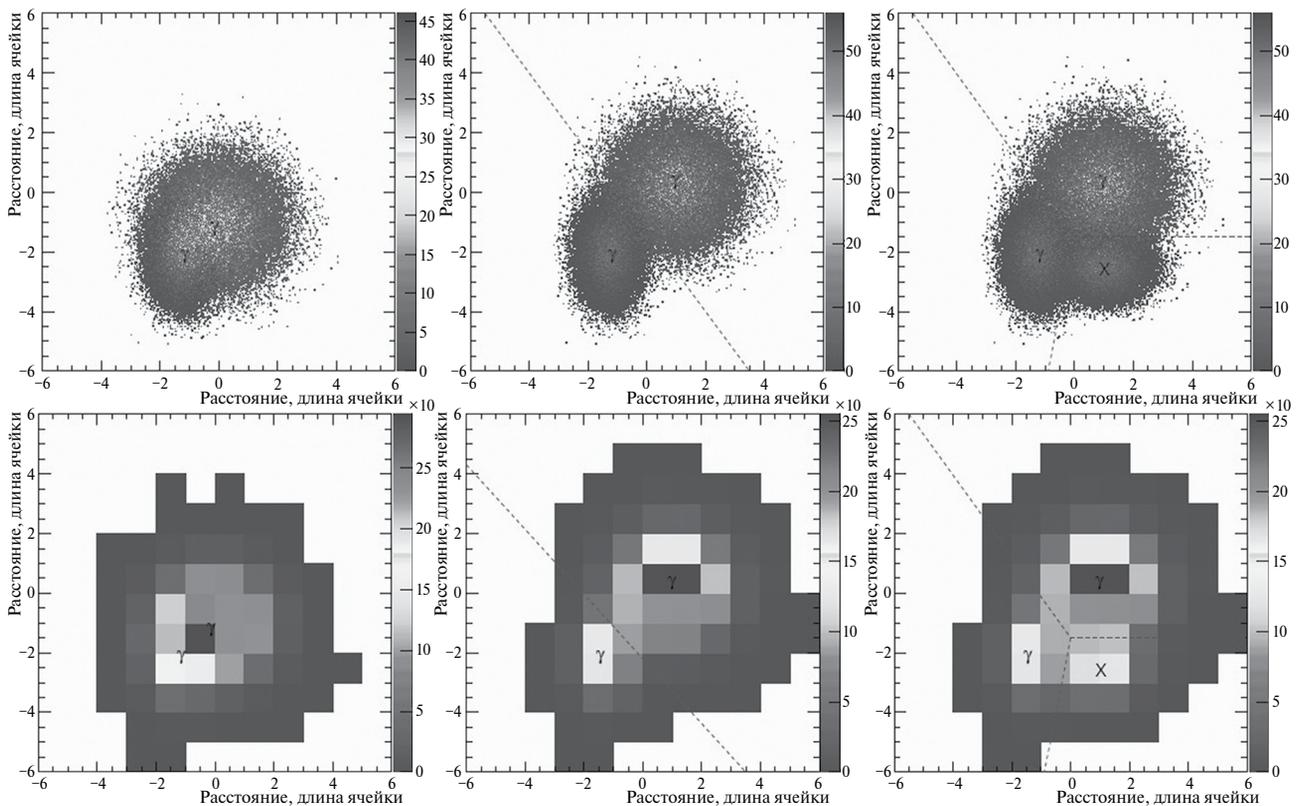


Рис. 1. Примеры энергетических распределений в электромагнитном калориметре в случае бесконечно высокой гранулярности детектора (вверху) и низкой гранулярности (внизу).

при прохождении двух или более частиц на малом расстоянии друг от друга для случая бесконечно высокой гранулярности детектора (сверху) и реального варианта его гранулярности (снизу). Можно предположить, что вариант энергосделения от двух фотонов, показанный на рисунках слева, не позволит разделить два сигнала, и в конечном счете они будут измерены как один сигнал (наличие только одного локального максимума в измеренном распределении энергии по башням калориметра). Остальные примеры, показанные на рис. 1, соответствуют ситуациям, в которых разделение частично перекрывающихся ливней остается возможным при наличии двух или трех локальных максимумов в измеренных энергетических распределениях. На вероятность образования слипшихся ливней влияет много факторов, таких как конструкция и гранулярность детектора, алгоритм реконструкции кластеров, множественность события и средняя энергия измеряемых сигналов, расстояние от калориметра до точки взаимодействия и т. д. Разделение частично перекрывающихся друг с другом ливней возможно при известной ожидаемой форме электромагнитного ливня. Тем не менее, полностью избавиться от данного эффекта невозможно, и поэтому его необходимо учитывать при анализе данных с использованием электромагнитного калориметра.

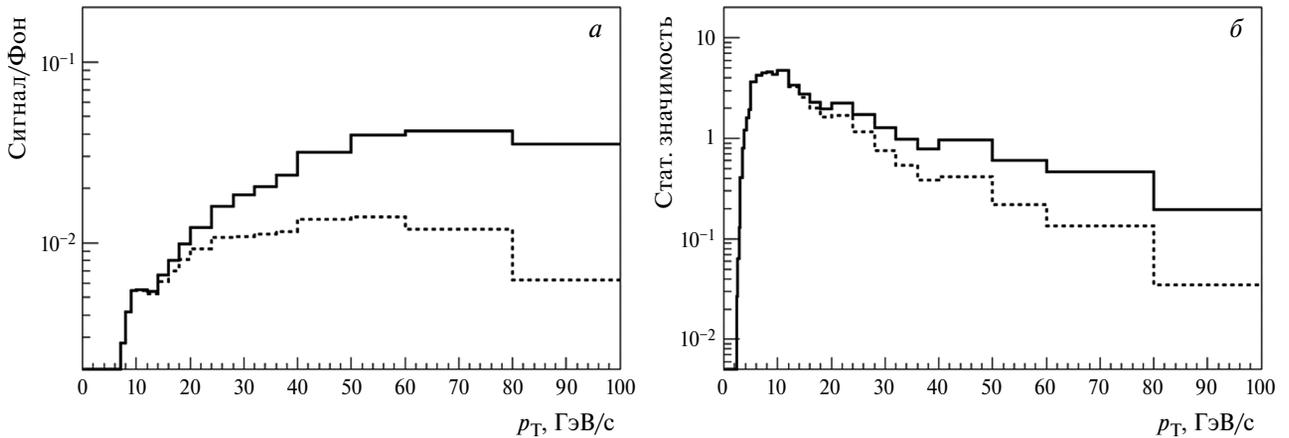
### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА СЛИПАНИЯ ЛИВНЕЙ

Подробное описание состава и характеристик детекторных подсистем экспериментальной установки ALICE-3 представлено в работе [7]. В данной работе рассматривается методика восстановления сигнала и оценки фона для распада  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ с использованием установки ALICE-3. Для моделирования ядерных столкновений использовался генератор событий Pythia8 с опцией Angatyr (внутренняя настройка генератора для моделирования столкновений тяжелых ионов) [11]. Как было показано в работе [9], данный генератор адекватно воспроизводит дифференциальные спектры рождения  $D^0$ -мезона и его возбужденных состояний в  $p+p$ ,  $p+Pb$  и  $Pb+Pb$  столкновениях при энергиях коллайдера LHC, в частности, он хорошо воспроизводит измерения коллаборации ALICE для  $D^0$  мезона в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ. Принципиальная возможность измерения характеристик  $D^0$  мезона в канале распада  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  с использованием установки ALICE-3 была продемонстрирована в работе [9]. В данной работе была реализована более реалистичная схема отбора фотонов, учитывающая вероятность перекрытия электромагнитных ливней и, как следствие, слияния измеренных ливней в электромагнитном калориметре ALICE-3.

Ввиду отсутствия готовых кодов и инструментов для детального моделирования отклика

электромагнитного калориметра установки ALICE-3, в работе использовался упрощенный алгоритм образования кластеров, учитывающий геометрические размеры и гранулярность детектора. Для всех сгенерированных фотонов с энергиями большими 10 МэВ для центральной части калориметра (PHOS) и 100 МэВ для периферийной части калориметра (ECAL) определялись координаты точек пересечения их траекторий с поверхностью электромагнитного калориметра. Аналогичные точки определялись и для треков заряженных частиц, попадающих в калориметр, при этом энергия точек приравнивалась равной 350 МэВ, соответствующей отклику калориметра для минимально ионизирующих частиц. После этого анализировались все возможные комбинации восстановленных точек. В случае, если две точки находились на расстоянии меньшем полуторного размера ячейки калориметра ( $2.2 \times 2.2$  см и  $3 \times 3$  см для PHOS и ECAL), обе точки объединялись в один "слипшийся" кластер. Энергия нового кластера приравнивалась равной сумме энергий двух слипшихся ливней, а координаты кластера определялись как взвешенные координаты двух слипшихся точек с учетом их энергий. После этого две точки, из которых был образован новый сигнал, исключались из дальнейшего анализа, а новый кластер использовался для дальнейшего сравнения с другими точками. Цикл заканчивался, когда все восстановленные кластеры находились на расстоянии друг от друга большем установленного минимального расстояния. В итоге данный алгоритм создавал новый набор кластеров, зарегистрированных в калориметре.

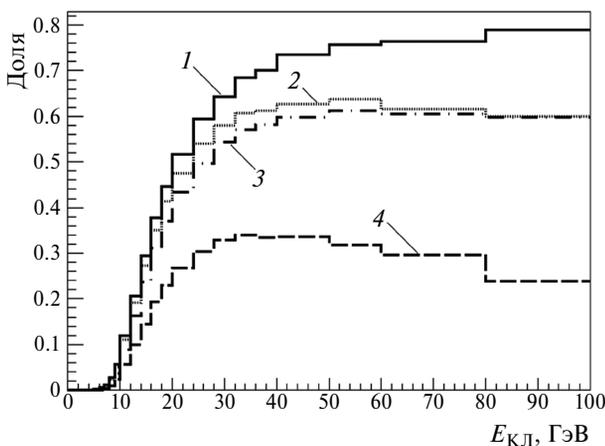
Использовались два базовых подхода для восстановления сигналов от распада  $D^0$ -мезонов и определения фона. Первый подход подразумевал восстановление дочерних  $\pi^0$ -мезонов в канале распада  $\pi^0 + \pi^0$  с регистрацией обоих фотонов как отдельных кластеров в калориметре (подход БСК). В случае если кластеры от двух фотонов слипались в калориметре, то восстановление такого пиона, а следовательно, и родительского  $D^0$ -мезона становилось невозможным. Для оценки фона все кластеры, полученные после ранее описанного алгоритма слияния кластеров, комбинировались в пары и в качестве  $\pi^0$ -кандидатов отбирались только пары с инвариантной массой, лежащей в пределах двух среднеквадратичных отклонений от табличной массы  $\pi^0$  мезона. Величина среднеквадратичного отклонения определяется энергетическим разрешением калориметра и была оценена в работе [9] в зависимости от поперечного импульса пары фотонов и типа используемого детектора. На рис. 2 представлены результаты оценки влияния эффекта слияния кластеров на отношение сигнал-фон (рис. 2а) и статистическую значимость измеряемого сигнала от распада  $D^0$ -мезона (рис. 2б). Сплошными линиями представлены результаты, соответствующие идеальному детектору с возможностью разделения всех кластеров. Пунктирные линии соответствуют результатам, полученным в рамках



**Рис. 2.** Отношение сигнал-фон (а) и статистическая значимость (б) для реконструированных сигналов от  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  распадов в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ.

БСК подхода. Рисунок хорошо иллюстрирует влияние эффекта слипания кластеров, приводящего к ухудшению качества восстанавливаемого сигнала. Эффект становится наиболее значимым в области больших поперечных импульсов из-за уменьшения угла раскрытия между фотонами от распада  $\pi^0$ -мезонов и увеличению вероятности из слипания.

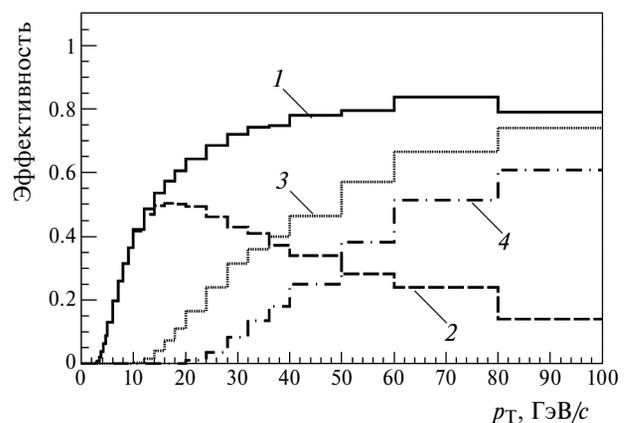
Второй подход (подход СК) подразумевает измерение  $\pi^0$ -мезонов через регистрацию одного слипшегося кластера. На рис. 3 представлен анализ источников происхождения слипшихся кластеров, полученных после использования ранее описанного алгоритма “слипания”. Линия 2 на рисунке соответствует доле



**Рис. 3.** Источники происхождения слипшихся кластеров в электромагнитном калориметре установки ALICE-3 для случая Pb+Pb столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ (1 — кластер состоит из двух фотонов от распада как минимум одного  $\pi^0$  и других фотонов; 2 — кластер состоит из двух фотонов от распада одного  $\pi^0$  и других фотонов, энергия от распада  $\pi^0$  составляет не менее 85% энергии кластера; 3 — кластер состоит из двух фотонов от распада одного  $\pi^0$  и других фотонов; 4 — кластер состоит из двух фотонов от распада одного  $\pi^0$ )

кластеров от общего их числа, состоящих из двух фотонов от распада одного и того же  $\pi^0$ -мезона. Полученный кластер может также содержать вклады от других фотонов в событии, но вклад от распада пиона составляет не менее 85% от суммарной энергии кластера. Отбирая слипшиеся кластеры с энергией большей 20 ГэВ, мы гарантируем, что более 65% из них состоят их слипшихся фотонов от распада нейтрального пиона с приемлемым для наших оценок уровнем примесей.

На рис. 4 представлена оцененная эффективность регистрации распадов  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ. Линия 1 была получена для случая идеального детектора при отсутствии эффекта слипания кластеров. Линия 2 была получена при применении подхода БСК, а линии 3 и 4 соответствуют применению подхода



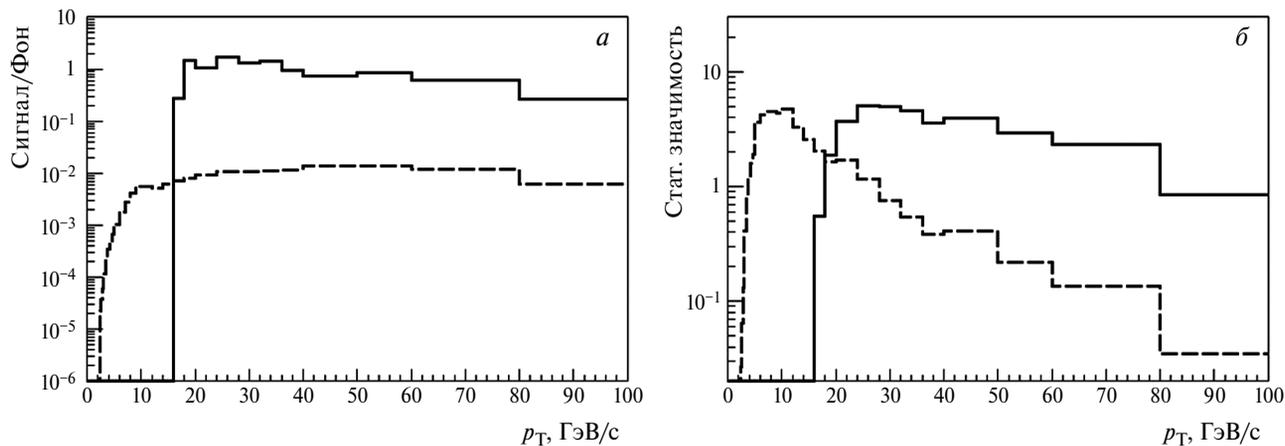
**Рис. 4.** Эффективность регистрации распадов  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ при использовании различных алгоритмов регистрации  $\pi^0$ -мезонов (1 — отсутствие эффекта слипания кластеров; 2 — подход БСК; 3 — подход СК; 4 — подход СК с дополнительным требованием для минимального поперечного импульса нейтрального пиона  $p_T > 20$  ГэВ/c).

СК и СК с дополнительным требованием для минимального поперечного импульса нейтрального пиона  $p_T > 20$  ГэВ/с соответственно. Исключение слипшихся кластеров из анализа значительно понижает эффективность восстановления сигнала при увеличении поперечного импульса частиц. С другой стороны, подход СК не работает в области малых и промежуточных значений поперечного импульса, но его эффективность приближается к значению эффективности для идеального детектора в области больших поперечных импульсов.

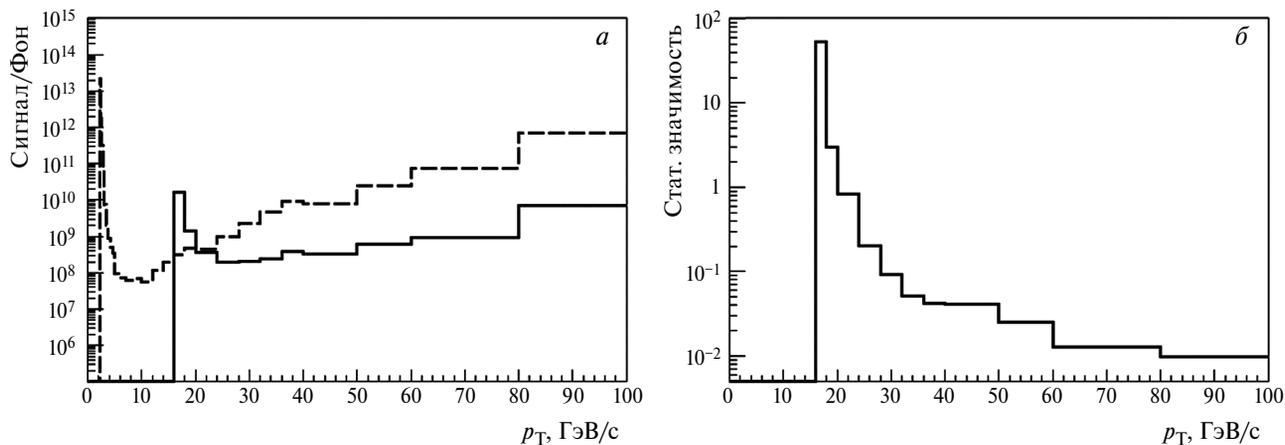
На рис. 5 представлены результаты сравнения двух подходов для случая восстановления сигналов от распадов  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ. На рис. 5а представлены отношения сигнал-фон, на рис. 5б показаны достигаемые статистические значимости регистрируемых сигналов. Можно видеть, что подход с исключением из анализа слипшихся кластеров демонстрирует

наилучшую эффективность в области малых значений поперечного импульса и становится неэффективным в области больших импульсов. С другой стороны, подход с использованием слипшихся кластеров для регистрации  $\pi^0$ -мезонов не работает в области импульсов меньших 15–18 ГэВ/с, но при  $p_T > 25$  ГэВ/с такой подход становится более предпочтительным для физического анализа.

На рис. 6 более наглядно представлено сравнение эффективностей разработанных в работе подходов для случая Pb+Pb столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ. Распределения на рис. 5а показывают необходимое число Pb+Pb столкновений для измерения сигнала от распада  $D^0$ -мезонов со статистической значимостью равной 10 для каждого рассматриваемого интервала по поперечному импульсу. Пунктирная линия на рисунке соответствует подходу БСК, сплошная СК. На рис. 5б представлено их отношение. Хорошо видно, что подход с использованием



**Рис. 5.** Отношения сигнал-фон (а) и статистические значимости сигналов от  $D^0 \rightarrow \pi^+ + K^- + \pi^0$  распадов (б) при использовании двух различных алгоритмов регистрации  $\pi^0$ -мезонов в Pb+Pb столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ.



**Рис. 6.** Оценки для числа Pb+Pb столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ, необходимого для регистрации сигналов от распада  $D^0$ -мезонов со статистической значимостью 10 при использовании двух различных алгоритмов регистрации  $\pi^0$ -мезонов (а), а также их отношение (б).

слипшихся кластеров в анализе является более предпочтительным для регистрации сигналов в области больших поперечных импульсов  $p_T > 30$  ГэВ/с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-42-04405).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты позволили получить более точные оценки для отношения сигнал-фон и необходимого числа событий для измерения  $D^0$ -мезонов в Pb+Pb столкновениях при максимальных энергиях коллайдера HL-LHC с учетом конечной сегментации детектора и возможности “слипания” измеряемых сигналов. Оценки были получены с использованием двух различных методик восстановления  $\pi^0$  мезонов в конечном состоянии: 1) регистрация  $\pi^0$  мезона через восстановление двух отдельных сигналов в электромагнитном калориметре, соответствующих двум дочерним фотонам; 2) регистрация  $\pi^0$  мезона как отдельного кластера, образовавшегося в результате “слипания” сигналов от двух дочерних фотонов. Показано, что первая методика обеспечивает наилучшие условия для измерения  $D^0$ -мезонов в области промежуточных поперечных импульсов до 30 ГэВ/с. В области больших поперечных импульсов до 100 ГэВ/с вторая методика регистрации сигналов предпочтительна и требует меньшего числа зарегистрированных событий для измерения  $D$ -мезонов. Показано, что для измерения спектра рождения  $D^0$ -мезонов со статистической погрешностью менее 10% в области поперечных импульсов до 100 ГэВ/с потребуется накопление эффективной статистики, соответствующей  $\sim 10^{10}$  минимально искаженным Pb+Pb столкновениям при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  ТэВ, что может быть накоплено в первый год работы эксперимента в режиме столкновений тяжелых ионов ускорителя LHC-HL.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vlasnikov A.K., Zhrebchevskiy V.I., Lazareva T.V.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 614; *Vlasnikov A.K., Zhrebchevsky V.I., Lazareva T.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 469.
2. *Laermann E., Philipsen O.* // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2003. V. 53. P. 163.
3. *Иванищев Д.А., Котов Д.О., Малаев М.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 12. С. 1800; *Ivanishchev D.A., Kotov D.O., Malaev M.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 12. P. 1439.
4. *Adcox K., Adler S.S., Afanasiev S. et al.* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 184.
5. *Wang Z.M., Aggarwal M.M., Ahammed Z. et al.* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 102.
6. *Aamodt K., Abrahantes Quintana A., Achenbach R. et al.* // JINST. 2008. V. 3. Art. No. S08002.
7. *Abelev B., Adam J., Adamová D. et al.* // arXiv: 2211.02491. 2022.
8. *Жребчевский В.И., Вечернин В.В., Иголкин С.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 702; *Zhrebchevsky V.I., Vechernin V.V., Igolkin S.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 541.
9. *Malaev M.V., Riabov V.G.* // Particles. 2023. V. 6. No. 1. P. 364.
10. *Barnett R.M., Beringer J., Dahl O. et al.* // Progr. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. Art. No. 083C01.
11. *Sjostrand T., Mrenna S., Skands P.Z.* // Comput. Phys. Commun. 2008. V. 178. P. 852.

## Probing open charm production with ALICE-3 detector at high-luminosity Large Hadron Collider

M. V. Malaev<sup>1,2,\*</sup>, V. G. Riabov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute of the National Research Center “Kurchatov Institute”, Gatchina, 188300, Russia

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701, Russia

\* e-mail: malaev\_mv@pnpi.nrcki.ru

ALICE-3 is a future upgrade of the current ALICE experiment to be operated at high-luminosity Large Hadron Collider at CERN after 2030. One of the physics objectives of the experiment is to probe the hot and dense QCD matter produced in heavy-ion collisions via the measurement of open charm hadron production. The ALICE-3 detector is well equipped to measure production of ground and excited states of D-mesons in the decay channels with charged particles in the final state. In this presentation, we present results of feasibility studies for the measurement of open charm mesons in the decay channels with neutral photons or mesons by utilizing the large acceptance electromagnetic calorimeter.

*Keywords:* relativistic heavy-ion collisions; open charm; heavy flavor; particle reconstruction