

На правах рукописи

Харлов Юрий Витальевич

**Изучение образования нейтральных мезонов в
протон-протонных столкновениях в эксперименте
ALICE**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2018

УДК 539.1.07

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ (г. Протвино).

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат.наук М.В.Завертяев, Физический институт им. Лебедева РАН, г. Москва

доктор физ.-мат. наук В.С.Пантуев, Институт ядерных исследований РАН, г. Москва,

доктор физ.-мат. наук Л.Н.Смирнова, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва.

Ведущая организация – Объединенный институт ядерных исследований. Почтовый адрес: ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., Россия, 141980.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2018 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

http://www.ihep.su/pages/main/6582/Kharlov_details/

НИЦ "Курчатовский институт" — ИФВЭ .

Автореферат разослан “_____” _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 201.004.01

Ю. Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Описание сильных взаимодействий в рамках Квантовой Хромодинамики (КХД) обеспечивает качественное описание широкого спектра явлений в адронных столкновениях. При больших передачах импульса в рассеянии адронов количественное описание достигается в теории возмущения, и современное состояние теории позволяет достаточно точно вычислять матричные элементы в следующем за лидирующим порядком разложения пертурбативной КХД. Однако в вычислениях остаются неопределенности, связанные с выбором структурных функций сталкивающихся адронов, функций фрагментации партонов конечного состояния и масштаба КХД. Особенно чувствительны расчеты КХД к параметризации функций фрагментации, которые определяются в глобальной подгонке экспериментальных данных, полученных в различных экспериментах по измерению инклюзивных выходов идентифицированных адронов. Оказывается, что такой подход может обеспечить удовлетворительное количественное описание образования адронов в кинематической области, ограниченной данными экспериментов, включенными в подгонку, но обладает недостаточной предсказательной силой для вычисления дифференциальных выходов адронов далеко за пределами изученной обла-

сти. Поэтому измерение спектров идентифицированных адронов в столкновениях протонов и ионов в новом энергетическом диапазоне, предоставляемом Большим Адронным Коллайдером, является важной задачей для уточнения параметров пертурбативной КХД.

Изучение спектров легких нейтральных мезонов, распадающихся на фотоны, важно и для измерений процессов с малыми сечениями, таких как образования прямых фотонов и образования кварков тяжелых ароматов, для которых фотоны от распадов нейтральных мезонов представляют доминирующий источник фона. Поэтому прецизионное измерение дифференциальных сечений инклюзивного образования π^0 и η мезонов в протон-протонных столкновениях в широком диапазоне поперечных импульсов является важной задачей для моделирования фонов для редких процессов.

Измерение выходов адронов в pp столкновениях также является существенной частью экспериментальной программы по изучению свойства ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ядер при высоких энергиях. Экспериментальное исследование свойств горячей материи проводится на различных ускорителях с 1980-х гг., но наиболее активно эта область ядерной физики начала развиваться в связи с запуском программы по изучению столкновений тяжелых ионов на ускорителе SPS и коллайдере RHIC.

В рамках тяжело-ионной программы на ускорителе SPS в ЦЕРНе изучались столкновения ядер при энергии в системе центра масс вплоть до 17 ГэВ. Ряд экспериментов на SPS получили результаты, указывающие на создание новой формы материи в столкновении-

ях тяжелых ионов и зависимость её свойств от количества парных нуклон-нуклонных столкновений. Эксперименты по столкновениям ультрарелятивистских ядер были продолжены на коллайдере RHIC в БНЛ, где были достигнуты энергии в системе центра масс 200 ГэВ. Эти эксперименты подтвердили возникновение новой формы материи в таких столкновениях и начали систематическое исследование её свойств, давая таким образом необходимую экспериментальную информацию для изучения уравнения состояния КХД материи.

Свойства сильновзаимодействующей материи исследуются через ряд наблюдаемых величин, предсказываемых различными моделями. Такими наблюдаемыми, или сигнатурами ядерной материи, являются следующие величины:

- Соотношение выходов странных и нестранных адронов;
- Выходы очарованных адронов;
- Выходы состояний кваркония;
- Выходы адронов при больших поперечных импульсах в зависимости от кваркового состава адронов;
- Азимутальная анизотропия выходов адронов;
- Двух- и многочастичные корреляции адронов или фотонов;
- Выходы прямых фотонов, дилептонных пар, инклюзивных лептонов.

Жесткие процессы в столкновениях ядер при сверхвысоких энергиях рассматриваются как одна из наиболее важных сигнатур горячей КХД материи, характеризующей её начальное состояние. В

жестких процессах взаимодействия партонов начального состояния сталкивающихся ядер образующиеся партоны конечного состояния оказываются в плотной сильновзаимодействующей среде. Прежде чем фрагментировать в адроны, эти партоны испытывают множественные вторичные взаимодействия со средой, в результате которых они теряют свою энергию. Степень потери энергии определяется как плотностью цветовых зарядов в среде, так и её температурой. Потери энергии жёсткими партонами проявляются как в подавлении выходов струй, так и в подавлении выхода адронов с большими поперечными импульсами. Одним из первых ярких результатов, полученных на коллайдере RHIC, было обнаружение подавления струй путём измерения выхода жёстких нейтральных пионов в центральных Au-Au столкновениях. Это подавление было обнаружено также и в спектрах других адронов, что означает, что потери энергии происходят на уровне партонов, а не конечных адронов. С другой стороны, выход прямых фотонов, измеренный в AA столкновениях, свидетельствует о том, что число жестких процессов, происходящих на начальной стадии AA столкновения, не уменьшается, и подавление выхода жестких частиц происходит в конечном состоянии.

Большинство характеристик подавления выходов адронов, состоящих из легких кварков, таких как величина подавления, его зависимость от поперечного импульса, центральности, системы (Au-Au, Cu-Cu) и энергии столкновения, количественно описывается современными теоретическими моделями, включающими неабелевы потери энергии. Однако недавно обнаруженное подавление выходов D

и V мезонов в той же степени, что и адронов, состоящих из легких кварков, не может быть объяснено существующими моделями, которые однозначно предсказывают меньшие радиационные потери энергии для тяжелых кварков. Другая трудность, возникающая при описании подавления выхода жестких частиц, — это воспроизведение зависимости подавления от поперечного импульса. Для нейтральных пионов обнаруженное подавление постоянно при $p_T > 3$ ГэВ/с. Хотя различные модели могут объяснить это постоянство, его причины в каждой модели свои: поглощение энергии из среды, переход от некогерентного к когерентному излучению с увеличением энергии партона, зависящий от поперечного импульса, состав жестко рассеянных партонов и т.д. Эксперименты при энергиях БАК позволят существенно сузить круг возможных объяснений.

Первые данные по подавлению выходов различных адронов, полученные экспериментами на Большом Адронном Коллайдере, показывают, что качественно эффект подавления похож на то, что было наблюдаемо на RHIC. Количественное же сравнение показывает, что при энергиях БАК спектры адронов имеют более сильное подавление, что свидетельствует о большей плотности энергии КГП, достигаемой на БАК, приводящей, соответственно, к более высоким значениям потерь энергий партонов в среде. Однако, у этих данных точность еще недостаточна для выбора подходящих теоретических моделей, описывающих данный эффект. Подавление выходов адронов в центральных столкновениях не имеет однозначного объяснения, поэтому необходимо измерять спектры адронов в различных

системах сталкивающихся частиц. Столкновения протонов с протонами и протонов с ядрами свинца позволяет разделить процессы начального состояния от эффектов конечного состояния в описании модификации спектров.

Практическая ценность работы

Детальное описание характеристик электромагнитного калориметра PHOS представляет несомненный интерес для физиков-экспериментаторов. Действительно, в связи с разработкой новых кристаллических сцинтилляционных материалов, обладающих высокой плотностью (а следовательно, и малыми величинами радиационной длины и радиуса Мольера), стало возможным создание высокогранулярных компактных электромагнитных калориметров. Калориметры на основе новых сцинтиллирующих кристаллов вольфрамата свинца $PbWO_4$ нашли широкое применение в экспериментальных установках как коллайдерных экспериментов, так и в экспериментах с фиксированной мишенью. Самое большое число детектирующих каналов содержат электромагнитные калориметры экспериментов CMS и ALICE, установленные на коллайдере БАК в ЦЕРН.

Одной из физических задач, решаемой электромагнитным калориметром PHOS эксперимента ALICE, является измерение спектра нейтральных мезонов и прямых фотонов, испущенных в результате термализации кварк-глюонной плазмы. Поэтому PHOS был оптимизирован для регистрации частиц в области сравнительно низких энергий в диапазоне 1 – 10 ГэВ. В связи с относительно низким све-

товыходом PbWO_4 , рабочей температурой PHOS была выбрана температура $T = -25^\circ\text{C}$, что позволило в 3 раза увеличить световыход кристалла и существенно уменьшить уровень шумов лавинного фотодиода и связанного с ним предусилителя. Такие условия работы PHOS позволили получить разрешение по инвариантной массе двух фотонов из распада нейтрального мезона с энергией 2 ГэВ лучше $4.5 \text{ МэВ}/c^2$, что является лучшим результатом для электромагнитных калориметров на основе PbWO_4 .

Описываемые в диссертации такие подсистемы фотонного спектрометра PHOS, как триггер на события с фотонами высоких энергий и мониторинговая система, представляют несомненный практический интерес для экспериментальной физики, и, в частности, для дальнейших разработок и эксплуатации электромагнитных калориметров, поскольку предлагают технические решения по оперативной проверке и калибровке каналов амплитудного измерения детекторов и для эффективного использования высокой светимости, предоставляемой современными коллайдерами.

Методы реконструкции данных фотонного спектрометра PHOS эксперимента ALICE и методы измерения спектров легких нейтральных мезонов, распадающихся на два фотона, могут применяться в обработке данных электромагнитных калориметров различных экспериментов. Метод моментов электромагнитных ливней, описанный в диссертации и развивающий предыдущие аналогичные методы, является надежным инструментарием для идентификации частиц в электромагнитных калориметрах.

Также практический интерес представляют методы анализа данных, набранных в электромагнитном калориметре, для измерения спектров нейтральных мезонов. Методы определения и вычитания фона, калибровки детектора, вычисления эффективности и различных поправок как к реальным данным, так и к моделированию Монте Карло, оценки систематических погрешностей, являются универсальными и применимы в любых экспериментах в физике высоких энергий.

Цель диссертационной работы

Данная диссертация посвящена отдельным аспектам экспериментального изучения инклюзивного образования легких нейтральных мезонов, π^0 и η , в протон-протонных столкновениях. В эксперименте ALICE на БАК были измерены дифференциальные инвариантные сечения образования π^0 и η мезонов в pp столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 0.9, 7$ и 8 ТэВ в области центральных быстрот $y \approx 0$ и в широком диапазоне поперечных импульсов. Проведенные сравнения измерений с теоретическими расчетами пертурбативной КХД и Монте-Карло моделями позволили расширить понимание о точности и применимости вычислений КХД, стимулировали уточнение функций фрагментации партонов в пионы. Сделаны выводы о масштабных свойствах спектров нейтральных мезонов относительно поперечной массы образующихся частиц. В диссертации рассмотрен ряд методических вопросов, необходимых для изучения нейтральных мезонов в pp и Pb-Pb столкновениях — таких как методы реконструкции

данных электромагнитных калориметров, триггер на отбор событий с фотонами высоких энергий, конструкция электромагнитных калориметров на основе неорганических сцинтиллирующих кристаллов и органических пластиковых сцинтилляторов, система мониторинга калориметров. В диссертации также исследовано образование η мезона в столкновении поляризованных протонов и антипротонов с импульсом $p = 200$ ГэВ/с с неполяризованной протонной мишенью в области фрагментации поляризованного пучка. Измерения проведены в эксперименте E704 в Фермиевской лаборатории. Сравнение этих данных с теоретическими моделями дает знания о возможных механизмах односпиновых асимметрий в образовании адронов в поляризованных столкновениях.

Научная новизна

В диссертации приведены результаты измерения дифференциальных сечений образования π^0 и η мезонов в центральной области в протон-протонных столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 0.9, 7$ и 8 ТэВ и односпиновой асимметрии в образовании η мезона в области фрагментации поляризованных протонного и антипротонного пучков с импульсом 200 ГэВ/с. Такие измерения уникальны, а их точность превосходит неопределенности теоретических моделей, что позволяет уточнить параметры моделей. По результатам измерений спектров нейтральных мезонов, выполненных коллаборацией ALICE в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ, были обновлены параметризации функций фрагментации, что существенно повысило точность вычис-

лений КХД в высших порядках теории возмущений. Проведены исследования степени применимости расчетов КХД в высших порядках теории возмущений и моделирования спектров адронов в современных генераторах событий с различными настройками. На основании этих исследований сделан вывод, что на настоящее время наилучшее описание спектров нейтральных мезонов при $p_T > 2$ ГэВ/с в pp столкновениях в диапазоне \sqrt{s} от сотен ГэВ до 8 ТэВ обеспечивает пертурбативная КХД с высших порядках теории возмущений с использованием функций фрагментации DSS14, а модель PYTHIA 8.210 воспроизводит спектры нейтральных мезонов во всем диапазоне p_T с применением настройки Monash 2013. Показано также, что спиновые эффекты, в частности — односпиновые асимметрии сохраняются с ростом энергии и могут быть описаны в рамках расчетов пертурбативной КХД с учетом твист-3 эффектов.

Личный вклад автора

Автор диссертации был одним из основных разработчиков системы программного обеспечения по моделированию, реконструкции и анализу данных фотонного спектрометра PHOS и вето-детектора заряженных частиц CPV эксперимента ALICE на Большом Адронном Коллайдере. Эта работа была проведена в 2000–2007 гг совместно с коллегами из Курчатовского Института, Лаборатории Субатех (Нант, Франция) и Европейской организации ядерных исследований (Женева, Швейцария). С 2006 г. автор лично принимал участие и обслуживании и настройке аппаратуры детекторов PHOS и CPV, в

том числе триггера PHOS на события с фотонами высоких энергий и светодиодной мониторинговой системы PHOS. С 2014 г. автор является координатором детекторов PHOS и CPV по набору физических данных с протонными и ионными пучками БАК. Автор лично участвовал в калибровке детектора PHOS по данным, набранным фотонным спектрометром PHOS с протонными пучками, проводил первичный анализ данных для определения качества данных. При его участии был создан пакет он-лайн мониторингования данных, принимаемых детектором PHOS во время физических сеансов с пучками БАК. Автор участвовал в анализе данных, набранных в первом сеансе БАК 2010–2013 гг. с протон-протонными столкновениями при энергиях $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, 7$ и 8 ТэВ, был включен коллаборацией в состав основных авторов, готовящих результаты измерений для публикаций. В 1995–1997 гг. автор провел анализ данных эксперимента E704 в Фермиевской лаборатории им. Ферми (США) по измерению односпиновых асимметрий в образовании η мезонов в области фрагментации поляризованных протонных и антипротонных пучков с импульсом 200 ГэВ/с. В целом, автор внес вклад в исследования сильновзаимодействующей материи при высоких энергиях посредством измерений нейтральных мезонов при помощи электромагнитных калориметров.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в научных реферируемых журналах [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], представлены в сборниках трудов конференций [15], [16],

[17] и препринтах ЦЕРН [18], [19].

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Диссертация содержит 185 страниц, в том числе 65 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 176 ссылок.

Краткое содержание работы

Во введении описаны задачи экспериментальных исследований сильных взаимодействий в столкновениях протонов и тяжелых ионов. Перечислены основные наблюдаемые, характеризующие свойства сильновзаимодействующей материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов, и подчеркнута важность измерения этих же величин в столкновениях протонов. Показано, что измерения спектров идентифицированных адронов в протонных столкновениях при высоких энергиях необходимы для уточнения параметров КХД и, в частности, функций фрагментации протонов в легкие мезоны.

В первой главе представлены теоретические подходы к описанию спектров образования адронов в столкновениях протонов и тяжелых ионов. Удовлетворительное количественное описание спектров при высоких p_T обеспечивается пертурбативной квантовой хромодинамикой, но остается трудной задача обеспечить последовательное описание адронных спектров при всех энергиях столкновения, достижимых экспериментально.

В теоретических моделях образование частиц обычно делится на две категории: “мягкий” режим рассеяния, описывающий образование частиц с участием малых переданных импульсов, и режим “жесткого” рассеяния, ответственный за образование частиц с импульсами нескольких ГэВ/с и более. Теоретическое описание жестких процессов рассеяния факторизуется на функции распределения партонов (PDF), матричный элемент КХД на партонном уровне и функции фрагментации (FF). Структурные функции описывают распределение доли x продольного импульса протона, переносимого рассеянным партоном, а функции фрагментации являются функциями распределения отношения z наблюдаемого импульса адронов к импульсу партонов конечного состояния. Наиболее общие параметризации PDF и FF получены из глобальных фитов к экспериментальным данным при различных энергиях столкновения. Энергии, достигнутые на БАК [20], открывают области значений x и z , недоступные при более низких энергиях.

Большинство частиц с малыми поперечными импульсами p_T образуются в “мягких” процессах с малым Q^2 . В этом режиме вычисления пертурбативной КХД не применимы для описания механизмов образования, а феноменологические модели основаны на предыдущих измерениях спектров образования нейтральных мезонов или других легких мезонов экспериментами при более низких энергиях столкновения. Измерения образования частиц при поперечных импульсах до нескольких сотен МэВ/с особенно важны для дальнейшего ограничения таких моделей.

В столкновениях тяжелых ионов при энергиях БАК создается плотность энергии, достаточная для перехода адронной материи в состояние деконфайнмента кварков и глюонов при высокой температуре [21, 22]. Адроны при высоких p_T , образуются в АА-столкновениях в жестком рассеянии партонов как продукты струйной фрагментации, причем кварки и глюоны, проходя через сильновзаимодействующую материю, теряют свою энергию. Это явление приводит к модификации выходов адронов при высоких поперечных импульсах p_T [23, 24].

Во второй главе описана экспериментальная установка ALICE [25] на Большом Адронном Коллайдере. В первом разделе этой главы приводится перечисление наборов данных, набранных экспериментов ALICE в первом сеансе работы Большого Адронного Коллайдера (2009–2013 гг.). В течение этого периода экспериментом были получены данные с протон-протонными столкновениями при энергиях $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, 7$ и 8 ТэВ, столкновения ионов свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ и столкновения протонов с ионами свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ. В основу диссертации вошли данные, набранные в 2010 г в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 0.9$ и 7 ТэВ с триггером на минимальное взаимодействие, и данные в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, полученные в 2012 г. с триггером на фотоны высоких энергий в фотонном спектрометре PHOS.

Во втором разделе этой главы приведен краткий обзор назначения эксперимента и описаны его детекторы. Экспериментальная

установка ALICE представляет собой детектор общего назначения для регистрации событий в столкновениях тяжелых ионов БАК [25]. ALICE состоит из центральной части, которая измеряет адроны, электроны и фотоны, и переднего мюонного спектрометра. Центральная часть покрывает полярные углы от 45° до 135° и встроена в большой соленоидальный магнит с умеренной напряженностью поля $0.2 - 0.5$ Т, позволяющей реконструировать заряженные треки с очень малыми поперечными импульсами, от $p_T = 100 - 150$ МэВ/с. Мюонный детектор охватывает полярные углы от 2° до 9° и предназначен для регистрации частиц, распадающихся на мюоны при больших быстротах.

В третьем разделе второй главы более подробно описаны те детекторы ALICE, данные которых использовались непосредственно в измерениях, представленных в диссертации — электромагнитные калориметры. Экспериментальная установка ALICE оборудована двумя электромагнитными калориметрами. Фотонный спектрометр PHOS [26] — это электромагнитный калориметр с высокой разрешающей способностью как по энергии, так и по координате и по разделению близко лежащих электромагнитных ливней. Главной физической целью PHOS является изучение термальных и динамических свойств начальной фазы столкновения, полученное через регистрацию прямых фотонов при малых поперечных импульсах, а также изучение подавления струй посредством измерения спектров π^0 и других нейтральных мезонов при больших p_T . Второй электромагнитный калориметр, EMCAL [27] предназначен для детального изу-

чения физики подавления струй (взаимодействие энергичных партонов с плотной материей) в широком кинематическом диапазоне, доступном для столкновений тяжелых ионов на БАК. Основные параметры конструкции калориметра были выбраны в соответствии с физическими требованиями к изучению жестких процессов [28]. Особо детально описаны подсистемы фотонного спектрометра PHOS, в том числе его триггерной системы и светодиодной мониторинговой системы, в создание и эксплуатацию которых автор диссертации внес заметный вклад. Мониторная система [5] предназначена для проверки работоспособности каждого регистрирующего канала, для определения качества данных PHOS. В этом разделе описаны задачи мониторинговой системы, её конструкция, система управления и применение.

Четвертый раздел второй главы посвящен описанию центральной трековой системы ALICE, состоящей из внутренней трековой системы и времяпроекционной камеры. Основными задачами внутренней трековой системы [29, 30] (ITS) являются локализация первичной вершины с разрешением лучше чем 100 мкм для восстановления вторичных вершин из распадов гиперонов и D и B-мезонов, для реконструкции и идентификации частиц с импульсом ниже 200 МэВ/с. Детектор ITS состоит из шести концентрических слоев кремниевых детекторов, окружающих точку пересечения пучков на радиальной удалении от 3.9 до 43 см. Времяпроекционная камера [31] (TPC) предназначен для реконструкции заряженных треков в фазовом пространстве $|\eta| < 0.9$ при поперечных импульсах треков примерно от 0.1 до 100 ГэВ/с. Детектор TPC выполнен из большой цилиндриче-

ской электростатической камеры объемов 90 м^3 , заполненной газом, состоящим из $Ne/CO_2/N_2$ в пропорциях $90/10/5$, в которой первичные электроны дрейфуют в электростатическом поле на расстояние до 2.5 м по обе стороны от центрального электрода на торцевые пластины цилиндра. Для целей данной диссертации центральная трековая система применяется для реконструкции фотонов, конвертировавшихся в e^+e^- пары на веществе центральных детекторов ALICE.

В пятом разделе главы 2 описаны триггерные детекторы ALICE, которые использовались в измерениях нейтральных мезонов, описанных в диссертации. Измерение спектров π^0 и η при малых p_T требует отбора практически всех неупругих взаимодействий начальных частиц. Для измерения спектров в области высоких p_T , имеющих малое сечение, необходим триггер, прореживающий события и отбирающий те редкие события, которые содержат фотоны больших энергий в детекторе PHOS. Одним из основных триггеров ALICE является триггер на минимальное взаимодействие пучковых частиц, т.е. такой триггер, который отбирает события, наиболее приближенные к неупругим взаимодействиям начальных частиц. Триггер на минимальные взаимодействия обеспечивается в эксперименте ALICE детектором V0 [32], который сконструирован в виде двух сцинтилляционных годоскопов, называемых V0A и V0C, установленных по разные стороны от точки взаимодействия пучков и охватывающих диапазоны псевдобыстроты $2.8 < \eta < 5.1$ (V0A) и $-3.7 < \eta < -1.7$ (V0C). На практике для обеспечения триггеров требуются совпадение сигналов в обоих годоскопах ($MB_{AND} = V0A \& V0C$), а именно:

триггер минимального взаимодействия (МВ), триггер множественности (МТ), полуцентральный триггер (СТ1) и центральный триггер (СТ2). Для отбора дифракционных событий также применяется режим OR ($V0A \mid V0C$), который именуется MB_{OR} . Триггер на отбор событий, содержащих фотоны высоких энергий, реализован на основе фотонного спектрометра PHOS [9], триггерная система которого была введена в эксплуатацию в 2011 году и работала с приемлемой эффективностью 0.9 и чистотой 0.36 (порог 4.3 ГэВ) во время первого сеанса БАК. В разделе 2.5.2 диссертации приведены технические параметры триггера PHOS и описан алгоритм выработки триггера в событиях, в которых есть по крайней мере одна группа смежных ячеек PHOS размером 4×4 , суммарная энергия в которых выше конфигурируемого порога. Одной из наиболее важных характеристик триггера является его фактор подавления, т.е. способность отбирать нужные события и подавлять фоновые. В наборах данных, где активируются оба триггера — триггер PHOS и триггер минимального взаимодействия, подсчитывается количество событий, вызванных триггером минимального взаимодействия и триггером PHOS, и затем вычисляется их отношение. Это отношение и называется коэффициентом подавления триггера PHOS. Очевидно, что вероятность срабатывания триггера PHOS определяется сечением образования фотонов высоких энергий, а скорость триггера PHOS зависит от фактора подавления и от светимостью пучка. В наборе данных с pp столкновениями при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ была измерена зависимость фактора подавления триггера PHOS и скорость его сраба-

тывания от порога триггера при частоте взаимодействий пучковых протонов 50 кГц. В частности, при величине порога триггера PHOS, соответствующей энергии 2 ГэВ, фактор подавления оказался равен $3.5 \cdot 10^2$, а при пороге 4.3 ГэВ — $3.8 \cdot 10^3$. Помимо фактора подавления, триггер характеризуется также чистотой и эффективностью. Чистота триггера определяется как отношение числа реальных триггеров PHOS ко числу всех триггеров PHOS, где реальные триггеры PHOS являются триггерами, возбуждаемыми событиями с фотонами, энергия которых превышает порог. В наборах с порогом 2 ГэВ около 36% триггеров являются реальными, но при пороге 4.3 ГэВ это отношение уменьшается примерно до 17%. Эффективность триггера PHOS определяется как отношение количества событий, вызванных триггером PHOS, к числу всех событий с превышением пороговых значений фотонов. Эффективность триггера зависит от энергии фотонов: эффективность мала при энергии фотонов ниже порога триггера и достигает 95% для фотонов с энергией выше порога.

В третьей главе обсуждаются вопросы о прецизионных электромагнитных калориметрах. Наряду с современными калориметрами на основе неорганических сцинтилляторов рассматриваются калориметры сэмпингового типа. Описаны принципы конструирования электромагнитных калориметров на основеборок из перемежающихся слоев свинца и пластического сцинтиллятора со светосбором сцинтилляционного света при помощи спектросмещающих оптических волокон. Объяснены принципы, позволяющие достичь высокого

энергетического разрешения. В главе описана конструкция прототипа электромагнитного калориметра с тонким сэмплингом, его испытания на пучке электронов и измеренные характеристики. Модули этого прототипа состояли из 380 чередующихся пластин свинца толщиной 0.275 мм и пластического сцинтиллятора толщиной 1.5 мм. Сбор сцинтилляционного света осуществлялся 144-ю спектросмещающими волокнами, пронизывающими всю сборку пластин свинца и сцинтиллятора перпендикулярно. В результате испытаний прототипа, состоящего из 3×3 модулей, на пучке электронов с импульсом от 1 до 19 ГэВ/с, было измерено энергетическое разрешение, которое оказалось сравнимым с энергетическим разрешением электромагнитных калориметров из кристаллов PbWO_4 . Прототип также обладал достаточно хорошей поперечной однородностью и линейностью отклика на электроны. Следовательно, использование калориметров сэмплингового типа для прецизионных измерений фотонов является перспективной задачей в экспериментальной физике высоких энергий.

В четвертой главе дается систематическое описание методов моделирования и реконструкции данных фотонного спектрометра PHOS эксперимента ALICE [33]. На основе физических задач, выполняемых PHOS, представлены требования к детектору и описаны методы идентификации фотонов и нейтральных мезонов. Показаны основные характеристики PHOS, измеренные в тестовых измерениях на пучках электронов и приведены сравнения измерения с результа-

тами моделирования. В этой главе описаны методы восстановления энергии и координаты попадания фотонов в электромагнитный калориметр, даны базовые сведения о форме ливней, вызванных в калориметрах фотонами и электронами. Параметры электромагнитных ливней характеризуются ковариационной матрицей, элементы которой определяются вторыми моментами положения ячеек детектора, формирующих кластер, с логарифмически зависящими от энергии весами. Приводятся результаты моделирования фотонного спектрометра PHOS с энергетическим и координатным разрешением, которые находятся в согласии с экспериментальными измерениями на тестовом пучке электронов. Для калориметров конечных размеров реконструкция фотонов, падающих на поверхность детектора под углом, может приводить к смещенным оценкам координаты фотона, и в главе описаны методы коррекции этих смещенных оценок в зависимости от энергии и угла падения фотонов. Актуальной задачей для PHOS является разделение π^0 от одиночных фотонов при больших энергиях, когда фотоны от распада π^0 образуют перекрывающиеся ливни в калориметре, и в диссертации предлагаются методы идентификации кластеров при высоких энергиях по форме электромагнитного ливня.

В пятой главе приведены основные экспериментальные результаты ALICE, полученные по данным первого сеанса БАК 2010–2013 гг. [2]. Показаны результаты измерений в столкновениях протонов с протонами и в столкновениях тяжелых ионов при энергиях БАК. Срав-

нение новых данных, полученных на БАК, с результатами предшествующих коллайдеров более низких энергий позволяет сделать выводы об энергетической эволюции свойств кварк-глюонной материи с ростом энергии. На примере измерения экспериментом ALICE дифференциальных сечений образования адронов, состоящих из кварков легких ароматов — пионов, каонов и протонов, а также их относительных выходов показана важность изучения рождения идентифицированных адронов и зависимости их выходов от энергии столкновения.

В этой главе приводится обзор первых данных, набранных экспериментом ALICE в 2010 г. и дающих новое понимание свойств сильновзаимодействующей материи в области более высоких плотностей энергии. Наблюдаемые, характеризующие эту материю, могут быть классифицированы на несколько групп — так называемых сигнатур, описанных также в главе 1. Показана важность изучения эволюции всех наблюдаемых от центральности столкновений, которая определяется числом нуклонных пар, участвующих в акте взаимодействия сталкивающихся ядер. Изучая зависимость плотности заряженных частиц $dN/d\eta$ от энергии pp и Pb-Pb столкновений, эксперимент ALICE показывает степенной рост величины $dN/d\eta$ от \sqrt{s} , причем рост плотности заряженных частиц в центральных столкновениях ионов свинца значительно круче, чем аналогичная величина, измеренная в pp столкновениях. Измерение корреляций идентичных бозонов, образованных в Pb-Pb столкновениях в эксперименте ALICE, позволяет сделать вывод о двукратном увеличении

объема области однородности кварк-глюонной материи при увеличении энергии столкновения тяжелых ионов в 10 раз по сравнению с энергией RHIC. В этой главе диссертации также приведены первые результаты по измерению азимутальных анизотропий в образовании заряженных частиц, а сравнения азимутальных потоков в столкновениях тяжелых ионов при энергиях RHIC и БАК демонстрируют плавное увеличение потоков примерно на 30%, что подтверждает ожидание гидродинамических моделей.

Шестая глава описывает измерения спектров образования легких нейтральных мезонов — π^0 и η в протон-протонных столкновениях. Измерения спектров легких нейтральных мезонов, распадающихся на фотоны, таких как $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ и $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, оказывается удобным инструментом изучения механизмов образования адронов в столкновениях адронных пучков, как протонных, так и тяжело-ионных. Универсальность и удобство этих измерений объясняется легкостью регистрации нейтральных мезонов в электромагнитных калориметрах в очень широком кинематическом диапазоне, причем однозначное разделение сигнала и фона обеспечивается методом инвариантных масс пар фотонов. По сравнению с нейтральными мезонами, измерение спектров заряженных частиц требует гораздо более сложных детекторов — крупномасштабных магнитных спектрометров и дополнительных детекторов для идентификации заряженных частиц всеми известными экспериментальными методами. В этой главе представлены результаты измерений спектров нейтральных мезонов в

протон-протонных столкновениях при энергиях БАК $\sqrt{s} = 0.9, 7$ 8 ТэВ, опубликованные в работах [1, 3, 6, 19, 34], а также в столкновениях поляризованных протонных и антипротонных пучков с импульсом 200 ГэВ/с с протонной фиксированной мишенью [14].

Раздел 6.1 главы 6 подробно описывает методы и результаты измерений дифференциальных сечений инклюзивного образования π^0 и η мезонов в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 0.9$ и 7 ТэВ. При измерении дифференциальных сечений образования нейтральных пионов и η мезонов в pp столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 0.9$ и 7 ТэВ регистрация нейтральных мезонов в экспериментальной установке ALICE проводилась через их двухфотонные распады, причем фотоны регистрировались двумя независимыми группами детекторов — фотонным спектрометром PHOS [26] и трековой системой, состоящей из внутренней трековой системы ITS [29] и времяпроекционной камеры TPC [31]. Трековая система позволяет реконструировать фотоны, конвертировавшие в e^+e^- пары на веществе внутренних детекторов ALICE, посредством поиска противоположно заряженных электронных и позитронных треков, образованных в одной точке. Одновременное измерение нейтральных мезонов двумя совершенно различными методами с разными систематическими погрешностями и противоположной зависимостью импульсного разрешения от импульса частиц позволяет проверить самосогласованность конечного результата. Данные с протон-протонными столкновениями, используемые в измерениях, были набраны экспериментом ALICE в 2010 г. с триггером на взаимодействия MB_{OR} [35]. Этот триггер отбирал

события, соответствующие пересечению банчей БАК, и содержащие сигнал, по крайней мере, в одном из триггерных детекторов V0A, V0C или SPD. Данные, используемые для этих измерений, соответствуют интегральной светимости $\mathcal{L} = 0.14 \text{ нб}^{-1}$ при $\sqrt{s} = 0.9 \text{ ТэВ}$ и 5.7 нб^{-1} при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$. В диссертации подробно описаны отборы событий и фотонов в фотонном спектрометре PHOS и центральной трековой системе. Нейтральные пионы и η мезоны были реконструированы как избыток событий, видимый в качестве пика при массе этих мезонов над комбинаторным фоном в спектре двухфотонных инвариантных масс. Особое внимание уделено согласованности данных, набранных экспериментом, и моделированных данных, используемых для вычисления эффективности реконструкции. Проведена оценка систематических погрешностей измерений π^0 и η мезонов. Основными источниками этих погрешностей являются погрешности вычисления числа реконструированных мезонов. Погрешности, присущие анализу данных PHOS, включают в себя неопределенности в определении энергетической нелинейности отклика PHOS, относительной калибровки каналов амплитудного измерения. Оба метода, PHOS и РСМ, обладают погрешностью, связанной с неточностью количества вещества, на котором фотоны конвертируют в электрон-позитронные пары. Если для метода РСМ эта конверсия является единственным методом реконструкции фотонов, то для PHOS, наоборот, конверсия фотонов приводит к потере фотонов и уменьшению числа зарегистрированных нейтральных мезонов. Дополнительными погрешностями метода фотонной конверсии являются также

погрешности в идентификации электронных треков и в отборе вторичных вершин e^+e^- пар.

Измеренное дифференциальное сечение образования нейтральных мезонов было получено объединением спектров, полученных независимо каждым методом — реконструкцией PHOS и фотонной конверсии (рис. 1). Полученные сечения образования π^0 и η мезонов

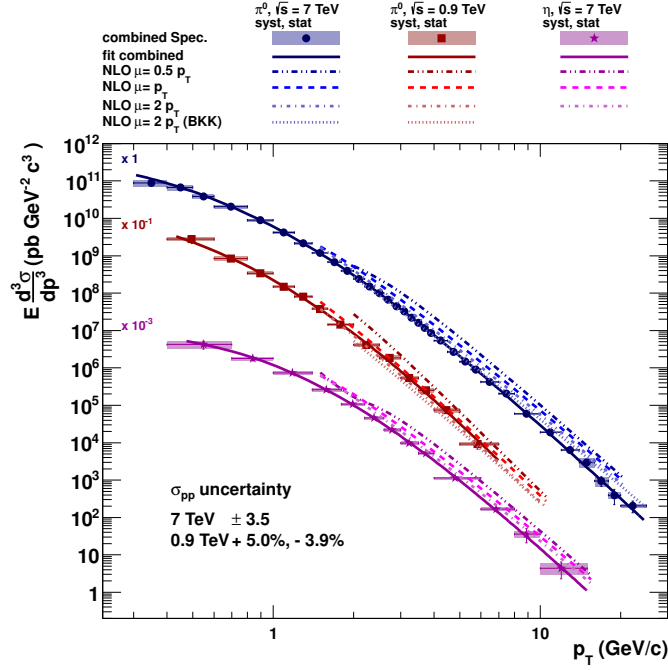


Рис. 1: Дифференциальные инвариантные сечения образования π^0 мезона в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 0.9$ и 7 ТэВ и η мезона в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в сравнении с расчетами пертурбативной КХД в высших порядках с использованием набора структурных функций CTEQ6M5 и функций фрагментации DSS (AESS для η) для трех значений масштаба КХД $\mu = 0.5p_T$, $\mu = p_T$ и $\mu = 2p_T$.

были профитированы функцией Цаллиса [36], а также проведено сравнение с вычислениями пертурбативной КХД в высших порядках теории возмущений с применением набора структурных функций СТЕQ6М5 и структурных функций DSS [37], ВКК [38] для π^0 мезона и AESSS для η мезона [39], что показано на рис. 2. В расчетах

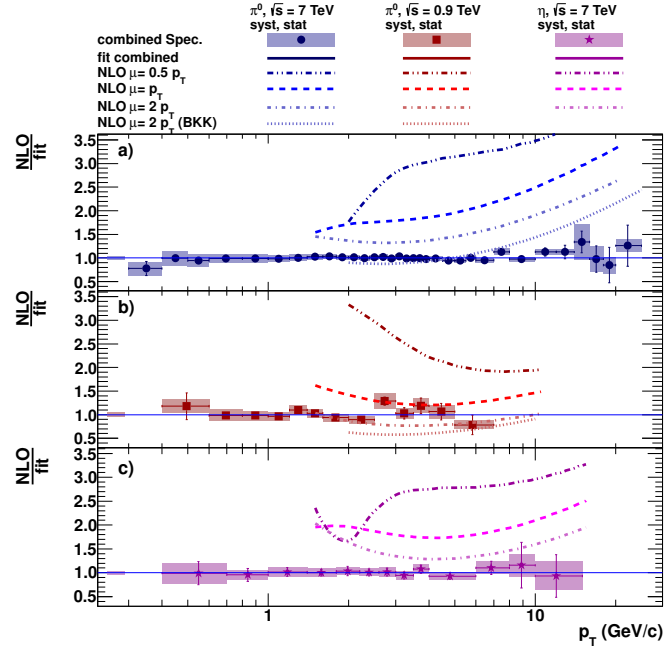


Рис. 2: Отношение спектров, вычисленных в рамках пертурбативной КХД, к измеренным дифференциальным сечениям образования π^0 мезона в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ и 0.9 ТэВ (b) и η мезона при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ (c).

КХД масштабы факторизации, перенормировки и фрагментации были выбраны одинаковыми и равными одному и тому же значению μ .

Расчеты КХД при $\sqrt{s} = 0.9$ ТэВ при масштабе $\mu = 1 p_T$ описывают измеренные спектры достаточно хорошо, тогда как при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ бóльшие значения масштаба $\mu = 2 p_T$ и другие наборы функций фрагментации требуются для описания экспериментальных результатов. Тем не менее, наилучшие для $\sqrt{s} = 7$ ТэВ параметры КХД не дают хорошего описания измерений при энергии столкновений $\sqrt{s} = 0.9$ ТэВ. В любом случае, вычисления КХД предсказывают более жесткие спектры, чем было измерено в эксперименте.

В разделе 6.2 главы 6 описаны измерения дифференциальных сечений инклюзивного образования π^0 и η мезонов в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ по данным, записанным экспериментом ALICE в 2012 г [19]. В дополнение к двум методам измерения спектров нейтральных мезонов, используемых в анализе данных pp столкновений при $\sqrt{s} = 0.9$ и 7 ТэВ, — PHOS и РСМ, данные 2012 г. анализировались еще двумя новыми методами, один из которых был основан на регистрации обоих фотонов от распадов мезонов в электромагнитном калориметре EMCal, а второй являлся так называемым гибридным методом, в котором один фотон регистрировался в EMCal, а второй фотон восстанавливался центральной трековой системой по конверсии фотона на веществе детекторов ALICE. Данные были набраны с триггерами минимального взаимодействия MBAND и с триггерами на события с фотонами высоких энергий в PHOS и EMCal. Алгоритм триггера EMCal L0 аналогичен триггеру PHOS, описанному в разделе 2.5.2 диссертации. В EMCal был также реализован триггер уровня L1. Факторы подавления триггеров PHOS и EMCAL

по отношению к триггеру минимального взаимодействия были равны соответственно $RF_{\text{PHOS}} = (12.4 \pm 1.5) \times 10^3$ и $RF_{\text{EMC}} = (14.9 \pm 0.3) \times 10^3$. Набранная статистика с pp столкновениями при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ эквивалентна интегральной светимости $\mathcal{L}_{\text{int}} = 135.6$ нб $^{-1}$ в PHOS, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 615$ нб $^{-1}$ в EMCal и $\mathcal{L}_{\text{int}} = 2.17$ нб $^{-1}$ в фотонной конверсии. В диссертации подробно описаны методы определения эффективности, нормировки спектров, измеренных с различными триггерами, оценки систематических погрешностей. Комбинированные инвариантные сечения инклюзивного рождения π^0 и η -мезонов в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, измеренные четырьмя независимыми методами, охватывают области поперечного импульса $0.3 < p_{\text{T}} < 35$ ГэВ/ c и $0.5 < p_{\text{T}} < 35$ ГэВ/ c соответственно и приведены на рис. 3. На этом рисунке также приведены сравнения измерений с вычислениями пертурбативной КХД в высших порядках теории возмущений с использованием обновленных функций фрагментации, учитывающих результаты ALICE в pp при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. Приведены также сравнения измерений спектров π^0 и η в pp столкновениях при энергии 8 ТэВ с расчетами генератора событий PYTHIA 8.2 с различными настройками, сделаны выводы о применимости и ограничениях генератора PYTHIA 8.2 к описанию данных БАК.

Важным результатом измерения спектров π^0 и η мезонов в pp столкновениях при энергиях 7 и 8 ТэВ является универсальность отношения π^0/η , зависимость которого от p_{T} практически не зависит от энергии столкновения и типа сталкивающихся частиц, а также проявление нарушения m_{T} -скейлинга в отношении π^0/η при $p_{\text{T}} <$

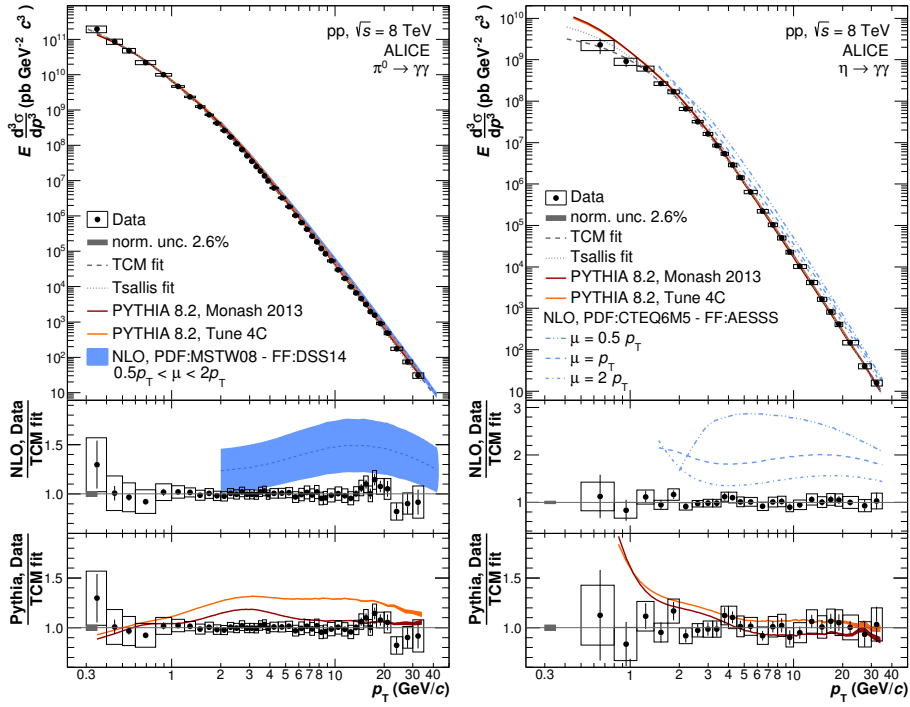


Рис. 3: Инвариантные сечения образования нейтральных мезонов показаны вместе с предсказаниями NLO pQCD с использованием наборов PDF MSTW08 (СТЕQ6М5) с FF DSS14 (AESSS) для π^0 (η), а также расчетов PYTHIA8.210 для двух настроек.

3.5 ГэВ/с (рис. 4).

В разделе 6.3 главы 6 приведены результаты измерений односпиновой асимметрии η мезонов в столкновении поляризованных протонов и антипротонов с импульсом 200 ГэВ/с с неполяризованной протонной мишенью в эксперименте E704 в лаборатории им. Ферми. Регистрация η мезона осуществлялась в электромагнитном ка-

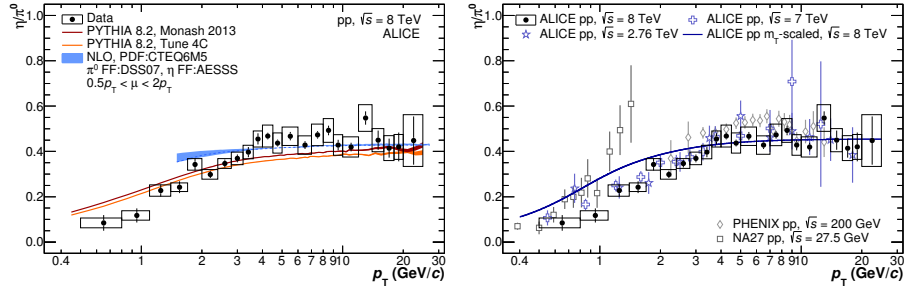


Рис. 4: Слева: отношение η/π^0 в сравнении с предсказаниями NLO pQCD с использованием PDF CTEQ6M5 и FFs DSS07 для π^0 и AESSS для η , а также с расчетами PYTHIA 8.2.10 с настройками Tune 4C и Monash 2013. Справа: сравнение отношения η/π^0 с предыдущими измерениями ALICE и других экспериментов вместе с отношением η/π^0 в предположении m_T скейлинга.

лориметре, а методы реконструкции были аналогичны тем, что применялись в эксперименте ALICE. Односпиновая асимметрия определялась как относительная разница сечений образования η мезона при противоположных значениях поперечной поляризации протонного или антипротонного пучка. Особое внимание в этом разделе уделено оценке систематической погрешности, связанной с поляризацией пучка, неопределенность в которой может приводить к ложной асимметрии. На рис. 5 приведены результаты измерений асимметрии образования η мезона в кинематической области $0.2 < x_F < 0.7$ и $0.7 < p_T < 2.0$ ГэВ/с. В обсуждении результатов эксперимента E704 приводится сравнение с более поздними измерениями односпиновой асимметрии образования η мезона, выполненных в поперечно поляризованных столкновениях протонов при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ

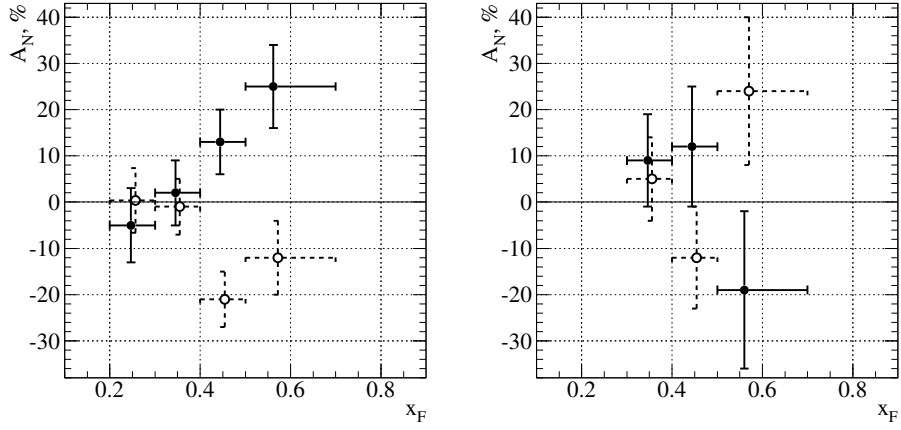


Рис. 5: Истинная (сплошная линия) и ложная (пунктирная линия) асимметрии в образовании η -мезона в столкновениях $p \uparrow p$ (слева) и $\bar{p} \uparrow p$ (справа) в зависимости от x_F при $0.7 < p_T < 2.0$ ГэВ/с.

в экспериментах STAR [40] и PHENIX [41], показано, что поведение асимметрии сохраняется при увеличении энергии столкновения почти в 10 раз. Экспериментальные результаты экспериментов E704, как и STAR и PHENIX, могут быть интерпретированы в Берлинской релятивистской кварковой модели, а также воспроизведены в расчетах пертурбативной КХД с рамках трех-партоновых корреляций, описываемых в твист-3 фрагментации.

В **Заключениях** представлены основные результаты диссертации:

1. Разработана программа физических измерений с фотонным спектрометром PHOS эксперимента ALICE на Большом Адронном Коллайдере;
2. Разработана программа управления светодиодной мониторинговой системой PHOS, а также разработаны и реализованы методы определения качества данных и калибровки спектрометра PHOS при помощи этой системы;
3. Введен в эксплуатацию триггер PHOS на события с фотонами высоких энергий. По данным, набранным детектором PHOS с pp столкновениями, определены основные параметры триггера, такие как фактор подавления, эффективность и чистота. С применением триггера PHOS существенно увеличена интегральная светимость, набранная PHOS в первом сеансе БАК с pp столкновениями при энергии 8 ТэВ;
4. Разработан пакет программ для моделирования и реконструкции данных фотонного спектрометра PHOS эксперимента ALICE, а также методы идентификации нейтральных мезонов в PHOS при высоких энергиях;
5. Впервые измерены инвариантные дифференциальные сечения образования π^0 и η мезонов в протон-протонных столкновениях при энергиях 0.9, 7 и 8 ТэВ. Сравнения измерений с вычислениями пертурбативной КХД в высших порядках теории

возмущений с применением структурных функций протона и функций фрагментаций, полученных по данным экспериментов на предыдущих коллайдерах, показали, что КХД не описывает данные БАК без существенных изменений параметров модели.

6. Показано, что уточнение функций фрагментации с использованием глобального фитирования спектров, измеренных при всех доступных энергиях, включая энергии БАК, позволили улучшить описание экспериментальных данных ALICE. Сравнение измерений спектров нейтральных мезонов при энергиях БАК с расчетами модели PYTHIA8 с различными настройками показали, что наилучшее описание данных моделью PYTHIA8 достигается с применением настройки Monash-2013.
7. Впервые измерены односпиновые асимметрии в образовании η мезона в столкновении поляризованных протонных и антипротонных пучков с импульсом 200 ГэВ/с с неполяризованной протонной мишенью. Полученные результаты сравнены с измерениями, выполненными позже на коллайдере RHIC при более высоких энергиях, а также с различными теоретическими моделями. Сделаны выводы о сохранении спиновых эффектов с ростом энергии и о возможном вкладе трехглюонной корреляции в односпиновые асимметрии.

Список литературы

- [1] **ALICE** Collaboration, B. Abelev *et al.*, “Neutral pion and η meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV and $\sqrt{s} = 7$ TeV,” *Phys. Lett.* **B717** (2012) 162–172, [arXiv:1205.5724 \[hep-ex\]](#).
- [2] **ALICE** Collaboration, Yu. V. Kharlov, “Physics with the ALICE experiment,” [arXiv:1203.1984 \[nucl-ex\]](#). [Phys. Atom. Nucl.76,1497(2013)].
- [3] **ALICE** Collaboration, Y. Kharlov, “Neutral meson production in pp and Pb-Pb collisions at LHC,” *Nucl. Phys.* **A910-911** (2013) 335–338, [arXiv:1208.4712 \[nucl-ex\]](#).
- [4] **ALICE** Collaboration, D.-C. Zhou *et al.*, “High pt and photon physics with ALICE at LHC,” *Chin. Phys.* **C34 no. 9**, (2010) 1383–1386.
- [5] M. Yu. Bogolyubsky, D. I. Patalakha, V. S. Petrov, B. V. Polishchuk, A. S. Solovev, S. A. Sadovsky, V. A. Senko, and Yu. V. Kharlov, “A light-emitting diode monitoring system of the PHOS photon spectrometer in the ALICE experiment on the Large Hadron Collider,” *Instrum. Exp. Tech.* **55** (2012) 11–21. [Prib. Tekh. Eksp.2012,no.1,16(2012)].
- [6] **ALICE** Collaboration, Y. Kharlov, “Inclusive production of π^0 in pp collisions at 0.9 and 7 TeV and perspectives for heavy-ion

- measurements with the ALICE calorimeters,” *Nucl. Phys.* **A862-863** (2011) 449–452, [arXiv:1102.1840 \[hep-ex\]](#).
- [7] A. Aleksandrov, J. Alme, V. Basmanov, B. Batyunya, B. D, *et al.*, “Solving a Deconvolution Problem in Photon Spectrometry,” *Nucl. Instrum. Meth.* **A620** (2010) 526 – 533.
- [8] **ALICE** Collaboration, D. C. Zhou *et al.*, “Potential physics measurement with ALICE electromagnetic calorimeters,” *Nucl. Phys.* **A834** (2010) 291C–294C.
- [9] **ALICE PHOS** Collaboration, C. Zhao, L. Liu, K. Røed, D. Rohrlich, Y. Kharlov, L. Bratrud, J. Alme, and T. B. Skaali, “Performance of the ALICE PHOS trigger and improvements for RUN 2,” *JINST* **8** (2013) C12028.
- [10] G. Conesa, H. Delagrange, J. Diaz, Y. V. Kharlov, and Y. Schutz, “Identification of photon-tagged jets in the ALICE experiment,” *Nucl. Instrum. Meth.* **A585** (2008) 28–39, [arXiv:0711.2431 \[physics.data-an\]](#).
- [11] G. Conesa, M. Ippolitov, Yu. Kharlov, V. Manko, D. Peresunko, S. Sadovsky, and Y. Schutz, “Direct photon detection in Pb Pb collisions in the ALICE experiment at LHC,” *Nucl. Phys.* **A782** (2007) 356–361.
- [12] G. Conesa, H. Delagrange, J. Diaz, Y. V. Kharlov, and Y. Schutz, “Prompt photon identification in the ALICE experiment: The

- isolation cut method,” *Nucl. Instrum. Meth.* **A580** (2007) 1446–1459.
- [13] G. Conesa, H. Delagrange, J. Diaz, M. Ippolitov, Yu. V. Kharlov, D. Peresunko, and Y. Schutz, “Performance of the ALICE photon spectrometer PHOS,” *Nucl. Instrum. Meth.* **A537** (2005) 363–367.
- [14] **Fermilab E704** Collaboration, D. L. Adams *et al.*, “Measurement of single spin asymmetry in eta meson production in $p\uparrow p$ and $\bar{p}\uparrow p$ interactions in the beam fragmentation region at 200 GeV/c,” *Nucl. Phys.* **B510** (1998) 3–11.
- [15] Y. Kharlov, “Light neutral mesons in ALICE,” *PoS High-pT physics09* (2009) 014. <https://pos.sissa.it/080/014/>.
- [16] **ALICE** Collaboration, Y. Kharlov, L. Benhabib, and R. Wan, “Physics with photons in ALICE,” *PoS 2008LHC* (2008) 089. <https://pos.sissa.it/055/089/>.
- [17] **ALICE** Collaboration, Y. Kharlov, “Recent results from ALICE,” *PoS IHEP-LHC-2011* (2011) 013, [arXiv:1203.2420 \[nucl-ex\]](https://arxiv.org/abs/1203.2420). <https://pos.sissa.it/168/013/>.
- [18] F. Arleo *et al.*, “Hard probes in heavy-ion collisions at the LHC: Photon physics in heavy ion collisions at the LHC,” CERN yellow report CERN-2004-009-D, [arXiv:hep-ph/0311131 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0311131).
- [19] S. Acharya *et al.*, “ π^0 and η meson production in proton-proton

collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV,” CERN preprint CERN-EP-2017-216,
[arXiv:1708.08745 \[hep-ex\]](#).

- [20] L. Evans and P. Bryant, “LHC Machine,” *JINST* **3** (2008) S08001.
- [21] **CMS Collaboration** Collaboration, S. Chatrchyan *et al.*,
“Measurement of the pseudorapidity and centrality dependence of
the transverse energy density in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$
TeV,” *Phys.Rev.Lett.* **109** (2012) 152303, [arXiv:1205.2488](#)
[\[nucl-ex\]](#).
- [22] **ALICE** Collaboration, A. Toia, “Bulk Properties of Pb-Pb
collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV measured by ALICE,” *J. Phys.*
G38 (2011) 124007, [arXiv:1107.1973 \[nucl-ex\]](#).
- [23] J. D. Bjorken, “Energy Loss of Energetic Partons in Quark -
Gluon Plasma: Possible Extinction of High $p(t)$ Jets in Hadron -
Hadron Collisions,” Preprint FERMILAB-PUB-82-059-THY,
FERMILAB-PUB-82-059-T.
- [24] X.-N. Wang and M. Gyulassy, “Gluon shadowing and jet
quenching in A+A collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV,” *Phys.Rev.Lett.* **68**
(1992) 1480–1483.
- [25] **ALICE** Collaboration, K. Aamodt *et al.*, “The ALICE experiment
at the CERN LHC,” *JINST* **3** (2008) S08002.
- [26] **ALICE** Collaboration, G. Dellacasa *et al.*, “ALICE technical

design report of the photon spectrometer (PHOS),”
CERN-LHCC-99-04. <http://cds.cern.ch/record/381432>.

- [27] **ALICE** Collaboration, T. Cormier *et al.*, “ALICE electromagnetic calorimeter : addendum to the ALICE technical proposal,” CERN-LHCC-2006-014 ; CERN-LHCC-96-32-ADD-3.
<http://cds.cern.ch/record/932676>.
- [28] **ALICE EMCAL** Collaboration, U. Abeysekara *et al.*, “ALICE EMCAL Physics Performance Report,” [arXiv:1008.0413](https://arxiv.org/abs/1008.0413) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/abs/1008.0413)].
- [29] **ALICE** Collaboration, K. Aamodt *et al.*, “Alignment of the ALICE Inner Tracking System with cosmic-ray tracks,” *JINST* **5** (2010) P03003, [arXiv:1001.0502](https://arxiv.org/abs/1001.0502) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/abs/1001.0502)].
- [30] **ALICE** Collaboration, B. B. Abelev *et al.*, “Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC,” *Int. J. Mod. Phys. A* **29** (2014) 1430044, [arXiv:1402.4476](https://arxiv.org/abs/1402.4476) [[nucl-ex](https://arxiv.org/abs/1402.4476)].
- [31] J. Alme *et al.*, “The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events,” *Nucl. Instrum. Meth. A* **622** (2010) 316–367, [arXiv:1001.1950](https://arxiv.org/abs/1001.1950) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/abs/1001.1950)].
- [32] **ALICE** Collaboration, P. Cortese *et al.*, “ALICE technical design report on forward detectors: FMD, T0 and V0,” CERN-LHCC-2004-025.

- [33] **ALICE** Collaboration, P. Cortese *et al.*, “ALICE: Physics performance report, volume II,” *J. Phys.* **G32** (2006) 1295–2040.
- [34] **ALICE** Collaboration, B. B. Abelev *et al.*, “Neutral pion production at midrapidity in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s}= 2.76$ TeV,” *Eur. Phys. J.* **C74** (2014) 3108, [arXiv:1405.3794 \[nucl-ex\]](#).
- [35] **ALICE** Collaboration, K. Aamodt *et al.*, “Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ALICE at LHC,” *Eur. Phys. J.* **C68** (2010) 345–354, [arXiv:1004.3514 \[hep-ex\]](#).
- [36] C. Tsallis, “Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics,” *J. Statist. Phys.* **52** (1988) 479–487.
- [37] D. de Florian, R. Sassot, and M. Stratmann, “Global analysis of fragmentation functions for pions and kaons and their uncertainties,” *Phys. Rev.* **D75** (2007) 114010, [arXiv:hep-ph/0703242 \[hep-ph\]](#).
- [38] J. Binnewies, B. A. Kniehl, and G. Kramer, “Next-to-leading order fragmentation functions for pions and kaons,” *Z. Phys.* **C65** (1995) 471–480, [arXiv:hep-ph/9407347 \[hep-ph\]](#).
- [39] C. A. Aidala, F. Ellinghaus, R. Sassot, J. P. Seele, and M. Stratmann, “Global Analysis of Fragmentation Functions for Eta Mesons,” *Phys. Rev.* **D83** (2011) 034002, [arXiv:1009.6145 \[hep-ph\]](#).

- [40] **STAR** Collaboration, L. Adamczyk *et al.*, “Transverse Single-Spin Asymmetry and Cross-Section for π^0 and η Mesons at Large Feynman- x in Polarized $p + p$ Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV,” *Phys. Rev. D* **D86** (2012) 051101, [arXiv:1205.6826 \[nucl-ex\]](#).
- [41] **PHENIX** Collaboration, A. Adare *et al.*, “Cross section and transverse single-spin asymmetry of η mesons in $p^\uparrow + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV at forward rapidity,” *Phys. Rev. D* **D90** no. 7, (2014) 072008, [arXiv:1406.3541 \[hep-ex\]](#).

Рукопись поступила 26 января 2018 года.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Ю. В. Харлов.

Изучение образования нейтральных мезонов в протон-протонных столкновениях в эксперименте ALICE.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 26.01.2018. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 3,02. Уч.-изд.л. 2,81. Тираж 100. Заказ 11. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1
<http://www.ihep.ru>;
библиотека: <http://web.ihep.su/library/home-w.htm>

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
НИИ "Курчатовский институт" — ИФВЭ, 2018
