

На правах рукописи

Маевский Артём Сергеевич

**Прецизионные измерения характеристик
 $B_{(s)}$ -мезонов и их распадов в эксперименте
ATLAS**

Специальность 01.04.23 —
«физика высоких энергий»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Смирнова Лидия Николаевна**
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **Пахлова Галина Владимировна**,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория тяжелых кварков и лептонов
ФИАН, ведущий научный сотрудник

Егорычев Виктор Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
директор ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

Защита состоится _____ 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.77 на базе Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 («19 корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ и на веб-сайте <http://sinp.msu.ru/ru/dissertation/25350>.

Автореферат разослан _____ 201_ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 501.001.77,
доктор физико-математических
наук, профессор

С. И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

За последние десятилетия физика частиц пережила бурный период развития. В 60-е годы XX века Стивеном Вайнбергом, Шелдоном Глэшоу и Абдусом Саламом была сформулирована теория электрослабых взаимодействий, позже подтвержденная открытием нейтральных слабых токов в 1973 г. и векторных калибровочных бозонов в 1983 г. Вместе с зародившейся примерно в то же время теорией сильных взаимодействий — квантовой хромодинамикой — электрослабая теория легла в основу стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц. С тех пор предсказания СМ неоднократно и с невероятной точностью подтверждались в различных экспериментах, были открыты три поколения лептонов и кварков, а в 2012 г. — бозон Хиггса, завершающий таблицу фундаментальных частиц, предсказываемых теорией.

Однако наряду с впечатляющими успехами СМ в физике элементарных частиц остается немало нерешенных вопросов: проблемы темной материи и темной энергии, наличие масс у нейтрино, проблема иерархии и др. Получить ответы на некоторые из данных вопросов планируется при проведении прецизионных измерений характеристик процессов СМ, в частности, процессов с участием содержащих b -кварк адронов (b -адронов). Важное значение среди этих исследований имеют измерения вероятностей редких распадов, эффектов CP-нарушения, масс и времен жизни адронов. Наблюдение отклонений от предсказаний СМ в этих процессах будет свидетельствовать о проявлениях новой физики (физики за пределами СМ).

Эксперимент ATLAS является крупнейшим экспериментом на Большом адронном коллайдере (БАК). Наряду с экспериментом CMS он предназначен для решения широкого спектра задач: проверки СМ, обнаружения и измерения характеристик бозона Хиггса, поиска суперсимметричных партнеров частиц СМ и других проявлений новой физики. Уникальные характеристики установки — высокие массовое и координатное разрешения трекера и эффективность мюонной системы — позволяют осуществлять прецизионные измерения масс и параметров CP-нарушения в распадах B -мезонов. Эксперименты на БАК ведутся при энергии и светимости pp -соударений, недостижимых на данный момент на других ускорителях. Это обеспечивает высокую

статистику и возможность прецизионных измерений параметров b -адронов и свойств их распадов.

Новые явления, выходящие за рамки предсказаний СМ, могут влиять на величину СР-нарушения в распадах b -адронов. Ожидается, что одним из чувствительных к проявлениям новой физики каналов является распад $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$. Нарушение СР-симметрии в данном канале проявляется за счет интерференции между прямыми распадами и распадами со смешиванием B_s^0 и \bar{B}_s^0 -мезонов ($B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -смешиванием). Параметр ϕ_s , характеризующий величину СР-нарушения в данном канале, определяется как разница слабых фаз между амплитудой $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -смешивания и амплитудой распада b -кварка ($b \rightarrow c\bar{c}s$). В рамках СМ значение фазы ϕ_s мало, оно может быть связано с элементами матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы с помощью соотношения $\phi_s \simeq -2\beta_s$, где $\beta_s = \arg[-(V_{ts}V_{tb}^*) / (V_{cs}V_{cb}^*)]$. В предположении отсутствия проявлений новой физики, влияющих на смешивание и распады B_s^0 -мезонов, значение величины $-2\beta_s = -0.0376_{-0.0007}^{+0.0008}$ рад оценено путем объединения результатов измерений других наблюдаемых из области физики b -адронов и физики каонов [1]. Смешивание B_s^0 и \bar{B}_s^0 -мезонов характеризуется также параметром $\Delta\Gamma_s$ — разницей ширин легкого (B_L) и тяжелого (B_H) массовых состояний системы $B_s^0 - \bar{B}_s^0$. В рамках СМ значение этого параметра равно $\Delta\Gamma_s = 0.088 \pm 0.020$ пс⁻¹ [2]. Ожидается, что значение $\Delta\Gamma_s$ менее чувствительно к возможным проявлениям новой физики, чем ϕ_s . Тем не менее, измерение значения разницы ширин $\Delta\Gamma_s$ представляет интерес с точки зрения проверки теоретических предсказаний.

Цели и задачи исследования

Основной целью работы является измерение характеристик распадов $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ и определение на их основе значений слабой фазы ϕ_s , характеризующей величину СР-нарушения в этих распадах, и разницы ширин легкого и тяжелого массовых состояний B_s^0 -мезона $\Delta\Gamma_s$ на полном наборе данных первого сеанса работы БАК (сеанса Run-1) при энергиях pp -соударений в системе центра масс 7 и 8 ТэВ.

Для измерений характеристик b -адронов важна стабильная работа трековой системы внутреннего детектора, наиболее близко расположенного

к пучку. По этой причине ряд методических задач диссертации связан с поддержанием стабильной работы этой подсистемы установки ATLAS.

Внутренний детектор обеспечивает измерение поперечных импульсов и координат вершин рождения и распада частиц. Одной из основных подсистем внутреннего детектора является трековый детектор переходного излучения (ТДПИ, TRT). Вместе с кремниевыми пиксельным и микростриповым детекторами он осуществляет измерение координат, используемых для реконструкции треков и вершин рождения и распада частиц. Кроме того, он позволяет идентифицировать частицы, выделяя электроны среди адронов и мюонов с помощью переходного излучения. Основным чувствительным элементом детектора TRT являются пропорциональные дрейфовые трубки, выбор активной газовой смеси которых определяется способностью этой газовой смеси эффективно регистрировать фотоны переходного излучения. Наряду со стандартной активной газовой смесью на основе ксенона во втором сеансе работы БАК (сеансе Run-2) при эксплуатации детектора TRT возникла необходимость использовать альтернативные газовые смеси на основе аргона и криптона. Основной методической задачей работы является усовершенствование математической модели детектора TRT и модификация стандартных пакетов программного обеспечения (ПО) эксперимента ATLAS. Цель данных модификаций состоит в реализации возможности проведения полного математического моделирования детектора методом Монте-Карло при заполнении отдельных его модулей новыми газовыми смесями. В методическую задачу также входит определение калибровочных констант для регистрации переходного излучения при помощи газовой смеси на основе аргона по данным соударений протонов с ионами свинца, набранным в начале 2013 г. Выполнение данной работы было необходимо для обеспечения устойчивого функционирования детектора TRT в сеансе Run-2.

В сеансе Run-2 работы БАК энергия протонов в системе центра масс была увеличена с 8 до 13 ТэВ. Бóльшая по сравнению с сеансом Run-1 энергия и возросшая светимость привели к повышенной загрузке различных подсистем детектора. Значительной модификацией в сеансе Run-2 было введение во внутренний детектор ATLAS дополнительного слоя пиксельных детекторов. В связи с этим еще одной важной методической задачей является проверка качества работы внутреннего детектора в сеансе Run-2 с помощью преци-

зионного измерения массы B^+ -мезона по распадам $B^+ \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+$ в зависимости от его быстроты.

Научная новизна

В сеансе Run-1 работы БАК в 2009–2013 гг. при энергиях pp -соударений 7 и 8 ТэВ на протяжении всего периода набора данных детектор TRT показал устойчивую работу. В течение сеанса была достигнута пиковая светимость $7.7 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Рабочей газовой смесью детектора TRT служила смесь на основе ксенона. В период длительной остановки БАК в 2013–2015 гг. (Long Shutdown 1, LS1) были проведены работы по подготовке установки ATLAS к новым условиям сеанса Run-2, начавшегося в 2015 году при энергии pp -соударений 13 ТэВ. В 2016 г. в сеансе Run-2 превышена плановая светимость БАК, составляющая величину $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В связи с возникшими в конце сеанса Run-1 проблемами газовой системы детектора TRT во время периода LS1 были проведены новые разработки, реализующие возможность использования альтернативных газовых смесей без изменения конструкции детектора.

В сеансе Run-2 впервые при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ выполнена реконструкция массы B^+ -мезона с большой статистической точностью. Показано высокое качество работы внутреннего детектора после его модификации путем введения дополнительного слоя пиксельных детекторов.

Параметры CP-нарушения в распаде $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ измерены с использованием полного набора данных сеанса Run-1, отобранных для анализа и соответствующих интегральным светимостям 4.9 и 14.3 фб⁻¹ при энергиях pp -соударений в системе центра масс 7 и 8 ТэВ соответственно. Полученные результаты сопоставимы с аналогичными измерениями коллабораций DØ, CDF, CMS и LHCb и дают значимый вклад в мировое среднее значений слабой фазы ϕ_s и разницы ширин легкого и тяжелого массовых состояний B_s^0 -мезона $\Delta\Gamma_s$, определенные группой усреднения измерений характеристик тяжелых ароматов HFAg [3].

Достоверность

Алгоритмы учета альтернативных газовых смесей в математической модели детектора TRT, являющиеся результатом выполнения основной ме-

тодической задачи, вошли в стандартные пакеты ПО эксперимента ATLAS и используются коллаборацией при полном математическом моделировании детектора методом Монте-Карло. Достоверность результатов моделирования подтверждается соответствием между модельными и экспериментальными характеристиками регистрации переходного излучения в модулях детектора TRT, заполненных газовой смесью на основе аргона.

Результаты измерения массы B^+ -мезона находятся в согласии с аналогичными измерениями эксперимента LHCb и с мировым средним и свидетельствуют о стабильной работе внутреннего детектора в сеансе Run-2. Достоверность результата измерения параметров CP-нарушения в распаде $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ определяется стабильной работой подсистем установки ATLAS в течение сеанса Run-1. Измеренные значения находятся в согласии с аналогичными измерениями коллабораций DØ, CDF, LHCb и CMS.

Практическая полезность

Внутренний детектор является одной из важнейших подсистем установки ATLAS. Он осуществляет реконструкцию треков, определение координат вершин распада и рождения частиц, а также измерение их импульсов. Измерения внутреннего детектора используются для определения координат первичных вершин взаимодействий протонов, что позволяет разделять вершины и треки от различных взаимодействий пар протонов в одном пересечении сгустков. С помощью измерений подсистемы TRT внутренний детектор наряду с электромагнитным калориметром позволяет осуществлять идентификацию электронов, которая используется как при физическом анализе данных, так и в отборе событий в режиме реального времени (триггере). В связи с этим обеспечение стабильной работы детектора TRT в новых условиях сеанса Run-2 существенно для качественного функционирования внутреннего детектора и всей установки ATLAS.

Результаты реконструкции массы B^+ -мезона и их стабильность в различных областях детектора демонстрируют высокое качество настройки подсистем внутреннего детектора. Эти результаты являются основой для дальнейшего проведения измерений времени жизни и сечений рождения B^+ -мезонов. Использованный распад $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ является калибровочным в анализах редких распадов B_d^0 и B_s^0 -мезонов на пару мюонов, а также исполь-

зуются для калибровки мечения (тагирования) начального аромата b -кварка при измерении параметров CP-нарушения в распадах $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$. Алгоритмы реконструкции данного распада, адаптированные в ходе измерения массы B^+ -мезона для ПО эксперимента ATLAS, используемого в сеансе Run-2, будут использованы при анализе соответствующих распадов.

Новые измерения параметров CP-нарушения в канале $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ по полному набору данных сеанса Run-1 позволяют улучшить общий мировой результат для этих величин, что важно для проверки СМ и поиска возможных проявлений новой физики.

Автор защищает:

1. Моделирование условий регистрации переходного излучения при использовании смесей на основе аргона и криптона в подсистеме TRT ATLAS.
2. Результаты определения калибровочных констант для регистрации переходного излучения при использовании газовой смеси на основе аргона в детекторе TRT, используемых в стандартных пакетах ПО эксперимента ATLAS при полном математическом моделировании детектора методом Монте-Карло.
3. Прецизионное измерение массы B^+ -мезона по первым данным pp -соударений в сеансе Run-2 при энергии 13 ТэВ, демонстрирующее стабильность работы внутреннего детектора ATLAS после проведенной модернизации.
4. Методику учета вкладов резонансного фона в анализе распада $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$.
5. Результаты измерения значений параметров ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$ в канале $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ по данным сеанса Run-1.

Личный вклад диссертанта

Диссертантом осуществлена модификация стандартных пакетов ПО эксперимента ATLAS для моделирования использования газовых смесей на

основе аргона и криптона в различных модулях детектора TRT. В ходе данной работы диссертантом была обнаружена проблема, связанная с двойным учетом вклада от дельта-электронов при моделировании сигналов детектора TRT; автором было найдено решение этой проблемы. Диссертант произвел определение калибровочных констант, используемых для описания регистрации переходного излучения в подсистеме TRT с помощью активной газовой смеси на основе аргона, по данным соударений протонов с ионами свинца, набранным в начале 2013 г. Автор участвовал в экспериментах на тестовых пучках ускорителя SPS по изучению свойств переходного излучения и его регистрации в дрейфовых трубках при использовании различных радиаторов и газовых смесей в 2015 и 2016 гг. Диссертант осуществил предварительную подготовку к этим экспериментам и провел калибровку установки в эксперименте 2015 г.

С 2014 г. диссертант работает в группе B -физики эксперимента ATLAS. При измерении параметров CP-нарушения по угловым и временным характеристикам распадов $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ по полному набору данных сеанса Run-1 диссертантом проведена оценка числа событий от фоновых процессов $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ и $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$. Для этого же анализа им были осуществлены моделирование, оценка вклада и определение систематических неопределенностей, обусловленных распадами $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$. При реконструкции массы B^+ -мезона по распадам $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ диссертант провел моделирование, аппроксимацию распределений (фитирование) и оценку систематических неопределенностей, обусловленных фоновым процессом $B^+ \rightarrow J/\psi\pi^+$.

Апробация работы и публикации

Материалы диссертации опубликованы в 9 работах, из которых 2 статьи удовлетворяют требованиям ВАК (одна работа опубликована в рецензируемом издании, включенном в Перечень ВАК, одна публикация в издании, индексируемом в международных базах Web of Science и Scopus). Результаты неоднократно докладывались автором и обсуждались на научных конференциях «Ломоносовские чтения» МГУ имени М. В. Ломоносова, на рабочих совещаниях групп TRT и B -физики эксперимента ATLAS и на совещаниях российских групп, являющихся участниками эксперимента. Автором были

также сделаны доклады на следующих международных совещаниях, конференциях и школах:

1. TRT workshop (25–27 июня 2014 г., Краков, Польша);
2. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (17–21 ноября 2014 г., МИФИ, Москва, Россия);
3. The Third Annual Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP2015, 31 августа–5 сентября 2015 г., Санкт-Петербург, Россия);
4. 19th International Moscow School of Physics and 44th ITEP Winter School of Physics (16–22 февраля 2016 г., Москва, Россия);
5. 24th International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS 2016, 11–15 апреля 2016 г., DESY, Гамбург, Германия);
6. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (12–15 апреля 2016 г., ОИЯИ, Дубна, Россия);
7. Hadron Structure and QCD: from Low to High Energies (HSQCD2016, 27 июня–1 июля 2016 г., ПИЯФ, Гатчина, Россия);
8. The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2016, 10–14 октября 2016 г., Москва, Россия).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Ее объем составляет 108 страниц, она включает 51 рисунок и 13 таблиц. Список литературы включает 88 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, дано обоснование научной новизны, достовер-

ности и практической значимости результатов диссертационной работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано общее описание и характеристика эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере, перечислены основные физические задачи коллаборации и описаны основные модификации установки перед вторым периодом ее работы, начавшемся в 2015 г.

Большой адронный коллайдер — ускоритель заряженных частиц, осуществляющий столкновения протонов и ионов свинца (pp , pPb и $PbPb$ -соударения) на встречных пучках [4]. Расчетная энергия соударений протонов на БАК в системе центра масс равна $\sqrt{s} = 14$ ТэВ при светимости $1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Детектор ATLAS расположен на одной из точек пересечения пучков БАК. Он является экспериментом общего назначения, в широкий спектр задач которого входят прямые и косвенные наблюдения проявлений новой физики, обнаружение и измерение характеристик бозона Хиггса, а также другие прецизионные измерения параметров стандартной модели (СМ).

Общий вид детектора показан на рис. 1. Ключевой подсистемой установки ATLAS является магнитная система, магнитное поле которой искривляет треки заряженных частиц и позволяет по величине этого искривления осуществлять измерение импульсов частиц. Магнитная система эксперимента ATLAS включает в себя тонкий сверхпроводящий соленоид, окружающий внутренний детектор, и три больших сверхпроводящих тороида — один в центральной и два в торцевых частях.

Внутренний детектор является наиболее близко расположенной к пучку подсистемой установки ATLAS. Он помещен в магнитное поле соленоида величиной 2 Тл и осуществляет измерение импульсов и координат вершин рождения и распада заряженных частиц в области псевдобыстрот $|\eta| < 2.5$, а также идентификацию электронов. Это достигается путем комбинирования измерений полупроводниковых пиксельного и микрострипового детекторов высокого разрешения, расположенных наиболее близко к оси пучков, и трекового детектора переходного излучения на основе пропорциональных дрейфовых трубок.

Система калориметров предназначена для измерения энергий частиц путем их поглощения и состоит из электромагнитного и адронного калориметров. Электромагнитные калориметры, основанные на технологии жидкого

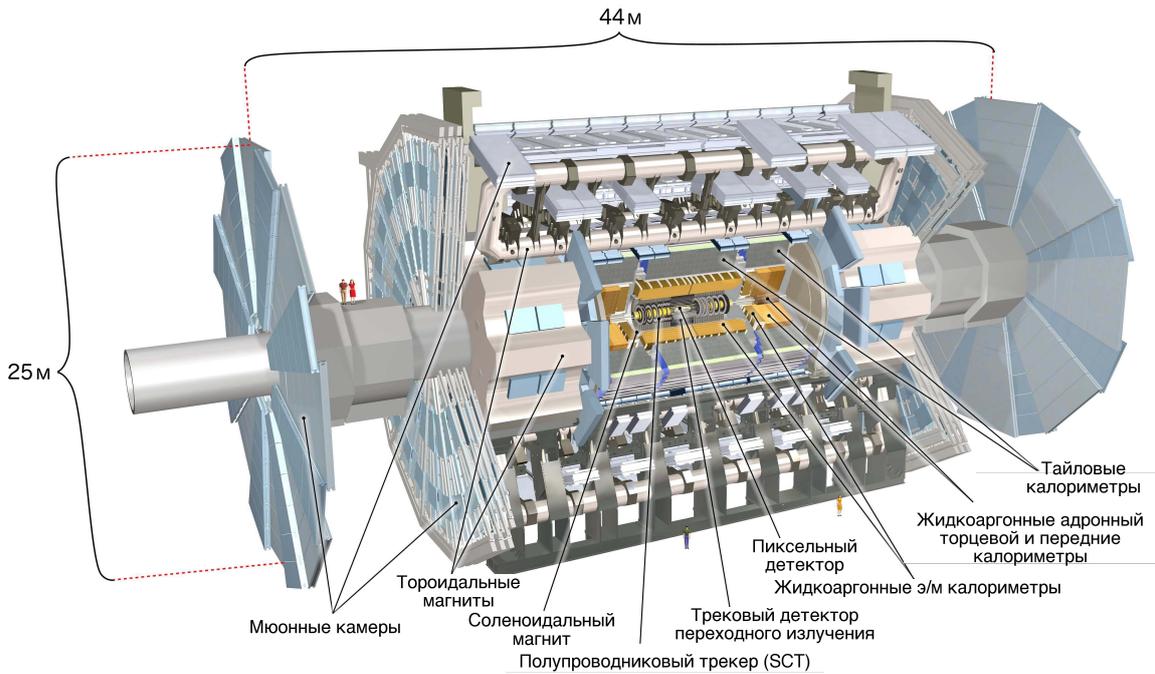


Рис. 1: Общий вид установки ATLAS [5]

аргона, расположены в области псевдобыстрот $|\eta| \leq 3.2$. Эта же технология используется для торцевой части адронного и для переднего калориметров ($1.5 \leq |\eta| \leq 4.9$). Для центральной части адронного калориметра ($|\eta| \leq 1.7$) используется технология на основе сцинтилляционных пластин и стального поглотителя.

Наиболее удаленной от точки пересечения пучков подсистемой установки ATLAS является мюонный спектрометр. Создаваемое тороидальными магнитами поле, интеграл поперечной составляющей которого вдоль траектории мюона составляет величину от 1 до 7.5 Тл·м, позволяет с высоким разрешением измерять импульсы мюонов. Также важной функцией мюонной системы является отбор событий в режиме реального времени с помощью триггерных камер высокого временного разрешения.

Во второй главе подробно описан трековый детектор переходного излучения эксперимента ATLAS, а также задача усовершенствования его математической модели и результаты моделирования условий регистрации переходного излучения в детекторе TRT при использовании газовых смесей на основе аргона и криптона. В конце главы приведено описание экспериментов по изучению свойств переходного излучения на тестовом пучке SPS в 2015 г.

Трековый детектор переходного излучения [6] является самой внешней из подсистем внутреннего детектора ATLAS. Он представляет собой набор

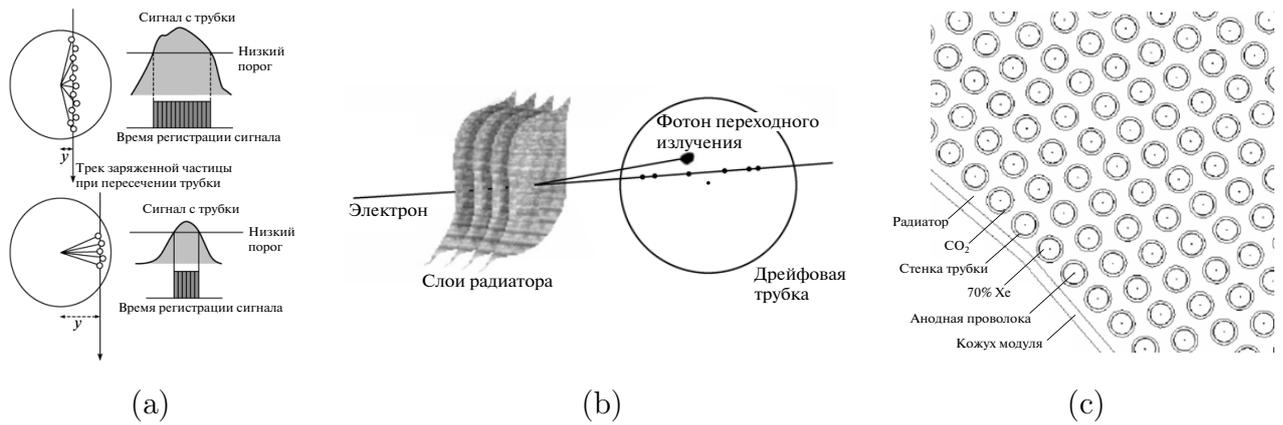


Рис. 2: Схема прохождения заряженной частицы через трубку детектора TRT (а); принцип регистрации испущенного электроном фотона переходного излучения (b); схема модуля центральной части детектора TRT (с) [6]

тонкостенных дрейфовых трубок (straw) диаметром 4 мм, расположенных вдоль оси пучка в центральной части и перпендикулярно оси пучка — в торцевых частях. Временной анализ сигнала трубок позволяет определить расстояние от трека заряженной частицы до анода (рис. 2а), причем собственное пространственное разрешение одной трубки составляет порядка 130 мкм. Детектор TRT позволяет измерять до 36 координат трека заряженной частицы. Определенные с помощью подсистемы TRT координаты дополняют измерения пиксельного и микрострипового детекторов, что обеспечивает надежную реконструкцию треков. Меньшая по сравнению с прецизионными полупроводниковыми детекторами пространственная точность трубок компенсируется их количеством и большей длиной измеряемой части трека.

Помимо пространственных измерений, детектор TRT позволяет идентифицировать электроны с помощью переходного излучения (рис. 2b). Пространство детектора между трубками заполнено радиатором — веществом с переменным показателем диэлектрической проницаемости (рис. 2с). Пересекая такое вещество, релятивистские заряженные частицы испускают рентгеновские фотоны переходного излучения, интенсивность которого пропорциональна лоренц-фактору частицы γ , а угол испускания фотонов относительно направления движения частицы мал и пропорционален $1/\gamma$ [7]. Поскольку масса электронов на два-три порядка меньше масс других заряженных частиц, при равных энергиях их лоренц-фактор, а следовательно и количество испускаемого в направлении движения частицы переходного излучения, зна-

чительно больше. Это позволяет идентифицировать электроны путем регистрации фотонов переходного излучения.

Дискриминатор сигнала трубок детектора TRT настроен на два порога: низкий порог (Low Threshold, LT, ~ 300 эВ) для регистрации ионизационных потерь частицы и высокий (High Threshold, HT, $\sim 5 - 6$ кэВ) для детектирования фотонов переходного излучения [7].

В ходе сеанса Run-1 работы БАК в трубках детектора TRT использовалась активная газовая смесь на основе ксенона ($\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{O}_2 : 70/27/3$). Такой выбор обусловлен способностью ксенона эффективно поглощать фотоны переходного излучения. В течение 2012 г. в местах выхода газа из модулей детектора TRT образовалось несколько утечек. К концу сеанса Run-1 скорость утечек составила ~ 200 л/день, что в силу высокой стоимости газовой смеси на основе ксенона привело к ее замене в некоторых модулях подсистемы TRT на более дешевую смесь на основе аргона ($\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{O}_2 : 70/27/3$).

Сечение фотопоглощения в характерной энергетической области переходного излучения в детекторе TRT ($3 - 30$ кэВ) для аргона меньше, чем для ксенона [7]. Данное различие обосновано меньшим зарядом Z ядра атома аргона по сравнению с зарядом ксенона. Для фотонов, способных поглотиться на К-оболочке, сечение фотопоглощения пропорционально $\sim Z^5$, что дает отношение сечений для аргона и ксенона, равное $3^5 = 243$. Поскольку характерная энергия переходного излучения больше энергии К-оболочки аргона (~ 3 кэВ), но меньше этой энергии для ксенона (~ 35 кэВ), где фотоны переходного излучения поглощаются на L-оболочке, сечения фотопоглощения в характерной энергетической области для двух газов отличаются на один порядок (рис. 23 из [7]).

В связи с меньшим сечением поглощения рентгеновских фотонов у аргона по сравнению с ксеноном замена активной газовой смеси приводит к ухудшению эффективности идентификации электронов в детекторе TRT. По этой причине выбор модулей с альтернативной газовой смесью осуществлялся исходя из соображений минимизации этого негативного эффекта. Кроме того, дополнительно изучалась возможность использования газовой смеси на основе криптона ($\text{Kr}/\text{CO}_2/\text{O}_2 : 70/27/3$), т. к. этот газ, все еще уступая ксенону, обладает лучшим фотопоглощением, чем аргон.

Рабочее напряжение, В	Значение высокого порога, эВ		
	Центральная часть, короткие трубки (слои 0 – 8)	Центральная часть, длинные трубки (слои 9 – 18)	Торцевая часть
1500	1315	1171	1203
1490	1560	1356	1397
1470	1882	1590	1649
1449	2415	2028	2118
Модуль	Эффективность регистрации переходного излучения		
Центральный	55%		
Торцевой	80%		

Таблица 1: Результаты калибровки параметров смеси на основе аргона в математической модели детектора TRT

В рамках проведения работ по модернизации эксперимента ATLAS перед вторым сеансом набора данных была осуществлена модификация стандартных пакетов ПО эксперимента ATLAS для моделирования использования новых газовых смесей в различных модулях детектора TRT. Для газовой смеси на основе аргона по данным pPb -соударений, набранным в начале 2013 г., была выполнена калибровка параметров регистрации переходного излучения: сопоставление рабочего напряжения в трубках детектора TRT значению эффективного порога регистрации переходного излучения, а также определение корректирующего модельного коэффициента т. н. эффективности регистрации переходного излучения. Данный коэффициент равен доле фотонов, учитываемых при формировании сигнала трубки, от общего числа поглощенных газом фотонов при моделировании этого процесса с использованием программного пакета GEANT4 [8]. Необходимость наличия этого коэффициента связана с неточностью моделируемого в GEANT4 спектра переходного излучения. Результаты описанной калибровки представлены в таблице 1.

Для оценки эффективности идентификации электронов с использованием различных газовых смесей было проведено моделирование прохождения электронов и мюонов через полную геометрию детектора. В связи с отсутствием калибровки эффективности регистрации переходного излучения для криптона моделирование осуществлялось при двух экстремальных значениях этого параметра, при т. н. оптимистичном и пессимистичном сценарии. На

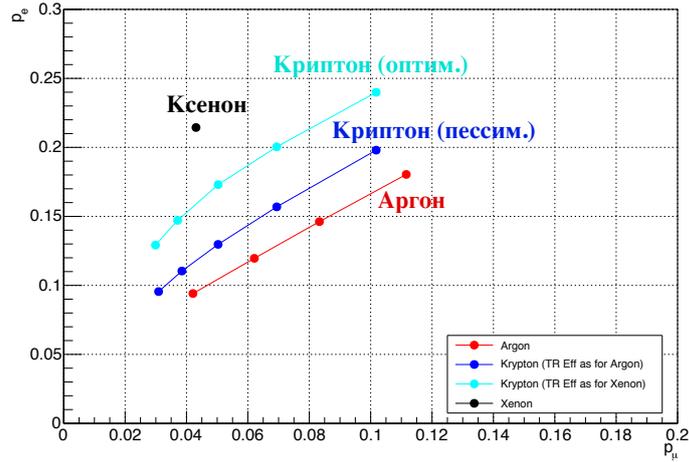


Рис. 3: Вероятность преодоления высокого порога сигналами электронов в зависимости от этой же вероятности для мюонов

рис. 3 показана вероятность преодоления высокого порога сигналами электронов по результатам моделирования в зависимости от этой же вероятности для мюонов при том же значении высокого порога.

Количественная оценка эффективности идентификации электронов при использовании различных смесей была проведена методом псевдоэкспериментов, то есть путем разыгрывания наперед заданных распределений. Изучался гипотетический сценарий, когда TRT полностью заполнен одной газовой смесью. Роль разыгрываемой случайной величины играла доля сигналов с высоким порогом для треков электронов и мюонов (f_{HT}). Для сравнения эффективности идентификации подбиралось такое пороговое значение f_{HT}^0 , что требованию $f_{HT} > f_{HT}^0$ удовлетворяло 90% треков электронов, и сравнивались доли мюонов удовлетворяющих этому же требованию. Результаты такого моделирования представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что замена ксенона на аргон или криптон во всем детекторе приведет к значительному ухудшению эффективности идентификации электронов. В случае с аргонем загрязненность электронов мюонами возрастает от $\sim 3\%$ до 57%, а с криптоном — до 20 — 40%.

Третья глава содержит обзор последних результатов коллаборации ATLAS по измерению спектров заряженных частиц по поперечным импульсам p_T и псевдобыстроте η при энергиях протон-протонных соударений 7 и 8 ТэВ. С целью сравнения спектры по p_T в pp -соударениях при 8 и 13 ТэВ [9, 10] были построены на одном графике, а также были построены

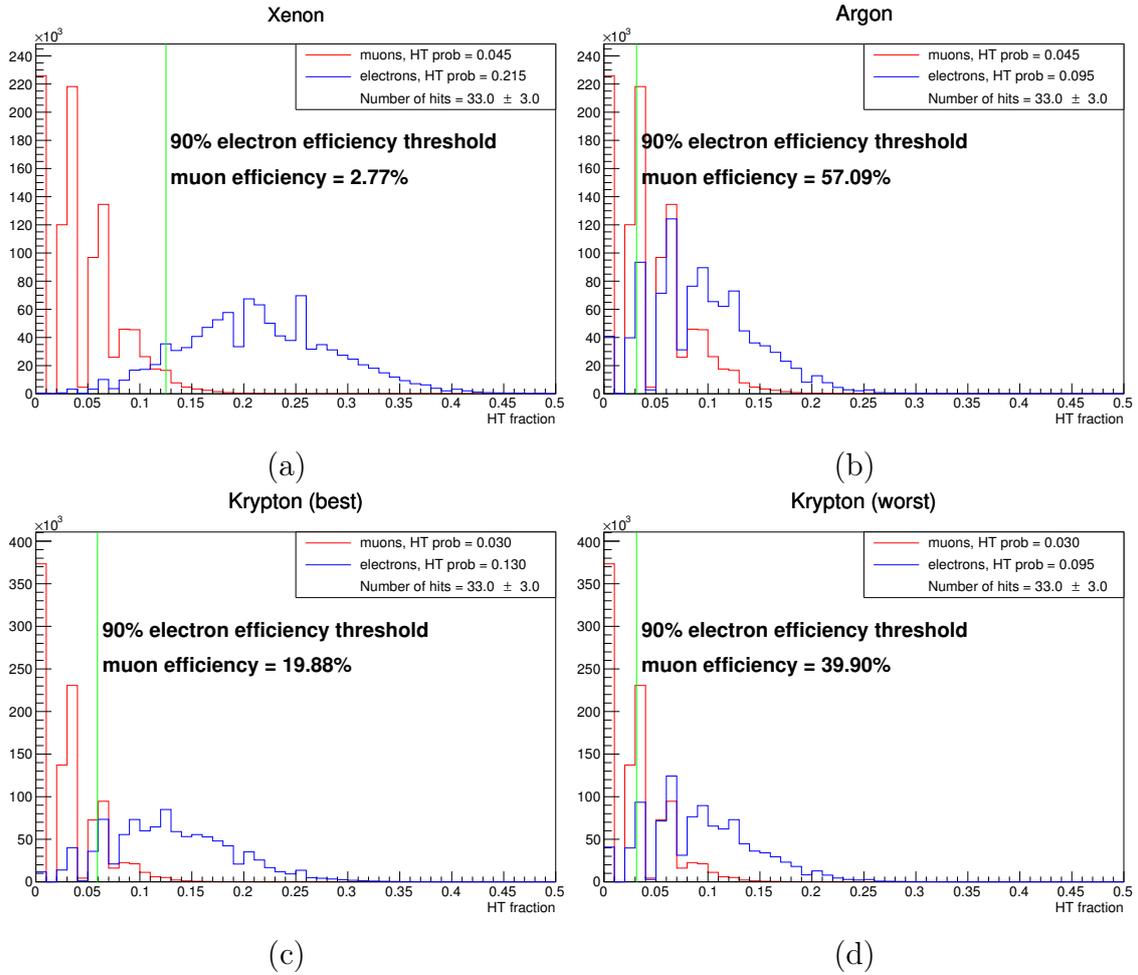
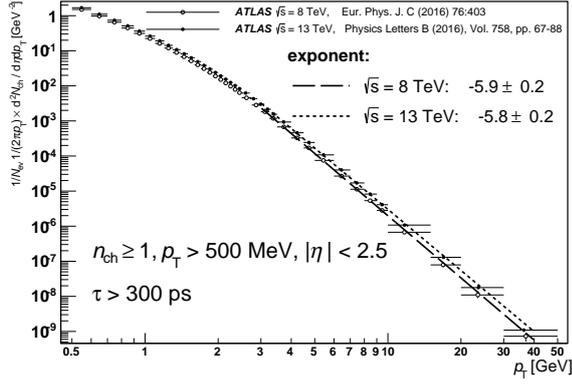


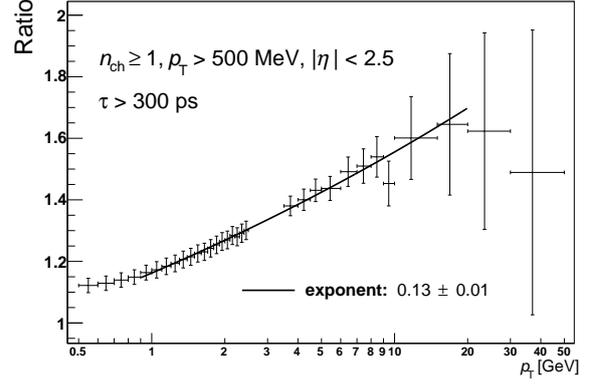
Рис. 4: Распределения долей сигналов с высоким порогом по результатам псевдоэкспериментов для треков электронов и мюонов в случаях, когда детектор TRT полностью заполнен ксеноном (a), аргоном (b) и криптоном при оптимистичном (c) и пессимистичном (d) сценариях

их отношения (рис. 5). Из отношения распределений на рис. 5b видно, что при переходе от 8 к 13 ТэВ не только увеличилось среднее число заряженных частиц в событии, но и их спектр стал более жестким. Для количественного описания этого изменения спектры по p_T были аппроксимированы степенной функцией в области $p_T \geq 3$ ГэВ. Полученные показатели степени равны -5.9 ± 0.2 и -5.8 ± 0.2 для энергий 8 и 13 ТэВ соответственно. Поскольку отношение двух степенных функций также является степенной функцией с показателем, равным разнице исходных показателей, для более точной оценки соответствующей разницы отношение спектров было также аппроксимировано степенной функцией. Результат этой аппроксимации составил 0.13 ± 0.01 .

Аналогичное сравнение спектров по псевдобыстроте [9, 10] представлено на рис. 6. В отличие от распределений по поперечному импульсу данные



(a)



(b)

Рис. 5: Спектры заряженных частиц по поперечному импульсу по данным pp -соударений в эксперименте ATLAS при энергиях 8 и 13 ТэВ (a) [9, 10], а также отношение этих спектров (b)

распределения выглядят подобными друг другу, а их отношение (рис. 6b) — не зависит от псевдобыстроты η .

Для выяснения причины увеличения выхода K -мезонов относительно пионов с ростом поперечного импульса частиц с помощью генератора RUTHIA 6 [11] проведен расчет вклада в этот эффект от сечения рождения c -кварков.

В четвертой главе представлен анализ распадов $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ с целью реконструкции массы B^+ -мезона на новых данных протон-протонных соударений 2015 г. при энергии 13 ТэВ. Приведена мотивация этого анализа, описаны использованные данные и условия отбора кандидатов, детально описаны процедуры аппроксимации распределений кандидатов и оценки систематических неопределенностей. В конце главы приведены результаты измерения массы B^+ -мезона и их сравнение с результатом коллаборации LHCb и мировым средним.

Основная цель данного анализа — проверка качества работы Внутреннего детектора при существенно новых условиях второго сеанса набора данных на ATLAS. Среди этих условий новая энергия соударений протонов в системе центра масс 13 ТэВ, новый временной интервал между соударениями 25 нс (по сравнению с 50 нс в конце первого сеанса), а также наличие во Внутреннем детекторе нового слоя пиксельных детекторов, наиболее близко расположенных к пучку.

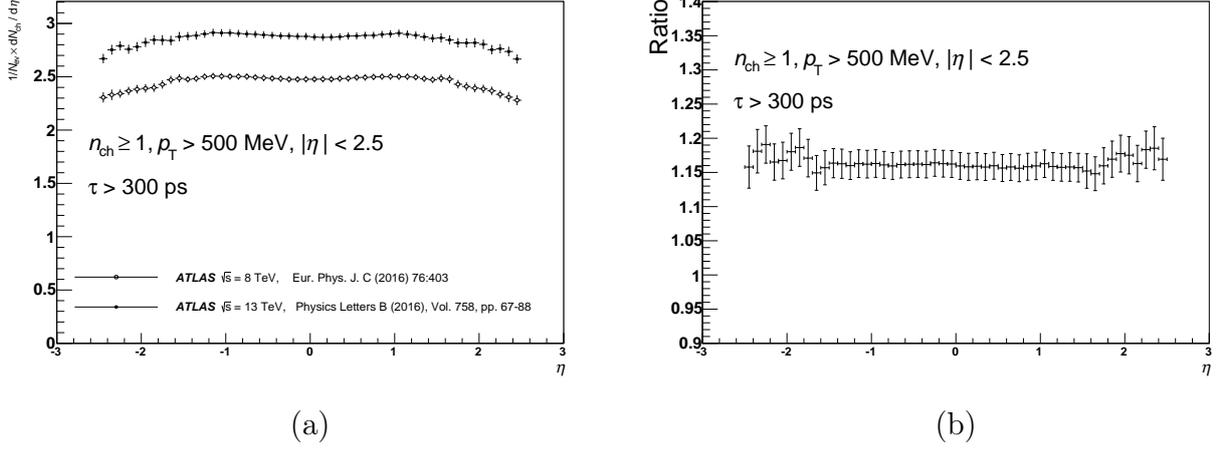


Рис. 6: Спектры заряженных частиц по псевдобыстроте по данным pp -соударений в эксперименте ATLAS при энергиях 8 и 13 ТэВ (а) [9, 10], а также отношение этих спектров (б)

В анализе использованы данные pp -соударений 2015 г., соответствующие интегральной светимости 3.2 фб^{-1} . Для отбора событий не вводились требования к использованию конкретных триггерных алгоритмов, но большая часть проанализированных событий ($\sim 90\%$) была отобрана двухмюонным триггером, требующим наличия в событии по крайней мере двух мюонов с поперечными импульсами $p_T \geq 4 \text{ ГэВ}$, треки которых пересекаются в общей вершине и имеют близкую к массе J/ψ -мезона инвариантную массу. Остальные события были отобраны за счет триггерных алгоритмов, настроенных на различные мюонные сигнатуры. Дальнейший отбор событий основан на качестве реконструкции треков и их кинематических характеристиках и направлен главным образом на подавление вклада комбинаторных фоновых процессов.

Для отобранных кандидатов осуществляется аппроксимация распределения инвариантных масс методом небинированного максимального правдоподобия с четырьмя компонентами, описывающими сигнал, комбинаторный фон, фон от частично реконструированных распадов $B \rightarrow J/\psi X$ и резонансный фон от распадов $B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$. Поскольку точность измерения массы существенно изменяется при переходе от центральной к торцевым частям детектора, аппроксимация распределения инвариантной массы кандидатов производилось независимо в 16 интервалах по быстрой y : в 14 интервалах шириной 0.25 в пределах от -1.75 до 1.75 и дополнительно в двух более широких интервалах $(-2.50; -1.75)$ и $(1.75; 2.50)$.

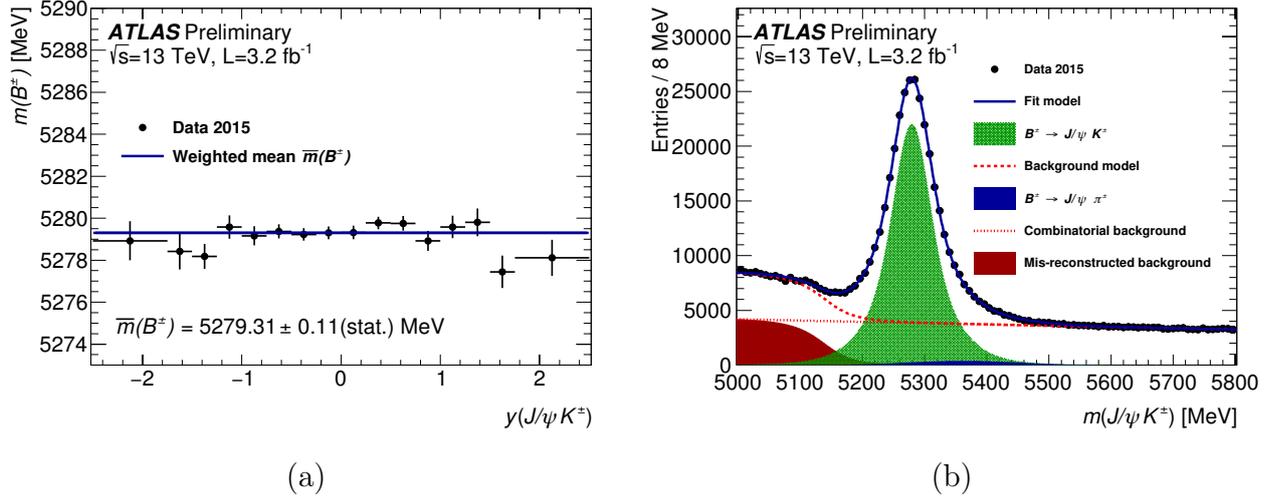


Рис. 7: Полученные значения массы B^+ -мезона в результате фитирования инвариантной массы B^+ -кандидатов в интервалах по быстройте y (a); распределение инвариантной массы B^+ -кандидатов и результат его фитирования для всей области значений быстройте y (b).

Результаты определения массы в интервалах по быстройте y представлены на рис. 7а. Полученные в результате аппроксимации плотности вероятности были просуммированы по всем интервалам быстройте для описания распределения инвариантной массы B^+ -кандидатов во всей области быстройте (рис. 7b). Окончательное значение массы B^+ -мезона определено путем расчета взвешенного среднего по всем результатам аппроксимации в интервалах по быстройте y и составляет 5279.31 ± 0.11 МэВ, где учтена лишь статистическая ошибка.

С целью проверки стабильности используемой модели к вариациям вкладов фоновых процессов аналогичный фит применялся к кандидатам $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$, удовлетворяющим дополнительному требованию на поперечную длину пробега $L_{xy} > 0.20$ мм. Результаты измерения массы в двух вариантах отбора кандидатов представлены в таблице 2 в сравнении с мировым средним [12] и результатом коллаборации LHCb [13]. Видно, что оба значения ATLAS находятся в хорошем согласии друг с другом, а также с двумя другими представленными значениями. Значения масс по результатам фитов в интервалах по быстройте y не отклоняются от их взвешенного среднего более чем на 0.05%, что говорит о высоком качестве измерений внутреннего детектора в различных его областях.

Систематическая неопределенность, связанная с моделью фита и параметризацией фоновых процессов, оценена и составляет 0.25 МэВ. Систе-

	Масса B^+ -мезона, МэВ	Погрешность, МэВ
Стандартный отбор	5279.31	± 0.11
$L_{xy} > 0.2$ мм	5279.34	± 0.09
Мировое среднее [12]	5279.29	± 0.15
ЛHCб [13]	5279.38	$\pm 0.11 \pm 0.33$

Таблица 2: Измеренные значения массы B^+ -мезона в двух вариантах отбора кандидатов в сравнении с мировым средним [12] и результатом коллаборации ЛHCб [13]. Для результата ATLAS указана только статистическая ошибка. Для результата ЛHCб первая ошибка является статистической, а вторая — систематической.

матические погрешности, связанные с конечной точностью определения импульсов и координат вершин во внутреннем детекторе, не были включены. Их оценка выходит за рамки данной работы.

В пятой главе описано измерение параметров ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$ по характеристикам распадов $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ по данным протон-протонных соударений 2012 г. при энергии 8 ТэВ, а также процедура и результат статистического объединения полученных значений этих параметров с их значениями, измеренными в аналогичном анализе данных 2011 г. при энергии 7 ТэВ. В начале главы дано краткое теоретическое введение в осцилляции нейтральных мезонов и явление CP-нарушения в рамках СМ. Описана мотивация измерения параметров CP-нарушения в распаде $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$, изложена методика анализа, в т. ч. процедура мечения (тагирования) начального аромата B_s^0 -мезона, учет вкладов резонансных фоновых процессов $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$, $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$ и оценка систематических неопределенностей. В конце главы приведен результат ATLAS по данным 8 ТэВ, а также общий результат по первому сеансу набора данных 2011–2012 гг. и его сравнение с результатами других экспериментов и предсказанием стандартной модели.

Нарушение CP-инвариантности является ключевым элементом большинства моделей, призванных решить проблему барионной асимметрии Вселенной [14, 15], однако предсказываемая в рамках СМ малая величина этого нарушения представляет собой существенное препятствие для подобных моделей. Проявления физики за пределами СМ могли бы увеличить степень нарушения CP-инвариантности в распадах тяжелых адронов. Прецизионное измерение параметров этих распадов позволит обнаружить подобные эффекты.

Кроме того, такие измерения чувствительны к существованию новых частиц в гораздо большем диапазоне масс, чем их прямые поиски. Следовательно, измерение характеристик CP-нарушения в распадах тяжелых адронов является фундаментальной задачей для поиска проявлений новой физики, уточнения значений параметров СМ и решения проблемы барионной асимметрии Вселенной.

Одним из чувствительных к проявлениям новой физики каналов является распад $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$. Нарушение CP-инвариантности в нем происходит за счет интерференции между прямыми распадами и распадами посредством $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -осцилляций. Частота этих осцилляций характеризуется разницей Δm_s масс тяжелого (B_H) и легкого (B_L) массовых состояний. Величина CP-нарушения в данном распаде характеризуется величиной ϕ_s , которая определяется как разница слабых фаз между амплитудой $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -смешивания и амплитудой распада $b \rightarrow c\bar{c}s$. При отсутствии CP-нарушения состояние B_H соответствовало бы CP-нечетному состоянию, а B_L — CP-четному. В рамках СМ фаза ϕ_s мала, а ее значение может быть связано со значениями элементов матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы посредством соотношения $\phi_s \simeq -2\beta_s$, где $\beta_s = \arg[-(V_{ts}V_{tb}^*) / (V_{cs}V_{cb}^*)]$. В предположении отсутствия проявлений новой физики, влияющих на смешивание и распады B_s^0 -мезонов, значение величины $-2\beta_s = -0.0376_{-0.0007}^{+0.0008}$ рад оценено путем объединения результатов измерений других наблюдаемых из области физики b -адронов и физики каонов [1].

Другими характеристиками, описывающими $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ -смешивание, являются ширина распада $\Gamma_s = (\Gamma_L + \Gamma_H)/2$ и разница ширин $\Delta\Gamma_s = \Gamma_L - \Gamma_H$, где Γ_L и Γ_H — ширины распадов легкого и тяжелого массовых состояний соответственно. В рамках СМ значение этого параметра равно $\Delta\Gamma_s = 0.088 \pm 0.020 \text{ пс}^{-1}$ [2]. Ожидается, что значение $\Delta\Gamma_s$ менее чувствительно к возможным проявлениям новой физики, чем ϕ_s . Тем не менее, измерение значения разницы ширин $\Delta\Gamma_s$ представляет интерес с точки зрения проверки теоретических предсказаний. Измерения этих величин были прежде проведены коллаборациями DØ, CDF, LHCb, ATLAS и CMS [16, 17, 18, 19, 20, 21].

Распад псевдоскалярного B_s^0 -мезона на конечное состояние $J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$ с двумя векторными мезонами приводит к наличию суперпозиции CP-четных и CP-нечетных состояний со значением

орбитального момента $L = 0, 1$ или 2 . При этом конечные состояния с $L = 0$ или 2 являются CP-четными, а состояние с $L = 1$ — CP-нечетным. Еще одно конечное состояние может быть образовано с парой K^+K^- в S -волновой конфигурации [22]. Такое конечное состояние также является CP-нечетным. Статистическое разделение всех этих состояний возможно благодаря угловому анализу продуктов распада. Кроме того, в описываемой работе использовано мечение (тагирование) начального аромата b -кварка (flavour tagging) для разделения B_s^0 и \bar{B}_s^0 -мезонов в начальном состоянии.

Триггерные алгоритмы, использованные в данном анализе основаны на идентификации распадов $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ с порогами на поперечные импульсы мюонов 4 или 6 ГэВ. Используются данные, набранные детектором ATLAS при энергии протонов в системе центра масс 8 ТэВ, соответствующие 14.3 фб^{-1} интегральной светимости. Часть данных, набранных в начале соответствующего периода, не была включена в анализ в связи с проблемой триггерного алгоритма, вследствие которой эффективность отбора событий была неоднородной по времени жизни кандидатов. Дальнейший отбор событий основан на качестве реконструкции треков, их кинематических характеристиках и инвариантных массах пар мюонов, пар адронов и всей четверки треков в конечном состоянии.

Распределения отобранных кандидатов по инвариантной массе, их собственному времени жизни и трем угловым переменным (т. н. углам поперечности) аппроксимировались методом небинированного максимального правдоподобия. Основными резонансными фоновыми процессами являются события $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$, реконструированные как $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$. Они учитываются при аппроксимации. Доли этих событий $f_{B_d^0} = (3.3 \pm 0.5)\%$ и $f_{\Lambda_b^0} = (1.8 \pm 0.6)\%$ относительно числа сигнальных событий определены с помощью Монте-Карло моделирования эффективностей реконструкции данных каналов, а также с использованием относительных парциальных ширин соответствующих распадов и вероятностей фрагментации b -кварка в соответствующие адроны. Модельные события также используются для определения формы распределений по инвариантной массе и углам поперечности. Угловые распределения моделируются с учетом эффектов акцептанса и затем описываются с помощью полиномов Лежандра с фикси-

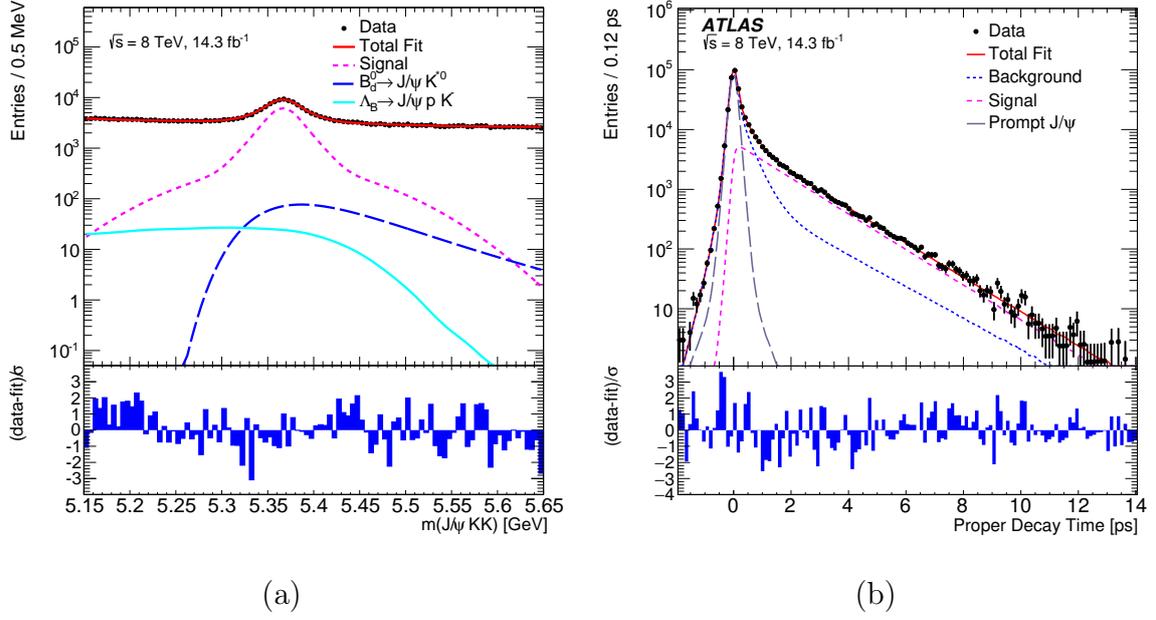


Рис. 8: Проекция результата аппроксимации распределений кандидатов $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ на массу (a) и время жизни (b). Сплошной красной линией отмечен суммарный фит, пунктирной фиолетовой линией — сигнальная компонента. На массовой проекции пунктирной темно-синей линией отмечена компонента $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$, сплошной голубой линией — компонента $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p^+ K^-$. На временной проекции пунктирной темно-синей линией отмечена полная фоновая компонента, пунктирной серой линией — фоновая компонента от J/ψ -мезонов, рожденных непосредственно в точке pp -соударения.

рованными параметрами, определенными из моделирования. Вклад событий $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$, а также их интерференция с событиями $B_d^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$, учитываются в виде дополнительной систематической неопределенности.

Проекция результата аппроксимации на инвариантную массу и собственное время жизни показаны на рис. 8.

Полученный на данных 8 ТэВ результат был статистически скомбинирован с аналогичным результатом ATLAS на данных 7 ТэВ:

$$\begin{aligned}
 \phi_s &= -0.090 \pm 0.078 \text{ (стат.)} \pm 0.041 \text{ (сист.) рад} \\
 \Delta\Gamma_s &= 0.085 \pm 0.011 \text{ (стат.)} \pm 0.007 \text{ (сист.) пс}^{-1} \\
 \Gamma_s &= 0.675 \pm 0.003 \text{ (стат.)} \pm 0.003 \text{ (сист.) пс}^{-1}
 \end{aligned}$$

Скомбинированный результат эксперимента ATLAS показан в виде контуров функции правдоподобия на плоскости $\phi_s - \Delta\Gamma_s$ на рис. 9. На этом же рисунке приведены результаты экспериментов DØ, CDF, CMS и LHCb, а также предсказание СМ. Видно, что результат эксперимента ATLAS согласуется с другими экспериментами и с предсказанием СМ. Результат эксперимента

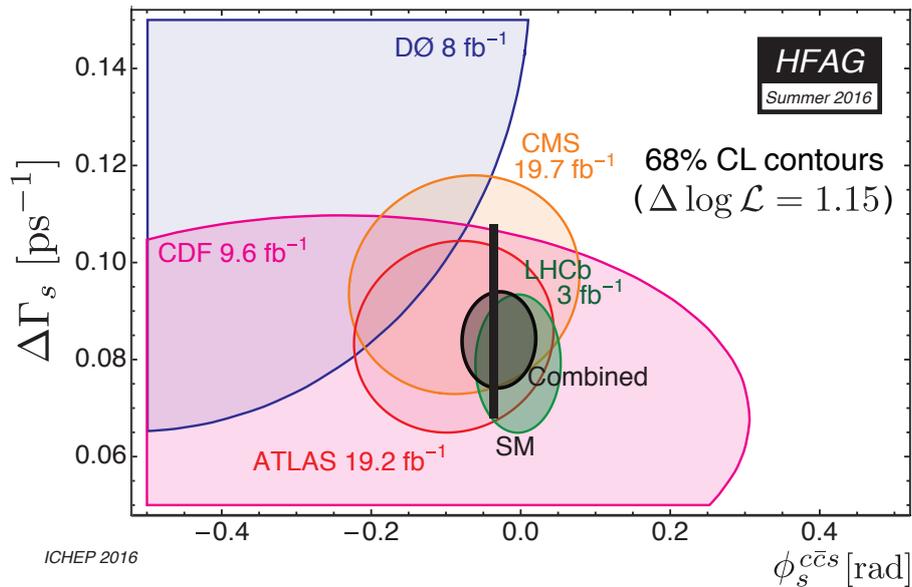


Рис. 9: Контуры функции правдоподобия на плоскости $\phi_s - \Delta\Gamma_s$ [3]

ATLAS дает значимый вклад в мировое среднее этих параметров [3]. Это среднее с учетом результата ATLAS также показано на рис. 9. Видно, что мировое среднее параметров ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$ согласуется с предсказанием СМ.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, удовлетворяющие требованиям ВАК

1. Aad G., ..., Maevskiy A. et al (ATLAS Collaboration). Measurement of the CP-violating phase ϕ_s and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ decays in ATLAS // JHEP. — 2016. — Vol. 08. — P. 147. — DOI:10.1007/JHEP08(2016)147. arXiv:1601.03297 [hep-ex].
2. Болдырев А. С., Маевский А. С. Моделирование условий регистрации переходного излучения при использовании Ar и Kr смесей в TRT ATLAS // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, № 9-10. — С. 857–860. — DOI:10.1134/S2079562914080065.
A. S. Boldyrev, A. S. Maevskiy. Simulation of the transition radiation detection conditions in the ATLAS TRT detector filled with argon and krypton gas mixtures // Physics of Atomic Nuclei. — 2015. — Vol. 78. — P. 1552-1555.

Прочие работы

3. ATLAS Collaboration. B^\pm mass reconstruction in $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ decay at ATLAS at 13 TeV pp collisions at the LHC // ATLAS-CONF-2015-064. — URL: <https://cds.cern.ch/record/2114830>.
4. Maevskiy A. Recent results on B-Physics and Quarkonia with the ATLAS detector // PoS. — 2016. — Vol. DIS2016. — P. 136.
5. Маевский А. С. Калибровка порогов регистрации переходного излучения в TRT ATLAS для аргоновой смеси // Труды XV межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». — 2014. — С. 28-32.
6. Lobanov S., Maevskiy A., Smirnova L. K/π ratio and strangeness suppression in pp collisions at the LHC // PoS. — 2011. — Vol. IHEP-LHC-2011. — P. 008.
7. Boldyrev A. S., Lobanov S. Y., Maevsky A. S. et al. Measurements and simulations of b and c -quark production at hadron colliders // Proceedings of the Eighteenth Annual Seminar NPC'S'2011. — Minsk, Belarus, 2011. — Vol. 18. — P. 216-222.
8. М. И. Маликова, А. С. Маевский. Анализ вклада резонансных фонов в распаде $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ // Труды XVII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». — 2016. — С. 115-117.
9. Ю. Ю. Овчаров, А. С. Маевский. Сравнительный анализ спектров заряженных частиц в соударениях протонов в эксперименте ATLAS // Труды XVII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». — 2016. — С. 118-121.

Список цитируемой литературы

- [1] Charles J. et al. Predictions of selected flavour observables within the Standard Model // Phys. Rev. — 2011. — Vol. D84. — P. 033005. — (Updated with Summer 2015 results). DOI:10.1103/PhysRevD.84.033005. arXiv:1106.4041 [hep-ph].
- [2] Artuso Marina, Borissov Guennadi, Lenz Alexander. CP Violation in the B_s^0 System // Rev. Mod. Phys. — 2016. — Vol. 88, no. 4. — P. 045002. — DOI:10.1103/RevModPhys.88.045002. arXiv:1511.09466 [hep-ph].
- [3] Amhis Y. et al. Averages of b -hadron, c -hadron, and τ -lepton properties as of summer 2014. — 2014. — (Summer 2016 averages). <http://slac.stanford.edu/xorg/hfag>. arXiv:1412.7515 [hep-ex].
- [4] Evans Lyndon, Bryant Philip. LHC Machine // JINST. — 2008. — Vol. 3. — P. S08001. — DOI:10.1088/1748-0221/3/08/S08001.
- [5] Aad G. et al. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // JINST. — 2008. — Vol. 3. — P. S08003. — DOI:10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [6] Болдырев А. С., Бондаренко В. Г., Бычков В. Н. и др. Трековый детектор переходного излучения эксперимента ATLAS // Приборы и техника эксперимента. — 2012. — № 3. — С. 27–39.
- [7] Dolgoshein B. Transition radiation detectors // Nucl. Instrum. Meth. — 1993. — Vol. A326. — P. 434–469. — DOI:10.1016/0168-9002(93)90846-A.
- [8] Agostinelli S. et al. GEANT4: A Simulation toolkit // Nucl. Instrum. Meth. — 2003. — Vol. A506. — P. 250–303. — DOI:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [9] Aad Georges et al. Charged-particle distributions in pp interactions at $\sqrt{s} = 8$ TeV measured with the ATLAS detector // Eur. Phys. J. — 2016. — Vol. C76, no. 7. — P. 403. — DOI:10.1140/epjc/s10052-016-4203-9. arXiv:1603.02439 [hep-ex].

- [10] Aad Georges et al. Charged-particle distributions in $\sqrt{s}=13$ TeV pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC // *Phys. Lett.* — 2016. — Vol. B758. — P. 67–88. — DOI:10.1016/j.physletb.2016.04.050. arXiv:1602.01633 [hep-ex].
- [11] Sjostrand Torbjorn, Mrenna Stephen, Skands Peter Z. PYTHIA 6.4 Physics and Manual // *JHEP.* — 2006. — Vol. 05. — P. 026. — DOI:10.1088/1126-6708/2006/05/026. arXiv:hep-ph/0603175.
- [12] Olive K. A. et al. Review of Particle Physics // *Chin. Phys.* — 2014. — Vol. C38. — P. 090001. — DOI:10.1088/1674-1137/38/9/090001.
- [13] Aaij R. et al. Measurement of b -hadron masses // *Phys. Lett.* — 2012. — Vol. B708. — P. 241–248. — DOI:10.1016/j.physletb.2012.01.058. arXiv:1112.4896 [hep-ex].
- [14] Morrissey David E., Ramsey-Musolf Michael J. Electroweak baryogenesis // *New J. Phys.* — 2012. — Vol. 14. — P. 125003. — DOI:10.1088/1367-2630/14/12/125003. arXiv:1206.2942 [hep-ph].
- [15] Sakharov A. D. Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe // *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 1967. — Vol. 5. — P. 32–35. — DOI:10.1070/PU1991v034n05ABEH002497 [*Usp. Fiz. Nauk*161,61(1991)].
- [16] Abazov Victor Mukhamedovich et al. Measurement of the CP-violating phase $\phi_s^{J/\psi\phi}$ using the flavor-tagged decay $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ in 8 fb^{-1} of $p\bar{p}$ collisions // *Phys. Rev.* — 2012. — Vol. D85. — P. 032006. — DOI:10.1103/PhysRevD.85.032006. arXiv:1109.3166 [hep-ex].
- [17] Aaltonen T. et al. Measurement of the Bottom-Strange Meson Mixing Phase in the Full CDF Data Set // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Vol. 109. — P. 171802. — DOI:10.1103/PhysRevLett.109.171802. arXiv:1208.2967 [hep-ex].
- [18] Aaij R et al. Measurement of CP violation and the B_s^0 meson decay width difference with $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ and $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ decays // *Phys. Rev.* — 2013. — Vol. D87, no. 11. — P. 112010. — DOI:10.1103/PhysRevD.87.112010. arXiv:1304.2600 [hep-ex].

- [19] Aaij Roel et al. Precision measurement of CP violation in $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ decays // Phys. Rev. Lett.— 2015.— Vol. 114, no. 4.— P. 041801.— DOI:10.1103/PhysRevLett.114.041801. arXiv:1411.3104 [hep-ex].
- [20] Aad Georges et al. Flavor tagged time-dependent angular analysis of the $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ decay and extraction of $\Delta\Gamma_s$ and the weak phase ϕ_s in ATLAS // Phys. Rev.— 2014.— Vol. D90, no. 5.— P. 052007.— DOI:10.1103/PhysRevD.90.052007. arXiv:1407.1796 [hep-ex].
- [21] Khachatryan Vardan et al. Measurement of the CP-violating weak phase ϕ_s and the decay width difference $\Delta\Gamma_s$ using the $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi(1020)$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Phys. Lett.— 2016.— Vol. B757.— P. 97–120.— DOI:10.1016/j.physletb.2016.03.046. arXiv:1507.07527 [hep-ex].
- [22] Stone Sheldon, Zhang Liming. S-waves and the Measurement of CP Violating Phases in B_s Decays // Phys. Rev.— 2009.— Vol. D79.— P. 074024.— DOI:10.1103/PhysRevD.79.074024. arXiv:0812.2832 [hep-ph].