

На правах рукописи

**Болдырев Алексей Сергеевич**

**Физика В-мезонов в эксперименте ATLAS на LHC**

01.04.23 — физика высоких энергий

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2013

Работа выполнена в отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”.

Научный руководитель: **Смирнова Лидия Николаевна**  
доктор физико-математических наук  
Кафедра общей ядерной физики  
физического факультета МГУ

Официальные оппоненты: **Просин Василий Владимирович**  
доктор физико-математических наук  
Отдел частиц сверхвысоких энергий  
НИИЯФ МГУ, г. Москва

**Негодаев Михаил Александрович**  
доктор физико-математических наук  
ФИАН, г. Москва

Ведущая организация: Государственный научный центр  
Российской Федерации —  
Институт Физики Высоких Энергий

Защита состоится 5 апреля 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, НИИЯФ МГУ, “19 корпус”, ауд. 2–15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ ” 2013 года.

Ученый секретарь  
Совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций  
Д.501.001.77,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Страхова С.И.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Одной из основных задач физики элементарных частиц является экспериментальная проверка параметров Стандартной модели. Наиболее детальную информацию о свойствах взаимодействий на субатомных масштабах на данный момент могут предоставить экспериментальные установки коллайдерных экспериментов. Большой адронный коллайдер (LHC) позволяет достигнуть рекордных значений энергии сталкивающихся пучков протонов (до 14 ТэВ в системе центра масс) до номинальной светимости порядка  $10^{34}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Работа беспрецедентных по сложности и своим характеристикам детекторов позволили коллаборациям ATLAS и CMS в 2012 г. объявить об обнаружении новой частицы, которая по своим свойствам может соответствовать бозону Хиггса Стандартной модели. Необходимые характеристики детекторов для поиска новых свойств субатомных частиц на LHC - высокие пространственные и временные разрешения, работа при высоких нагрузках.

Физика  $B$ -мезонов является важной частью физической программы эксперимента ATLAS. Она охватывает многие аспекты физики прелестных ароматов. Во-первых, это измерение сечений рождения адронов, содержащих  $b$ - и  $c$ -кварки, в первую очередь  $J/\Psi$  и  $\Upsilon$ . Во-вторых, это изучение свойств целого семейства  $B$ -мезонов:  $B_d^0$ ,  $B^+$ ,  $B_s^0$ ,  $B_c$  (и их зарядовых партнёров), а также  $B$ -барионов, что предоставляет новую информацию о характеристиках частиц и свойствах их рождения. Особое внимание в программе  $B$ -физики уделяется прецизионным измерениям редких распадов  $B$ -адронов, таким как  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ , позволяющих проверить предсказания Стандартной модели для относительной парциальной ширины этих распадов, в первую очередь  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Прецизионные измерения в рамках  $B$ -физики позволят провести не прямые наблюдения Новой физики в дополнение к прямому поиску Новой физики на Большом адронном коллайдере.

Одним из способов сочетания высокой точности регистрации трека с высокими требованиями к нагрузочной способности является применение детекторов с большой степенью гранулированности. В эксперименте ATLAS наибольшей гранулированностью обладают компоненты Внутреннего детектора. В центральной его части расположены пиксельные и микростриповые кремниевые детекторы. Малость размера чувствительного элемента пиксельного детектора позволяет достигнуть высокоточного определения вершин взаимодействий. В трековом детекторе переходного излучения, являющегося наиболее удалённой частью Внутреннего детектора, достигается меньшая пространственная точность в определении координат трека по сравнению с кремниевыми детекторами, что компенсируется большим числом зарегистрированных координат трека.

Предлагаемая к защите диссертационная работа непосредственно связана с возможностью высокоточной регистрации треков заряженных частиц во Внутреннем детекторе установки ATLAS при высоких нагрузках.

**Целью** диссертационной работы является поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере для проверки предсказаний Стандартной модели.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. При участии автора осуществлен запуск и проведён контроль качества работы трекового детектора переходного излучения (TRT) ATLAS. Методом моделирования автором определены варианты состава альтернативной (без использования ксенона) активной газовой смеси с целью обеспечения требуемых характеристик детектора TRT.
2. Созданы алгоритмы для получения и анализа трековых данных TRT в универсальном для эксперимента ATLAS формате D3PD. Определены эксплуатационные характеристики TRT: среднее пространственное разрешение трека составляет 120 мкм в центральной и 135 мкм в торцевых частях детектора при 30-ти координатах регистрации (хитов) на трек; загрузки детектора в зависимости от числа первичных вершин в одном акте  $pp$ -соударения не превышают 0.35 в барреле и 0.24 в торцевых частях при светимости коллайдера порядка  $10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , что обеспечивает хорошее качество данных при достигнутой светимости как в  $pp$ -соударениях, так и в соударениях тяжёлых ионов.
3. Определены варианты газовой смеси, величины координатного и углового разрешения газового пиксельного детектора (19.4 мкм и  $0.47^\circ$  для угла падения трека  $20^\circ$ , соответственно). Показано соответствие расчетных и тестовых результатов разрешения детектора, полученных в испытаниях на пучке, что обеспечивает возможность использования детектора этого типа для модернизации Внутреннего детектора установки ATLAS.
4. Выполнен анализ событий с рождением  $B$ -мезонов при энергиях LHC, моделированных с помощью Монте-Карло генератора PYTHIA 6.4. Обнаружены корреляции в распределениях множественности заряженных частиц по псевдобыстроте относительно направления вылета  $B$ -мезона и зависимость ассоциированной множественности частиц от механизма рождения  $b$ -кварков.
5. Определён верхний предел относительной парциальной ширины редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  на интегральной светимости  $2.4 \text{ фб}^{-1}$ , равный  $2.2(1.9) \times 10^{-8}$  при 95% (90%) уровне достоверности.

**Научная новизна** обусловлена тем, что определены эксплуатационные характеристики TRT для первых сеансов набора данных установки ATLAS. Впервые детектор из дрейфовых трубок показал успешную работу в условиях высокой светимости (до  $7.7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ). Детектор GasPix представляет новый тип газового детектора, позволяющий определять как координаты с точностью 12 мкм, так и вектор движения заряженной частицы.

Впервые при столь высокой энергии протонных соударений 7 ТэВ были реконструированы эксклюзивные распады  $B$ -мезонов. При участии автора получен новый результат эксперимента ATLAS для верхней границы парциальной ширины редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  на интегральной светимости  $2.4 \text{ фб}^{-1}$ .

**Практическая значимость** представленной работы обусловлена тем, что полученный в работе новый результат для верхней границы парциальной ширины редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  важен для дальнейшего планирования и проведения экспериментов по проверке Стандартной модели. Разработанная при участии автора методика поиска редких распадов  $B$ -мезонов в эксперименте ATLAS используется в дальнейших исследованиях редких распадов  $B$ -мезонов. Предложены рекомендации для выбора активной газовой смеси для следующего цикла работы трекового детектора переходного излучения ATLAS. Результаты разработки нового газового пиксельного детектора GasPix могут быть использованы в модернизации установки ATLAS и могут найти применение в других экспериментах физики высоких энергий.

**Достоверность** диссертации определяется совпадением расчетных и экспериментальных характеристик детектора TRT, использованием стандартного программного обеспечения эксперимента ATLAS в анализе и моделировании, применением современных программ моделирования (для детектора GasPix) и совпадением расчетных и тестовых результатов. Достоверность результатов по характеристикам  $B$ -мезонов определяется совпадением измеренной массы  $B^+$ -мезона с табличными данными Particle Data Group (PDG) и тем, что измерения верхнего предела относительной парциальной ширины редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  подтверждаются аналогичными результатами экспериментов LHCb и CMS.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации ATLAS в группах  $B$ -физики и TRT. Автор выступал с докладами по теме диссертации на международных конференциях, Ломоносовских и Черенковских чтениях, на Европейской Школе по Физике Высоких Энергий и совещаниях по совместному проекту РФФИ-Япония “Наложение экспериментальных ограничений на характеристики рождения тяжёлых кварков на Большом адронном коллайдере с помощью детектора ATLAS”.

**Личный вклад** заключается в участии автора в запуске и мониторинге качества работы детектора TRT в составе экспериментальной установки ATLAS, получении первых характеристик его работы. Для представления данных TRT в унифицированном формате эксперимента ATLAS автором были разработаны программные алгоритмы создания трековых данных. С их помощью проведён анализ данных, полученных детектором TRT в 2011 г.

Автором производилось моделирование свойств чувствительного элемента (тонкостенной дрейфовой трубки) трекового детектора переходного излучения для эксплуатации детектора с *Ar*-содержащей рабочей газовой смеси. Лично автором выполнено моделирование характеристик газовых смесей детектора нового типа (газового пиксельного детектора) GasPix для модернизации установки ATLAS. Автор принимал участие в тестовых испытаниях детектора GasPix в ноябре 2012 г. в ЦЕРН, провел анализ данных испытаний и выполнил сравнение результатов моделирования характеристик детектора и соответствующих измерений. Автор провел модельные расчеты характеристик событий с рождением *B*-мезонов, реконструкции распадов *B*<sup>+</sup>-мезонов и эффективности триггера для отбора редких распадов *B*-мезонов, принимал участие в поиске событий редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  на начальной статистике 2.4 фб<sup>-1</sup>.

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 10 печатных изданиях [1–10], 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [2,5,8], 3 — в трудах конференций [3,6,10], 4 — в тезисах докладов [1,4,7,9].

## Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 156 страниц с 48 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 80 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** содержит основные характеристики первого цикла работы (2009–2012 гг.) детектора ATLAS и коллайдера LHC в целом. Показано, что главной особенностью набора физических данных в эксперименте ATLAS является работа в постоянно меняющихся условиях вследствие быстрого роста текущей светимости. Благодаря этому особое значение в эксперименте ATLAS имеет подсистема триггера, позволяющая собирать данные физических каналов в различных режимах работы. Приведены результаты по основной задаче ускорителя LHC - поиску бозона Хиггса Стандартной модели.

Определение множественности заряженных частиц является первым совместным результатом измерений трековых детекторов и системы триггера установки ATLAS. Впервые было выполнено сравнение распределений множественности заряженных частиц с предсказаниями Монте-Карло генераторов. Показано, что ни один из существовавших на тот момент Монте-Карло генераторов не дал количественного описания данных по множественности заряженных частиц.

На Рисунке 1 показаны распределения множественности заряженных частиц для событий с  $n_{ch} \geq 1$  в кинематической области поперечных импульсов  $p_T > 500$  МэВ/с и псевдобыстроты  $|\eta| < 2.5$ . Плотность заряженных частиц в событии по псевдобыстроте показана на Рисунке 1(а). Распределение является практически плоским в области  $|\eta| < 1.5$ . Среднее значение плотности, определённое по диапазону  $|\eta| < 0.2$ , составляет  $1.333 \pm 0.003(\text{стат.}) \pm 0.040(\text{сист.})$  заряженных частиц на событие и единицу псевдобыстроты. Заметно уменьшение плотности частиц при больших значениях  $|\eta|$ . Видно, что предсказания всех использованных в сравнении Монте-Карло генераторов на 5–15% ниже измеренных множественностей. Формы предсказаний множественностей хорошо описываются большинством моделей.

Распределение  $n_{ch}$  в бинах поперечного импульса представлено на Рисунке 1(б). Монте-Карло модели не воспроизводят данные для  $p_T > 0.7$  ГэВ/с.

На Рисунке 1(в) показано распределение событий по множественности заряженных частиц  $n_{ch}$ . Видно, что в эксперименте наблюдается превышение событий над модельными предсказаниями при  $n_{ch} \geq 10$ . Среднее значение поперечного импульса, как функция  $n_{ch}$ , приведено на Рисунке 1(г). Виден рост  $\langle p_T \rangle$  с увеличением  $n_{ch}$ .

В завершении Первой главы описана программа  $B$ -физики в эксперименте ATLAS. Эксперимент ATLAS позволяет реконструировать эксклюзивные распады  $B$ -мезонов. Исследование  $B$ -физики основано на использовании двухмюонного триггера. Первые результаты реконструкции в программе  $B$ -физики получены для канала распада  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ . Также на первых данных проведено измерение масс и времён жизни  $B$ -адронов в каналах распада  $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_0^*$  и  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$ . На основе угловых распределений конечных частиц в канале  $B_s \rightarrow J/\psi \phi$  могут быть измерены коэффициенты CP-нарушений. Важным разделом физической программы  $B$ -физики является поиск редких распадов.

**Вторая глава** посвящена описанию трекового детектора переходного излучения (TRT) эксперимента ATLAS. Приведены характеристики детектора TRT в первом цикле набора данных детектором ATLAS.

Трековый детектор переходного излучения является частью Внутреннего детектора ATLAS и занимает наиболее удалённые области, считая от оси пучка. Центральная часть TRT образует открытый с торцов полый цилиндр, в

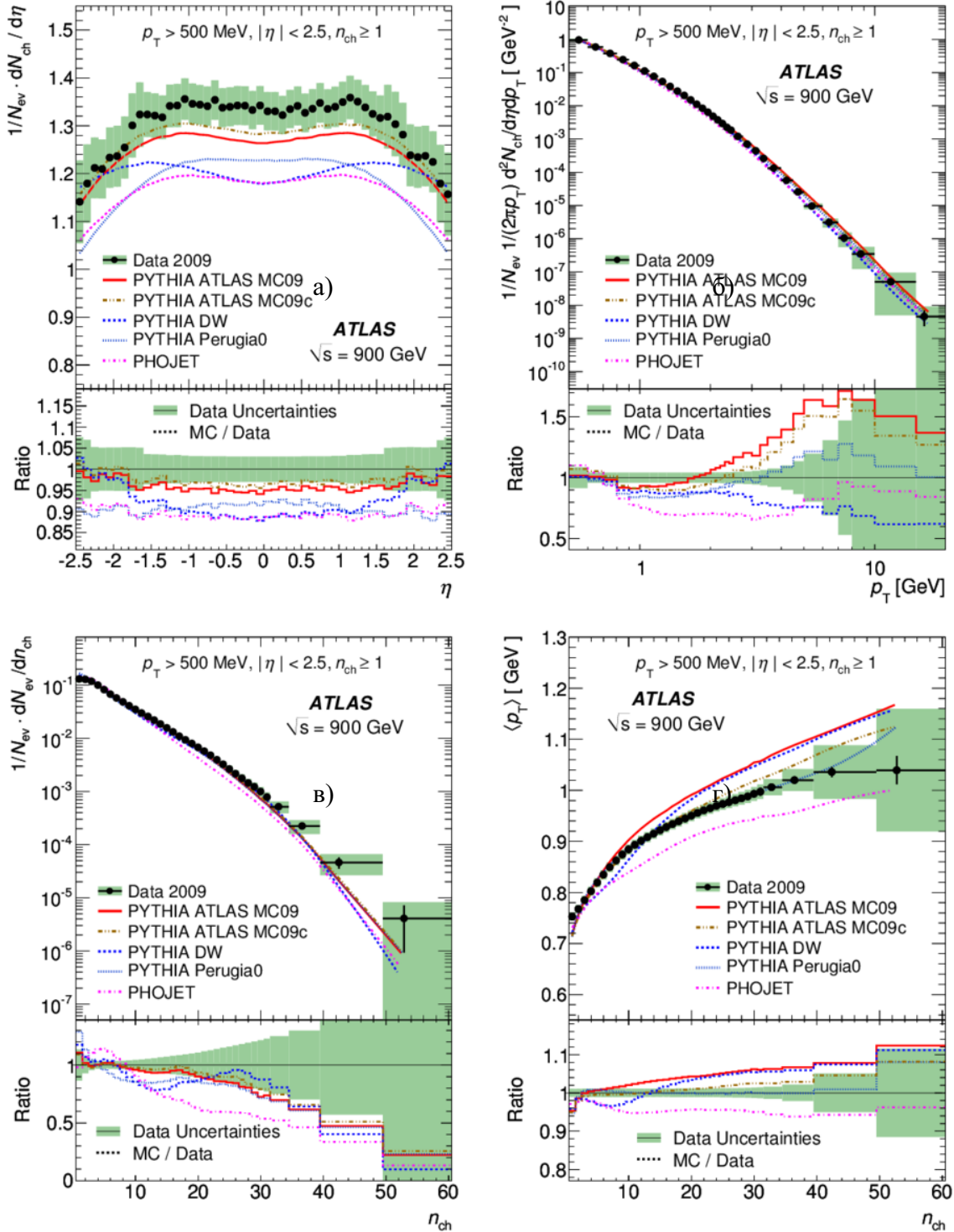


Рис. 1: Множественности заряженных частиц для событий с  $n_{ch} \geq 1$  в кинематической области  $p_T > 500$  МэВ/с и  $|\eta| < 2.5$ . Показаны распределения плотности заряженных частиц как функция псевдобыстроты (а) и поперечного импульса (б), множественности заряженных частиц в событии (в), и средний поперечный импульс как функция числа заряженных частиц в событии (г). Точки соответствуют данным, кривые - предсказаниям различных Монте-Карло моделей. Столбцы соответствуют статистическим неопределённости, затенённые области показывают квадратичные статистические и систематические неопределённости.



центре которого находится точка пересечения протонных пучков. Торцевые части представляют собой несколько дисков, закрывающие цилиндрическую часть детектора с обеих сторон.

Чувствительным элементом TRT является тонкостенная дрейфовая трубка диаметром 4 мм, в центре которой протянута анодная проволока диаметром 31 мкм. В центральной части трекового детектора переходного излучения дрейфовые трубки имеют длину 144 см и расположены параллельно оси детектора. Посредине каждой дрейфовой трубки на её анодной проволоке имеется разделитель, позволяющий снимать электронный сигнал с половины длины трубки. Трековый детектор переходного излучения в барреле позволяет определить только  $(R - \phi)$ -координату трека, где  $\phi$  - азимутальный угол в плоскости, перпендикулярной оси пучка  $z$ , а  $R$  - радиус в этой плоскости относительно оси детектора. В торцевых областях TRT дрейфовые трубки имеют длину 37 см и расположены радиально в пространстве между радиусами  $R$  от 644 до 1004 мм считая от оси пучка. Собственное координатное разрешение трубки составляет 130 мкм. Полное количество каналов считывания сигналов составляет 350848.

Пространство между трубками заполнено высокоструктурированными пластиковыми материалами, которые обеспечивают генерацию переходного излучения заряженных частиц при пересечении ими этого множества слоев. Фотоны переходного излучения регистрируются дрейфовыми трубками наряду с сигналами от ионизационных потерь (поэтому трековая система именуется трековым детектором переходного излучения). Эффективная регистрация переходного излучения позволяет разделять треки адронов и электронов. Рисунке 2 показана вероятность сигнала с высоким порогом, соответствующего регистрации  $\gamma$ -кванта переходного излучения, в зависимости от лоренц-фактора космического мюона. “Низким” порогом устанавливается регистрация треков при помощи ионизационных потерь в дрейфовом объёме, “высокий” порог отвечает за регистрацию фотонов переходного излучения.

TRT позволяет регистрировать треки заряженных частиц с точностью 118 мкм в центральной (баррельной) и 132 мкм в торцевых областях при 30-ти точках регистрации и производить идентификацию электронов в условиях высокой светимости (до  $7.7 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  как при  $pp$ -соударениях, так и при соударениях тяжёлых ионов).

На Рисунке 3 показано распределение среднеквадратичных отклонений (residuals) для координат хитов восстановленного трека в баррельной (а) и торцевой (б) областях трекового детектора переходного излучения при наложении следующих ограничений: величине поперечного импульса  $p_T > 2 \text{ ГэВ/с}$ , значениях прицельных параметров  $|d_0| < 10 \text{ мм}$  и  $|z_0| < 300 \text{ мм}$ , числе координат трека в TRT ( $n\text{TRTHits}$ )  $\geq 15$ . Величина среднеквадратичных отклонений ко-

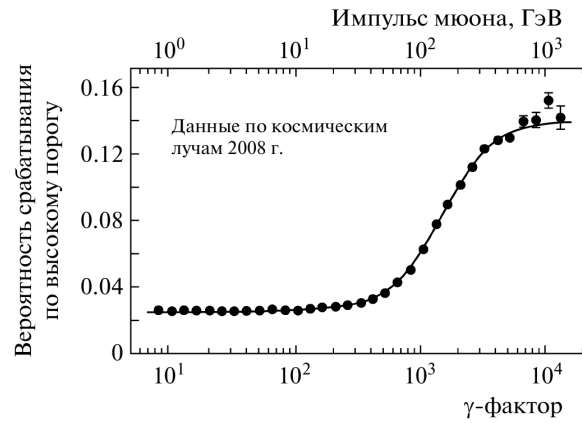


Рис. 2: Зависимость вероятности образования фотона переходного излучения в центральной части детектора TRT от лоренц-фактора космического мюона: точками показаны экспериментальные данные; линией – результат аппроксимации.

ординат хитов определялась как разница между радиусом дрейфа, полученным при измерении времени дрейфа, и радиальным положением трека, измеренным с помощью прецизионных хитов (координат треков, измеренных пиксельным и микростриповым кремниевыми детекторами). Гистограммы показывают Монте-Карло моделирование, точки - экспериментальные данные.

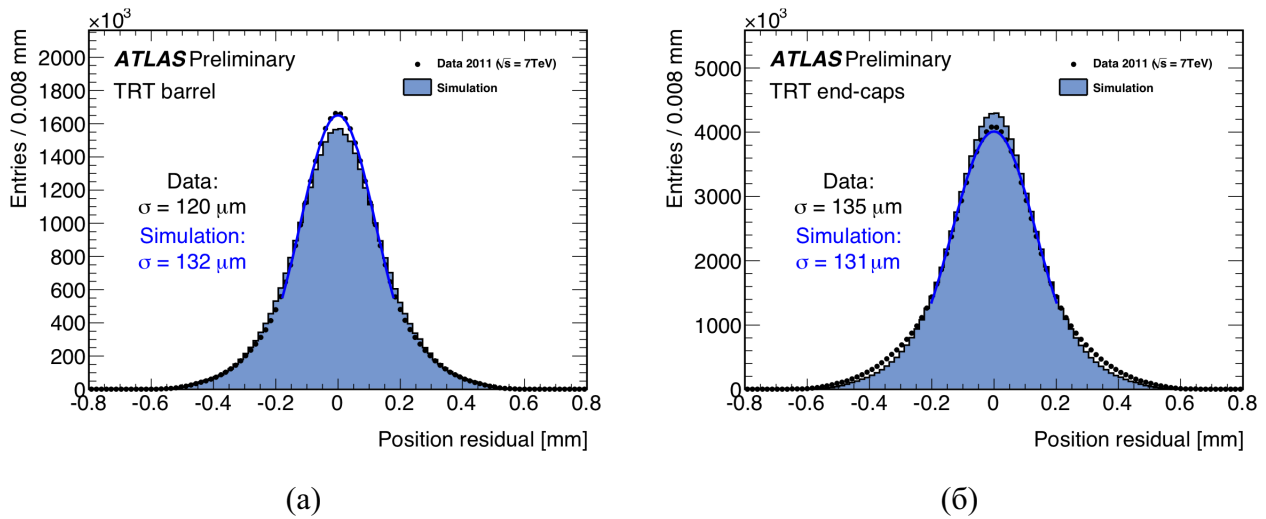


Рис. 3: Распределение среднеквадратичных отклонений координат хитов восстановленного трека в TRT: (а) - в баррельной части, (б) - в торцевой части детектора. Точками показаны данные 2011-го года, гистограммами - данные Монте-Карло моделирования.

Рисунок 4 показывает ширину среднеквадратичного отклонения координат хитов как функцию числа восстановленных первичных вершин. Использовались треки с  $p_T > 10$  ГэВ/с.

На Рисунке 5 изображены загрузки низкого и высокого порогов регистрации сигнала для различного количества восстановленных первичных вершин. Графики показывают загрузки, усреднённые по трём слоям дрейфовых трубок

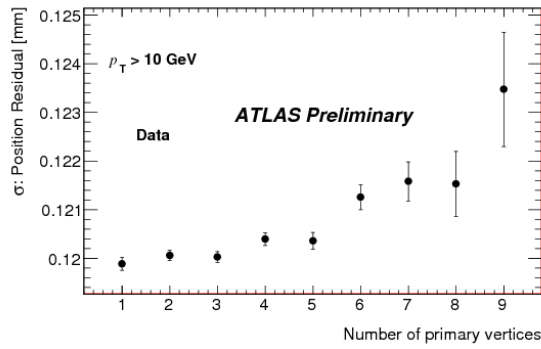
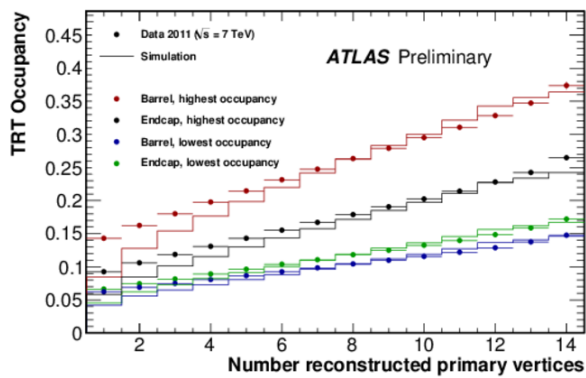
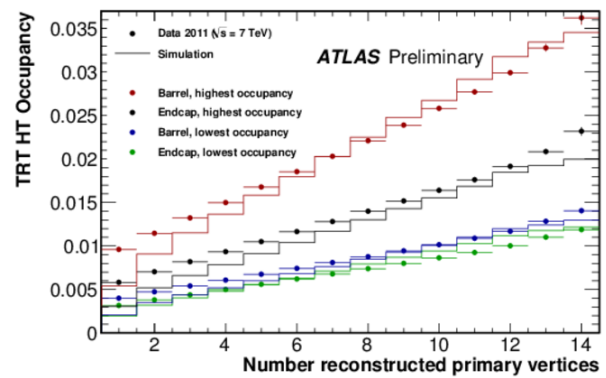


Рис. 4: Ширина средноквадратичного отклонения координат хитов восстановленного трека в детекторе TRT в зависимости от числа первичных вершин.

для наибольшего и наименьшего значения измеренных нагрузок в баррельных и торцевых частях детектора. Это иллюстрирует возможный диапазон нагрузок. Точки показывают измеренные значения, линии – Монте-Карло моделирование.



(а)



(б)

Рис. 5: Распределение средних нагрузок по всем областям детектора TRT в зависимости от числа первичных вершин. (а) - все хиты, (б) - хиты над высоким порогом. Точками показаны данные 2011-го года, линиями - данные Монте-Карло моделирования.

При эксплуатации детектора TRT в центре управления ATLAS осуществлялся круглосуточный мониторинг следующих подсистем детектора: высокого напряжения и низкого напряжения, газовой системы, системы охлаждения, системы газового усиления и эффектов старения. Регулярно производились калибровки детектора TRT и контроль качества собираемых с его помощью данных.

Показанная на Рисунке 6 эффективность регистрации хита в дрейфовой трубке определялась как отношение числа дрейфовых трубок с зарегистрированным хитом к общему числу трубок, пересекаемых треком, исключая первую и последнюю дрейфовые трубки. Около 2% известных нефункционирующих трубок исключались из данного исследования. К трекам применялись ограничения на число хитов: по крайней мере один в пиксельном детекторе, 6 в SCT и 15

в TRT, а также следующие ограничения:  $p_T > 1$  ГэВ/с,  $|d_0| < 10$  мм,  $|z_0| < 300$  мм. Эффективность для данных и Монте-Карло моделирования составила 94% и 95% соответственно. Эффективность в области плато хорошо описывается горизонтальной прямой на указанных уровнях.

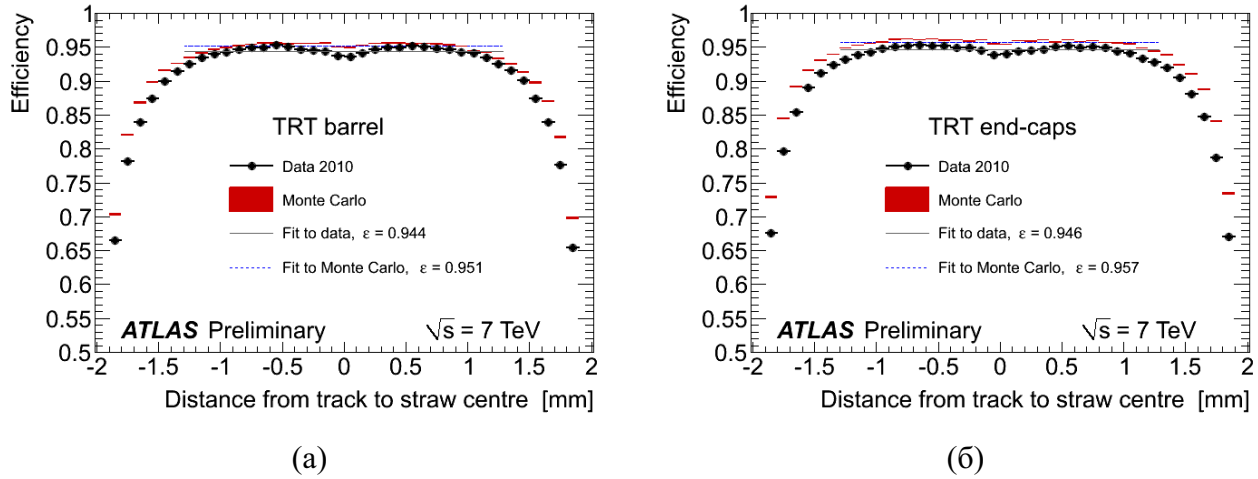


Рис. 6: Эффективность регистрации хита в зависимости от расстояния между треком и центром дрейфовой трубки: (а) - в баррельной части, (б) - в торцевой части детектора. Точками показаны данные 2011-го года, синей кривой - данные Монте-Карло моделирования.

Для представления данных TRT в унифицированном формате эксперимента ATLAS были разработаны программные алгоритмы создания трековых данных. С их помощью проведён анализ данных, полученных детектором TRT в 2011 г. Показано удовлетворительное согласие экспериментальных результатов с расчётами Монте-Карло.

Рассчитаны характеристики газовых смесей на основе  $Ar - Ar/CO_2/O_2$  с различным содержанием добавок для отдельных компонентов детектора TRT, которые использовались в сеансе набора данных при  $p - Pb$  взаимодействиях.

**Третья глава** посвящена описанию разработки газового пиксельного детектора GasPix в качестве возможного проекта для модернизации Внутреннего детектора ATLAS.

В качестве преимуществ газового пиксельного детектора необходимо отметить высокие точностные характеристики при эксплуатации в условиях больших нагрузок. GasPix представляет собой пиксельный сенсор, помещённый в объём, заполненный рабочим газом. Электрон-ионные пары образуются в рабочем газе вдоль трека заряженной частицы в дрейфовой области над специальной сеткой Micromegas. Под действием приложенного электрического поля электроны дрейфуют к сетке и фокусируются в её отверстиях (см. Рис. 7). К сетке приложено напряжение  $-400$  В по отношению к заземлённому пиксельному сенсору, что создаёт сильное электрическое поле в зазоре  $50$  мкм над сенсо-

ром, где происходит размножение электронной лавины. В результате каждый электрон, пролетающий через отверстие сетки, создаёт лавину, сигнал от которой регистрируется пиксельным сенсором. Определение времени прихода сигнала от лавины позволяет восстановить первоначальное положение электрона над поверхностью сенсора. Таким образом, детектор GasPix представляет собой время-проекционную камеру, чувствительную к отдельным электронам. Объединяя данные, полученные по нескольким первичным электронам, можно восстановить в пространстве отрезок трека пролетевшей заряженной частицы. Для технической реализации детектора GasPix существенными являются две технологии: защитный слой SiNProt, который предотвращает разрушение пиксельного сенсора при высоковольтных разрядах и InGrid – фотолитографический процесс нанесения сетки Micromegas на сенсор. Снабжённый сеткой Micromegas и защитным слоем SiNProt пиксельный сенсор представляет собой активный считывающий анод, заключённый в дрейфовый объём. Время отклика детектора, определяемое свойствами рабочего газа, величиной зазора усиления и величиной приложенного напряжения обязано соответствовать промежутку между столкновениями банчей пучка супер-LHC (25 нс).

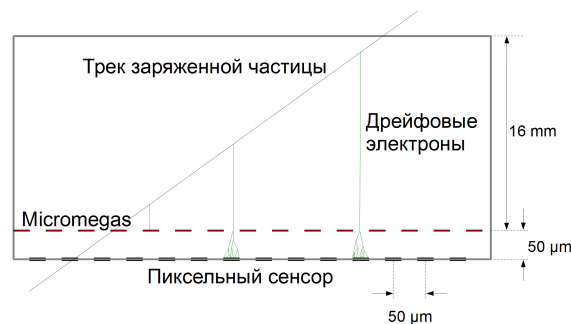


Рис. 7: Схема регистрации заряженной частицы в детекторе GasPix. Показаны трек заряженной частицы, дрейфовый объём, пиксельный чип, Micromegas-сетка и характерные размеры: высота дрейфовой камеры, величина промежутка между пиксельным чипом и Micromegas-сеткой, расстояние между пикселями.

Основными параметрами газовой смеси для предполагаемого варианта геометрии детектора GasPix являются: скорость дрейфа электронов и ионов в газовой среде дрейфовой камеры, величина диффузии в поперечной вектору электрического поля плоскости, значение угла Лоренца, плотность, стабильность усиления, отсутствие радиационного старения и полимеризации. Поставленной задачей было исследование вышеперечисленных свойств для возможных газовых смесей при различных значениях электрического и магнитного полей и окончательный выбор газовой смеси. Исследование проводилось с помощью компьютерного моделирования свойств газовых смесей, а также с помощью программного обеспечения для моделирования дрейфа электронов и ионов в раз-

личных конфигурациях электрического и магнитного полей (программный пакет Garfield). В процессе моделирования было проведено исследование более 50 различных газовых смесей на основе как органических, так и неорганических соединений. Оказалось, что наиболее подходящие для задач трекинга газовые смеси являются преимущественно легковоспламеняющимися и не удовлетворяют нормам безопасности ЦЕРНа. В числе иных вариантов могут использоваться смеси на основе  $Ar$  или  $Xe$  с различной долей добавок  $CO_2$ . Их недостатком являются значительно большие значения поперечной диффузии и угла Лоренца, чем у легковоспламеняющихся смесей с органическими добавками. В случае магнитных полей с меньшими, нежели проектная, интенсивностями, для задач трекинга являются удовлетворительными смеси  $Ar/CO_2$  и  $Xe/CO_2$ .

Выбраны оптимальные составы газовой смеси для работы детектора GasPix исходя из значений времени дрейфа, диффузии, угла Лоренца, стабильности газового усиления. Наиболее подходящими кандидатами являются газовые смеси  $DME/CO_2$  50/50 и  $Ar/CO_2$  70/30, которые были использованы в тестовых испытаниях детектора GasPix, выполненных на пучке SPH H4, ЦЕРН. Прототипы детектора GasPix были изготовлены группой NikHEF (Нидерланды). В ходе испытаний были получены координатные и угловые точности восстановления треков в детекторе GasPix в зависимости от величины напряжённости дрейфового поля и угла падения пучка на камеру. Первые результаты обработки тестовых данных показывают, что достигается координатная точность 19.4 мкм и точность определения азимутального угла  $0.47^\circ$  для угла  $20^\circ$ . Координатная точность превышает точность детектора TRT более чем в 6 раз и является сравнимой с собственным координатным разрешением детекторов Pixel (10 мкм по  $R-\phi$ ) и SCT (17 мкм по  $R-\phi$ ).

В четвёртой главе приведено описание характеристик рождения  $b$ -кварков при энергиях Большого Адронного Коллайдера. Приведены первые экспериментальные данные по наблюдению эксклюзивных распадов  $B$ -мезонов.

Для выяснения роли различных процессов в характеристиках сопутствующих частиц с помощью генератора событий PYTHIA 6.4 проведено моделирование угловых распределений заряженных частиц отдельно для событий с разными механизмами рождения  $b$ -кварков в  $pp$ -взаимодействиях при энергии 7 ТэВ. В анализе использовались заряженные частицы с  $p_T > 0.5$  ГэВ/с в интервале псевдобыстроты  $|\eta| < 2.5$ .

Получены предсказания для корреляций по азимутальному и пространственному углу в парах  $b$ -кварков в  $pp$ -взаимодействиях при 7 ТэВ. На Рис. 8 приведены распределения заряженных частиц относительно направления вылета  $b$ -кварка. Показано, что при больших углах разлета в парах  $b$ -кварков, как полных, так и азимутальных, можно выделить области, где в рождении  $b$ -кварков

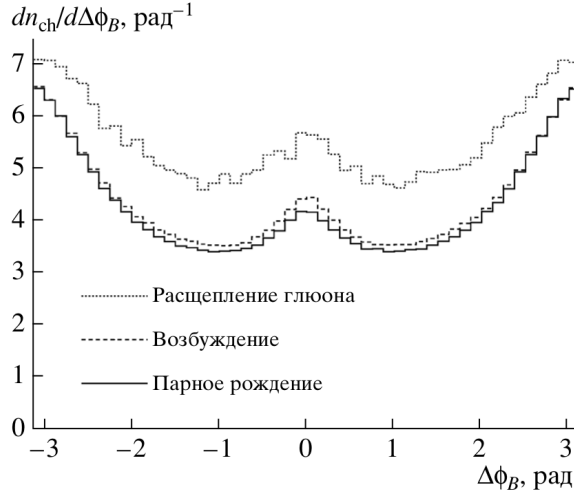


Рис. 8: Распределение числа  $n_{ch}$  заряженных частиц, имеющих  $p_T > 0.5$  ГэВ/с,  $|\eta| < 2.5$  по азимутальному углу в событиях с  $B$ -мезоном с  $p_T > 10$  ГэВ/с,  $|\eta| < 2.5$  ( $\sqrt{s} = 7$  ТэВ).  $\Delta\phi_B$  отсчитывается от лидирующей струи  $B$ -мезона, продукты его распада исключены.

будет преобладать механизм КХД лидирующего порядка. При малых углах разлета пары определяющими являются механизмы следующего за лидирующим порядком.

Впервые рассчитаны распределения заряженных частиц с  $p_T > 0.5$  ГэВ/с и псевдобыстротой  $|\eta| < 2.5$  по азимутальному углу относительно направления вылета  $b$ -кварка в событиях с разными механизмами рождения  $b$ -кварков. Предполагалось, что направление  $b$ -кварка определяется по характеристикам реконструкции эксклюзивных распадов  $B$ -адронов. В анализе использовались события с  $B$ -адронами с поперечным импульсом  $p_T > 10$  ГэВ/с и псевдобыстротой  $|\eta| < 2.5$ .

Показано, что плотности заряженных частиц сопутствующих событий при рождении  $b$ -кварков зависят от механизма рождения. Множественность сопутствующих событий выше для механизмов рождения, отвечающим нелидирующим порядкам КХД.

В эксперименте были реконструированы эксклюзивные распады  $B$ -мезонов по каналу  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ . В анализе использовалось приблизительно  $3.4 \text{ пб}^{-1}$  данных, собранных детектором ATLAS в  $pp$ -соударениях при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ. Для получения Монте-Карло набора данных применялся генератор PYTHIA 6.4 с настройками ATLAS MC09. Смоделированные события подвергались такому ограничению, чтобы поперечный импульс обоих мюонов от  $J/\psi$  был  $p_T > 2.5$  ГэВ/с. С помощью GEANT4 модели детектора ATLAS были рассчитаны сигналы моделированных событий в детекторе, на основе которых была проведена реконструкция событий с помощью алгоритмов анализа, использующихся для экспериментальных данных.

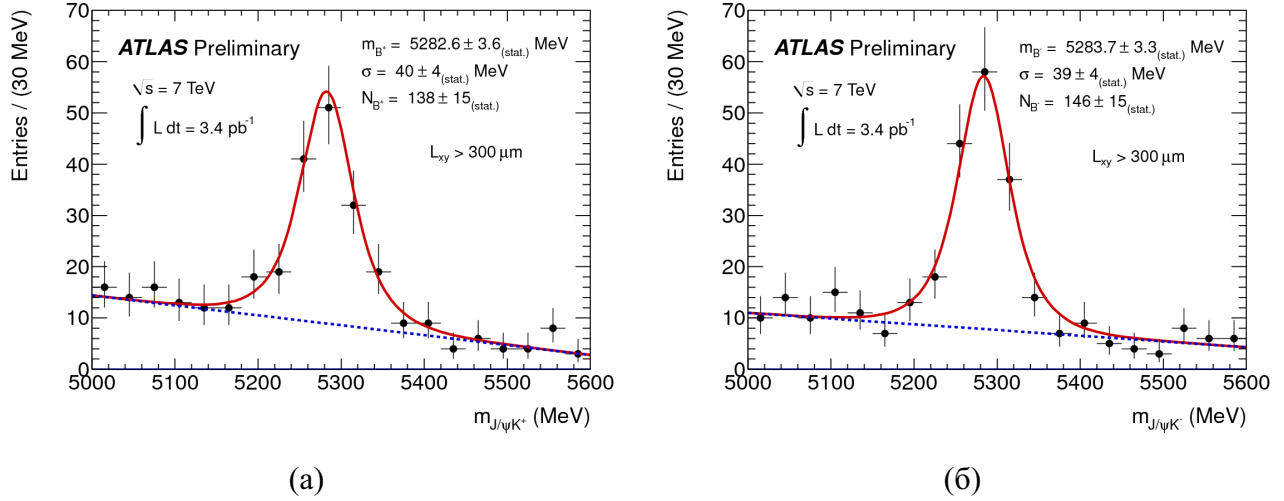


Рис. 9: Распределение инвариантной массы для восстановленных кандидатов  $B^+$ -мезонов (а) и  $B^-$ -мезонов (б). Точки с погрешностями показывают данные. Сплошные линии соответствуют результату фитирования методом максимального правдоподобия для всех кандидатов в диапазоне вокруг массы  $J/\psi K^\pm$ : от 5000 до 5600 МэВ. Пунктирные линии соответствуют фону.

На Рисунке 9 показаны распределения инвариантных масс экспериментальных событий отдельно для  $B^+$  и  $B^-$  кандидатов. Числа  $B^+$  и  $B^-$  кандидатов и их реконструированные массы совпадают в пределах статистической погрешности.

	$m_B$ , МэВ	$\sigma_m$ , МэВ	$N_{sig}$	$N_{bkg}$	S
$B^\pm$	$5283.2 \pm 2.5$	$39 \pm 3$	$283 \pm 22$	$131 \pm 13$	$1.09 \pm 0.07$
$B^+$	$5282.6 \pm 3.6$	$40 \pm 4$	$138 \pm 15$	$70 \pm 11$	$1.12 \pm 0.11$
$B^-$	$5283.7 \pm 3.3$	$39 \pm 4$	$146 \pm 15$	$61 \pm 8$	$1.06 \pm 0.10$
MC	$5281.8 \pm 3.3$	$39.8 \pm 0.2$	–	–	$1.100 \pm 0.003$

Таблица 1: Данные построения масс для  $B^\pm$ ,  $B^+$ ,  $B^-$  кандидатов. Число фоновых событий в диапазоне  $m_B \pm 3\sigma$ . Аналогичный анализ применён для MC набора данных. Показаны только статистические ошибки.

В таблице 1 приведены измеренные массы  $B^\pm$ -мезонов на экспериментальных данных, собранных детектором ATLAS в  $pp$ -соударениях при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ, соответствующих интегральной светимости  $3.4 \text{ pb}^{-1}$  с данными Монте-Карло моделирования. Массовое разрешение находится в хорошем согласии с Монте-Карло моделированием.

**Пятая глава** посвящена поиску редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и определению верхнего предела на относительную парциальную ширину этого распада на интегральной светимости  $2.4 \text{ fb}^{-1}$  в эксперименте ATLAS.



Процессы со сменой ароматов кварков посредством нейтральных токов в Стандартной модели являются сильно подавленными из-за того, что они соответствуют исключительно петлевым диаграммам Фейнмана высших порядков. Также присутствует дополнительный запрет вследствие киральной асимметрии таких распадов. Стандартная модель предсказывает очень малую относительную парциальную ширину для канала распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ :  $(3.2 \pm 0.2) \times 10^{-9}$ ; настолько малая величина относительной парциальной ширины позволяет полноправно называть подобные каналы распада редкими. Но в различных расширениях Стандартной модели, например в MSSM (Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели), такие процессы могут иметь значительно большую вероятность благодаря обмену тяжёлыми частицами, в том числе не принадлежащих Стандартной модели. Верхние пределы для относительной парциальной ширины распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  были опубликованы коллаборациями DØ, CDF, CMS и LHCb, и лежат в диапазоне  $(0.45-5.1) \times 10^{-8}$ .

В приведённом в диссертации анализе относительная парциальная ширина сигнального канала распада выражалась как

$$\text{BR}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \text{BR}(B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm \rightarrow \mu^+ \mu^- K^\pm) \times \frac{f_u}{f_s} \times \frac{N_{\mu^+ \mu^-}}{N_{J/\psi K^\pm}} \times \frac{A_{J/\psi K^\pm}}{A_{\mu^+ \mu^-}} \frac{\epsilon_{J/\psi K^\pm}}{\epsilon_{\mu^+ \mu^-}}, \quad (1)$$

где  $\text{BR}(B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm \rightarrow \mu^+ \mu^- K^\pm)$  - относительная парциальная ширина нормировочного канала (по данным PDG),  $\frac{f_u}{f_s}$  - относительная вероятность рождения  $B^\pm$  и  $B_s^0$ -мезонов (данные PDG),  $\frac{N_{\mu^+ \mu^-}}{N_{J/\psi K^\pm}}$  - отношение чисел событий для редкого и нормировочного каналов,  $\frac{A_{J/\psi K^\pm}}{A_{\mu^+ \mu^-}}$  - отношение акцептансов и  $\frac{\epsilon_{J/\psi K^\pm}}{\epsilon_{\mu^+ \mu^-}}$  - отношение суммарных эффективностей триггера и реконструкции для соответствующих каналов.

Физический анализ распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  использует события, отобранные с помощью димьюонного триггера и восстановленные в трековой системе Внутреннего Детектора и в мюонном спектрометре экспериментальной установки ATLAS.

При изучении редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  использовался так называемый “слепой анализ”, при котором область инвариантных масс от 5066 до 5666 МэВ (сигнальная область) была полностью исключена из анализа до окончательного выбора критериев отбора физических данных и методов подавления фоновых событий для данного канала распада. Такой подход позволяет насколько это возможно минимизировать влияние предвзятости при выборе частных методов во время наблюдения промежуточных результатов.

Кандидаты сигнальных событий были получены комбинированием всевозможных пар мюонных треков, исходящих из общей вторичной вершины.

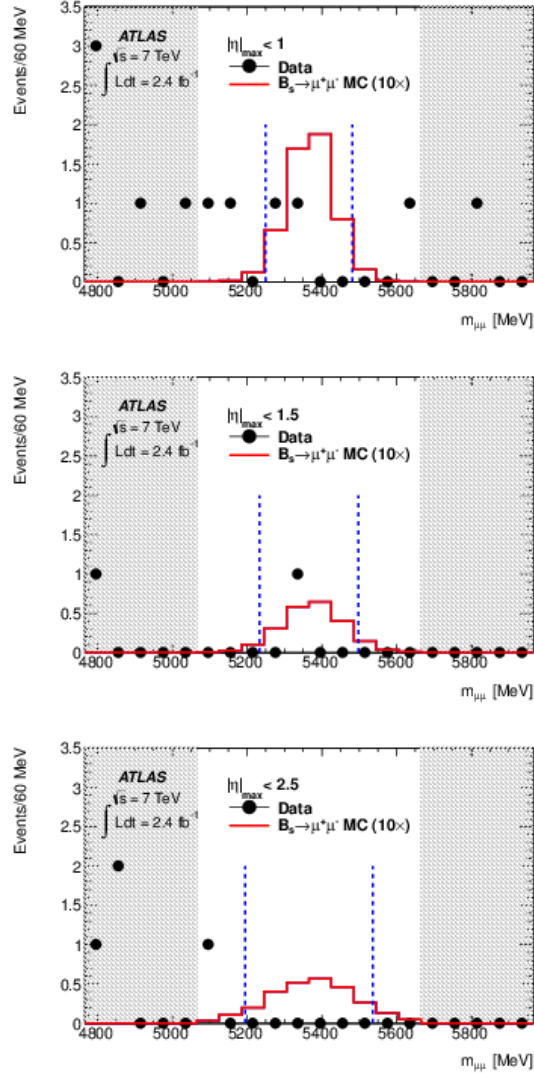


Рис. 10: Распределение инвариантной массы для кандидатов в физических данных в каждой группе разрешения инвариантных масс. Точки соответствуют выбранным кандидатам в физических данных, сплошные линии показывают Монте-Карло моделирование сигнала в предположении  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 3.5 \times 10^{-8}$ . Пунктирными линиями показаны оптимизированные границы массового окна. Серые области обозначают “боковые” области массового спектра.

Среди них производился отбор событий, состоящий из двух стадий. На первой стадии применялись ограничения на импульс мюонного трека и на качество восстановления  $B$ -вершины. Это отсекало значительную часть комбинаторных событий и наименьшим образом затрагивало сигнальные события. Второй стадией отбора являлось использование метода многофакторного анализа под названием BDT (Boosted Decision Trees, усиленные деревья принятия решений). Метод предполагает *тренировку* алгоритма, называемого классификатором BDT. На этом шаге используются два набора событий, в первом из которых содержатся исключительно сигнальные события, а во втором - только фоновые (например, полученные методом Монте-Карло). Затем определяется набор *входных переменных* для BDT. Такими переменными могут являться любые параметры событий, с тем условием, чтобы их поведение было различными для сигнала и фона. Процедура тренировки заключается в поиске функции от входных переменных, называемой *выходом классификатора*, удовлетворяющей минимальному наложению распределения выхода классификатора для сигнальных и фоновых событий. На следующем шаге, называемом *применением классификатора*, на вход такой функции подаются события из реального набора физических событий. После этого, зная распределения выхода классификатора для сигнала и фона, можно применить единый отбор к физическим событиям, основанный на выбранном пороговом значении классификатора.

На Рисунке 10 показаны распределения инвариантной массы для димюонных кандидатов в трёх группах, различающихся по разрешению инвариантной массы  $B$ -мезона. Можно видеть два кандидата в сигнальной области массового окна в диапазоне  $|\eta|_{max} < 1$ , один кандидат в диапазоне  $1 < |\eta|_{max} < 1.5$  и ни одного кандидата в диапазоне  $1.5 < |\eta|_{max} < 2.5$ .

Для нахождения верхнего предела относительной парциальной ширины сигнального канала распада использовался модифицированный частотный метод ( $CL_s$ ). В ходе данного метода измеряется соответствие наблюдаемого числа событий в каждой группе разрешения инвариантных масс с числом событий в наборе данных с сигналом вместе с предполагаемым фоном ( $CL_{s+b}$ ) и только с фоном ( $CL_b$ ). Все величины доверительных уровней определялись из специального Монте-Карло моделирования. Для оценки комбинаторного фона в таких наборах смоделированных событий использовались экспериментальные данные с событиями с чётными номерами из “боковых” областей.

Для установления верхнего предела относительной парциальной ширины использовалось отношение доверительных уровней:  $CL_s = CL_{s+b}/CL_b$ . Такой подход предотвращает фоновую флуктуацию, которая может вызывать недооценку уровня сигнала.

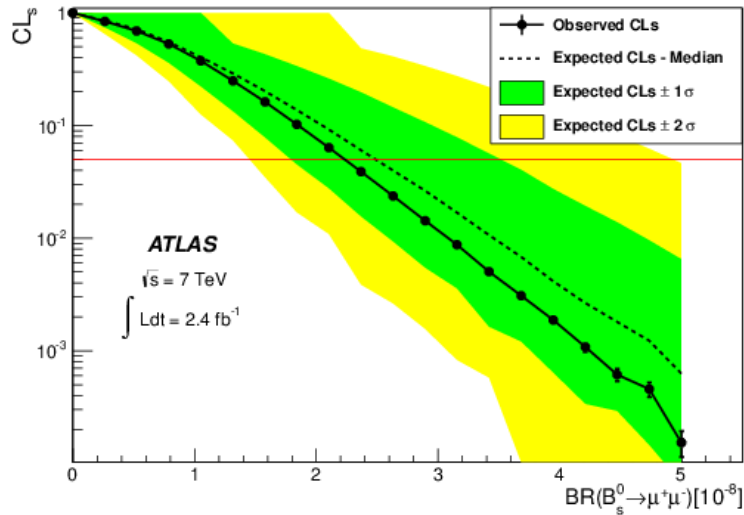


Рис. 11: Наблюдаемые значения доверительных уровней (круги) и пунктирная линия в предположении  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 3.5 \times 10^{-8}$ . Горизонтальная линия отмечает 95%-ный доверительный уровень. Тёмная (зелёная) и светлая (жёлтая) области соответствуют отклонениям  $\pm 1\sigma$  и  $\pm 2\sigma$  соответственно.

Рисунок 11 показывает зависимость отношения доверительных уровней  $CL_s$  от величины относительной парциальной ширины канала  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Каждой точке соответствует 300000 упрощённых Монте-Карло вычислений. В результате был установлен верхний предел относительной парциальной ширины канала  $2.2(1.9) \times 10^{-8}$  при 95% (90%) CL.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

1. А.С. Болдырев. Азимутальная асимметрия в событиях с рождением  $B^+$ -мезона в протонных соударениях в рамках эксперимента ATLAS на Большом Адронном Коллайдере. Материалы докладов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов”, Секция “Физика”, Издательство МГУ, Москва, 2009, с. 13.
2. G. Aad, ..., A. Boldyrev, ... [ATLAS Collaboration]\*. Charged-particle multiplicities in  $pp$  interactions at  $\sqrt{s} = 900$  GeV measured with the ATLAS detector at the LHC. Phys.Lett. B, 688, 2010, сс. 21-42.

3. L. Smirnova, A. Boldyrev. Physics with B-mesons in ATLAS. Nonlinear Phenomena in Complex Systems: Proceedings of the XXXIX International Symposium on Multiparticle Dynamics, T. 13, 2, 2010, сс. 132-135.
4. А.С. Болдырев. Мониторинг детектора переходного излучения на установке ATLAS. Материалы Международного молодежного научного форума “Ломоносов-2010”, [Электронный ресурс], Т. 1, издательство МАКС ПРЕСС, Москва, 2010, с. 5.
5. А.С. Болдырев, А.А. Мартынов, С.Ю. Сивоклоков, Л.Н. Смирнова, С.М. Турчихин. Процессы рождения и корреляции b-кварков при энергиях LHC. ЯФ, Т. 74, 12, 2011, сс. 1712-1720.
6. A.S. Boldyrev, S.Yu Lobanov, A.S. Maevsky, L.N. Smirnova, S.M. Turchikhin. Measurements and simulations of b and c-quark production at hadron colliders. Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Eighteenth Annual Seminar NPCCS'2011, T. 18, 2011, сс. 216-223
7. Л.Н. Смирнова, С.Ю. Сивоклоков, С.М. Турчихин, А.С. Болдырев. Мюонный триггер эксперимента ATLAS для pp соударений при 7 ТэВ. Тезисы докладов международной сессии – конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, Москва, 12-16 ноября 2012 г., с. 128.
8. А.С. Болдырев, В.Г. Бондаренко, В.Н. Бычков, Б.А. Долгошеин, О.Л. Федин, И.Л. Гавриленко, Ю.В. Гусаков, Н. Григалашвили, Я.В. Гришкевич, В.А. Канцеров, С.В. Катунин, Ф.Ф. Каюмов, Г.Д. Кекелидзе, Е.М. Хабарова, Н.В. Клопов, Н.В. Кондратьева, С.П. Коновалов, Н.А. Короткова, С.Н. Коваленко, В.А. Крамаренко, Л.Г. Кудин, И.А. Кудряшов, К.А. Левтеров, В.М. Лысан, С.П. Лобастов, В.П. Малеев, Р.Ю. Машинистов, В.В. Мялковский, С.В. Морозов, С.В. Муравьев, А.В. Надточий, Н.В. Никитин, О.В. Новгородова, Е.Г. Новодворский, С.Б. Олешко, С.К. Патричев, В.Д. Пешехонов, А.С. Романюк, Ю.Ф. Рябов, А.А. Савенков, Е.В. Седых, Д.М. Селиверстов, А.П. Шмелева, С.Ю. Сивоклоков, С.Ю. Смирнов, Л.Н. Смирнова, В.В. Сосновцев, С.И. Сучков, В.В. Сулин, В.О. Тихомиров, Л.Ф. Васильева, К.И. Жуков. Трековый детектор переходного излучения эксперимента ATLAS. Приборы и техника эксперимента, Т. 3, Май-Июнь 2012 г., сс. 27-39.
9. С.М. Турчихин, А.С. Болдырев, С.Ю. Лобанов, С.Ю. Сивоклоков, Л.Н. Смирнова. Поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  в эксперименте ATLAS. Тезисы докладов международной сессии – конференции Секции ядерной физики ОФН РАН, Москва, 12-16 ноября 2012 г., с. 140.

10. A.S. Boldyrev, S.Yu. Lobanov, L.N. Smirnova, S.M. Turchikhin, S.Yu. Sivoklov. Recent results on the search of  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  rare decay from the ATLAS experiment. Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Nineteenth Annual Seminar NPCA'2012, T. 19, 2012, pp. 26-36.

\*) Оппоненты диссертации Просин Василий Владимирович и Негодаев Михаил Александрович не являются членами коллаборации ATLAS.