

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

УДК 539.126

**Поликарпов Сергей Михайлович**

**Спектроскопия  $B_s^0$  мезонов в эксперименте CMS**

Специальность 01.04.23 физика высоких энергий

**Автореферат**

диссертации на соискание степени  
кандидата физико-математических наук

**Москва, 2019**

Работа выполнена в Лаборатории тяжёлых кварков и лептонов (ЛТКЛ) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» (ФИАН)

Научный руководитель: **Данилов Михаил Владимирович**,  
доктор физ.-мат. наук, профессор, академик Российской академии наук.

Научный консультант: **Чистов Руслан Николаевич**,  
кандидат физ.-мат. наук.

Официальные оппоненты: **Соколов Анатолий Александрович**,  
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

**Горелов Игорь Владимирович**,  
кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера» Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 10.06.2019 в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.023.02 ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук» по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Автореферат разослан «    »                    2019 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и на сайте института: [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 002.023.02,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Истомин Яков Николаевич

Основными задачами Большого адронного коллайдера (БАК) при его проектировании были поиск и изучение бозона Хиггса, поиск проявлений «Новой Физики», проверка теорий суперсимметрии, точное измерение параметров Стандартной Модели (СМ). Экспериментальное открытие бозона Хиггса в 2012 г. коллаборациями ATLAS и CMS является одним из самых ярких достижений современной науки. Несмотря на этот результат, завершивший открытие фундаментальных частиц СМ, её нельзя считать окончательно верной. В рамках СМ не описываются тёмная материя, природа массы у нейтрино, проблема иерархии масс фундаментальных частиц и преобладание вещества над антивеществом во вселенной. Поэтому поиск физики вне СМ остаётся одним из основных направлений исследований двух наиболее крупных коллабораций на БАК – ATLAS и CMS. Детектор ALICE оптимизирован для изучения столкновений тяжёлых ионов. Четвёртый большой эксперимент, LHCb, оптимизирован для изучения частиц, содержащих тяжёлые кварки, что позволяет, в том числе, проводить косвенные поиски проявлений «Новой Физики» и изучать  $CP$ -нарушение.

Для проверки теоретических моделей сильного взаимодействия важно изучение спектроскопии адронов, в частности, точные измерения их масс, времён жизни, поиск новых распадов и новых состояний. В последнее несколько лет экспериментами БАК (в основном, LHCb), открыто множество новых состояний адронов, включая:

- Возбуждённые состояния  $\Xi_b^{\pm,0}$  барионов в распадах на  $\Xi_b^{\pm,0}\pi^{\pm}$  и  $\Lambda_b^0 K^-$ ;
- Возбуждённые состояния  $\Lambda_b^0$  бариона в распадах на  $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ ;
- Возбуждённые состояния  $B^0$  и  $B^+$  мезонов в распадах на  $B^{+,0} \pi^- \pi^+$ ;
- Возбуждённые состояния  $B_c^+$  мезона в распадах на  $B_c^{(*)+} \pi^+ \pi^-$ ;
- Возбуждённые состояния  $\Omega_c^0$  бариона в распадах на  $\Xi_c^+ K^-$ ;
- Дважды очарованный барион  $\Xi_{cc}^{++}$  в распадах на  $\Lambda_c^0 K^- \pi^+ \pi^+$  и  $\Xi_c^+ \pi^+$ ;
- Возбуждённые состояния боттомония  $\chi_{b1}(3P)$  и  $\chi_{b2}(3P)$  в распадах на  $\Upsilon(3S)\gamma$ ;
- Возбуждённые состояния  $\Sigma_b^{\pm}$  барионов в распадах на  $\Lambda_b^0 \pi^{\pm}$ .

В последнее время также установлено существование многих частиц, не вписывающихся в классическую кварковую модель адронов, предполагающую существование только мезонов (состояний из кварка и анти-кварка) и барионов (состояний из трёх кварков). В частности, в 2003 году была открыта частица  $X(3872)$ , которая не может быть описана в классической схеме адронной спектроскопии, и до сих пор её состав и природа надёжно не установлены. Обнаружение этой частицы открыло эпоху спектроскопии т.н. экзотических адронов. Позднее коллаборация CDF на Тэватрон представила свидетельство существования частицы  $X(4140)$ , распадающейся на  $J/\psi\phi$ , в распаде  $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ , причём её измеренная естественная ширина существенно меньше ожидаемой ширины состояния чармония с такой массой. Было предложено, что  $X(4140)$  является связанным состоянием из двух мезонов (молекулой), тетракварком, или гибридным состоянием. Коллаборации Belle и BaBar не обнаружили значимого сигнала, не подтверждая тем самым результат CDF, однако, в последующем, коллаборации D0 и CMS подтвердили существование этой частицы, а позднее коллаборацией LHCb был проведён полный угловой анализ распада  $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ , в котором, помимо подтверждения существования частицы  $X(4140)$ , было установлено существование ещё трёх экзотических резонансов в системе  $J/\psi\phi$ . Коллаборацией Belle было открыто заряженное экзотическое состояние  $Z(4430)^\pm$ , распадающееся на  $\psi(2S)\pi^\pm$ , существование которого было затем подтверждено коллаборацией LHCb. Позднее коллаборация LHCb заявила об открытии состояний, распадающихся на  $J/\psi p$ , которые являются кандидатами в пентакварки – частицы, состоящие из 5 кварков. В 2016 г. коллаборация D0 заявила об обнаружении частицы  $X(5568)$  – кандидата в экзотическое тетракварковое состояние, распадающееся на  $B_s^0\pi^\pm$ . Коллаборация LHCb не подтвердила его существование, а среди теоретических работ есть как объясняющие это состояние, так и подвергающие сомнению его существование.

Данная работа посвящена поиску экзотических состояний, распадающихся на  $B_s^0\pi^\pm$ , а также исследованию  $P$ -волновых возбуждённых состояний  $B_s^0$  мезона.

## **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из двух связанных между собой исследований возбуждённых состояний  $B_s^0$  мезона. Первое посвящено поиску экзотического состояния  $X(5568)$  в распаде на  $B_s^0\pi^\pm$ , где для восстановления  $B_s^0$  мезона исполь-

зуются его распад на  $J/\psi\phi$ . В дополнение, проведён поиск экзотических состояний с массой от 5.5 до 5.9 ГэВ и шириной от 10 до 50 МэВ, распадающихся на  $B_s^0\pi^\pm$ . Во втором исследовании изучаются  $P$ -волновые состояния  $B_s^0$  мезонов  $B_{s2}^*(5840)^0$  и  $B_{s1}(5830)^0$  в распадах на  $B$  мезон и каон: в заряженном канале  $B^+K^-$  и, впервые, в нейтральном канале  $B^0K_S^0$ . В этих распадах измерены 6 разностей масс, 4 отношения вероятностей распадов, 2 отношения вероятностей распадов, умноженных на отношение сечений рождения, и естественная ширина  $B_{s2}^*$  мезона. Обе работы выполнены с использованием данных, набранных установкой CMS на Большом адронном коллайдере в 2012 г., в столкновениях протонов с энергией в системе центра масс, равной 8 ТэВ.

### **Актуальность и научная новизна диссертационного исследования**

Изучение спектроскопии прелестных частиц является актуальной областью физики высоких энергий, так как позволяет проверять предсказания разных теоретических моделей. Со времени создания кварковой модели адронов стало понятно, что она не исключает существование частиц из более, чем трёх кварков. Однако, экзотических частиц, состоящих только из  $u$ ,  $d$  и  $s$  кварков, не было обнаружено с достаточной достоверностью. Состояния из более, чем трёх кварков, включающие тяжёлые кварки, могут быть обнаружены более достоверно, из-за более ярких экспериментальных характеристик их распадов. В начале 2016 г. коллаборация D0 заявила об обнаружении частицы  $X(5568)$ , распадающейся на  $B_s^0\pi^\pm$  – кандидата в экзотическое тетракварковое состояние. Если её существование подтвердилось бы, это была бы первая открытая частица, состоящая из 4 разных кварков ( $b$ ,  $s$ ,  $u$ ,  $d$ ). Однако, её существование не было подтверждено коллаборацией LHCb, поэтому является актуальным провести поиск этой частицы в независимом эксперименте, чтобы, либо подтвердить её существование, либо установить более строгий верхний предел. В частности, эксперимент CMS позволяет провести поиск в кинематическом диапазоне  $(p_T, \eta)$ , близком к эксперименту D0, в отличие от кинематического диапазона LHCb.

Экспериментальной информации по  $P$ -волновым состояниям  $B_s^0$  мезонов довольно мало, открыты их распады только на  $B^{(*)+}K^-$ . Точное измерение их масс и естественных ширины и обнаружение новых распадов обогащает экспериментальные знания об этих состояниях, что позволит проверить теоретические предсказания и настроить теоретические модели.

## Цели и задачи исследования

Главными целями работы были:

- Поиск состояния  $X(5568)$ , распадающегося на  $B_s^0 \pi^\pm$ , в случае положительного результата, измерение массы и сечения рождения, умноженного на вероятность распада  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ , а в случае отрицательного результата поиска – установление верхнего предела на эту величину;
- Восстановление  $P$ -волновых состояний  $B_s^0$  мезона в распадах на  $B^{(*)+} K^-$ , измерение разностей масс в этих распадах и естественной ширины  $B_{s2}^*(5840)^0$  мезона;
- Обнаружение распада  $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^0 K_S^0$  и поиск распада  $B_{s1}(5830)^0 \rightarrow B^{*0} K_S^0$ , а также измерение их вероятностей по отношению к соответствующим распадам на  $B^{(*)+} K^-$  и измерение разностей между массами  $B_{s1,2}^{(*)}$  мезонов и суммой масс  $B^{(*)0}$  и  $K_S^0$  мезонов.

## Научные результаты, выносимые на защиту

- Метод проверки процедуры восстановления кандидатов  $B_s^0 \pi^\pm$  с использованием распадов возбуждённых состояний  $B^+$  мезона;
- Вычисление верхнего предела на долю  $B_s^0$ , рождающихся из  $X(5568)$ ;
- Вычисление верхнего предела на долю  $B_s^0$ , рождающихся из экзотических состояний, распадающихся на  $B_s^0 \pi^\pm$ , в зависимости от их массы и естественной ширины;
- Метод восстановления распадов  $B_{s1,2}^{(*)} \rightarrow B^{(*)+} K^-$ ;
- Метод восстановления распадов  $B_{s1,2}^{(*)} \rightarrow B^{(*)0} K_S^0$ ;
- Измерение естественной ширины  $B_{s2}^*(5840)^0$  мезона;
- Обнаружение распада  $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^0 K_S^0$  и свидетельство распада  $B_{s1}(5830)^0 \rightarrow B^{*0} K_S^0$ , а также измерение их вероятностей по отношению к соответствующим распадам на  $B^{(*)+} K^-$ ;

- Измерения разностей масс  $M(B_{s2}^*) - m_{B^+}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}}$ ,  $M(B_{s1}) - m_{B^{*+}}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}}$ ,  $M(B_{s2}^*) - m_{B^0}^{\text{PDG}} - m_{K_S^0}^{\text{PDG}}$ ,  $M(B_{s1}) - m_{B^{*0}}^{\text{PDG}} - m_{K_S^0}^{\text{PDG}}$ ,  $M(B^0) - M(B^+)$  и  $M(B^{*0}) - M(B^{*+})$ , где  $m_A^{\text{PDG}}$  означает известное значение массы частицы А.

## Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы демонстрируют возможность выполнять исследования по спектроскопии прелестных адронов на экспериментальной установке CMS, которая изначально не была оптимизирована для исследований в этой области. Полученный в ходе исследований верхний предел на долю  $B_s^0$  мезонов, рождающихся из распада экзотического состояния  $X(5568)$ , является наиболее строгим из результатов, представленных другими коллаборациями, и противоречит результату, представленному коллаборацией D0. Разработанные методы работы с данными и моделированием широко используются в других экспериментальных исследованиях по физике тяжёлых адронов в коллаборации CMS. Впервые исследованные распады  $P$ -волновых состояний  $B_s^0$  мезона на нейтральный  $B$  мезон и нейтральный каон обогащают знания об этих состояниях. Измеренные значения естественной ширины, масс и разностей масс (включая новые измерения) позволят уточнить табличные значения свойств частиц и настроить новые теоретические модели.

## Достоверность полученных результатов

Вычисленный верхний предел на долю  $B_s^0$  мезонов, рождающихся из распада  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ , согласуется с результатом коллаборации LHCb и полученными позже результатами коллабораций CDF и ATLAS, и является более строгим. Алгоритм восстановления кандидатов проверен изменением критериев отбора, при котором в полученном распределении массы  $B_s^0 \pi^\pm$  видны сигналы от известных распадов возбуждённых состояний  $B^+$  мезона на  $B^{(*)0} \pi^+$ . Измеренные массы  $B_{s2}^*(5840)^0$  и  $B_{s1}(5830)^0$  мезонов в канале  $B^+ K^-$  согласуются с предыдущими результатами коллабораций CDF и LHCb, также как и естественная ширина  $B_{s2}^*(5840)^0$  мезона. Измеренные разности масс и отношения вероятностей распадов также согласуются с предыдущими измерениями (для тех случаев, если они есть). Вероятности распадов  $P$ -волновых состояний  $B_s^0$  мезона на нейтральный  $B$  мезон и нейтральный каон, измеренные по отношению к вероятностям соответствующих распадов на заряженный  $B$  мезон и заряженный каон, согласуются

с теоретическими предсказаниями.

### **Личный вклад диссертанта**

Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, либо про его определяющем участии. Автор принимал активное участие в работе международной физической группы в коллаборации CMS по исследованиям в области В-физики. В работу по поиску  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$  автор внёс ключевой вклад. Все основные результаты работы получены автором, с использованием разрешения по инвариантной массе и отношения эффективностей, вычисленных иностранными коллегами. Исследование  $P$ -волновых  $B_s^0$  мезонов выполнено автором полностью. Кроме этого, автор принимал участие в наборе данных на установке CMS и в настройке триггерных алгоритмов.

### **Апробация работы**

Материалы, изложенные в данной диссертационной работе, опубликованы в работах [1–5], все из которых удовлетворяют требованиям ВАК: работы [1, 2] являются статьями коллаборации CMS, опубликованными в ведущих международных рецензируемых научных журналах, а работы [3–5] являются трудами конференций и опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus. Результаты неоднократно обсуждались на внутренних совещаниях коллаборации CMS. Также результаты были представлены автором на различных конференциях:

- European Physical Society Conference on High Energy Physics EPS-HEP 2017 (г. Венеция, Италия, 5–12 июля 2017);
- The 6th International Conference on New Frontiers in Physics ICNFP 2017 (г. Колимбари, Крит, Греция, 17–29 августа 2017);
- Физика элементарных частиц и космология 2018 (г. Москва, Россия, 9-10 апреля 2018);
- The Sixth Annual Large Hadron Collider Physics conference LHCP 2018 (г. Болонья, Италия, 5–9 июня 2018);
- The 20th Annual RDMS CMS Collaboration Conference (г. Ташкент и Самарканд, Узбекистан, 12–15 сентября 2018);



- The 4th International Conference on Particle Physics and Astrophysics ICPPA-2018 (г. Москва, Россия, 22-26 октября 2018).

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит введения, трёх глав, и заключения. Объём диссертации составляет 109 страниц, включая 30 рисунков и 29 таблиц. Список литературы включает 119 источников.

### **Краткое содержание диссертации**

**Во введении** изложены недавние результаты по спектроскопии тяжёлых адронов, включающие результаты по не экзотическим и экзотическим частицам, а также дана общая характеристика диссертационной работы.

**Во второй главе** описана экспериментальная установка CMS (Компактный мюонный соленоид) на ускорителе БАК, с помощью которой были набраны данные, используемые в работе. В частности, представлены основные поддетекторы экспериментальной установки, методы реконструкции частиц и описание работы триггерной системы, а также описание набора данных, использованного в работе, и описание алгоритма получения данных математического моделирования.

Экспериментальная установка CMS предназначена для изучения физики на шкале ТэВ, где многие учёные ожидали найти ответы на основные вопросы к Стандартной Модели путём обнаружения новых частиц или явлений, предсказываемых теориями за рамками Стандартной Модели. Название CMS присвоено неспроста: установка достаточно компактна, учитывая её сложность, в сравнении с, например, ATLAS, а также обладает очень хорошей идентификацией мюонов и высокой точностью измерения импульса мюонов благодаря мощному сверхпроводящему соленоиду. Схематическое изображение установки представлено на Рис. 1. Она состоит из слоёв разных детекторов, расположенных в центральной части цилиндрическими слоями (цилиндрическая часть), а также слоёв в торцах, ”закрывающих” цилиндрическую часть. Длина установки составляет 28.7 м, диаметр цилиндрической части равен 15 м, а вес – 14 000 тонн. Ключевыми элементами установки CMS являются внутренняя трековая система, электромагнитный калориметр, адронный калориметр и мюонная система. Между адронным калориметром и мюонной системой расположен большой сверхпроводящий магнит, обеспечивающий магнитное поле напряжённостью 3.8 Тл. Меж-

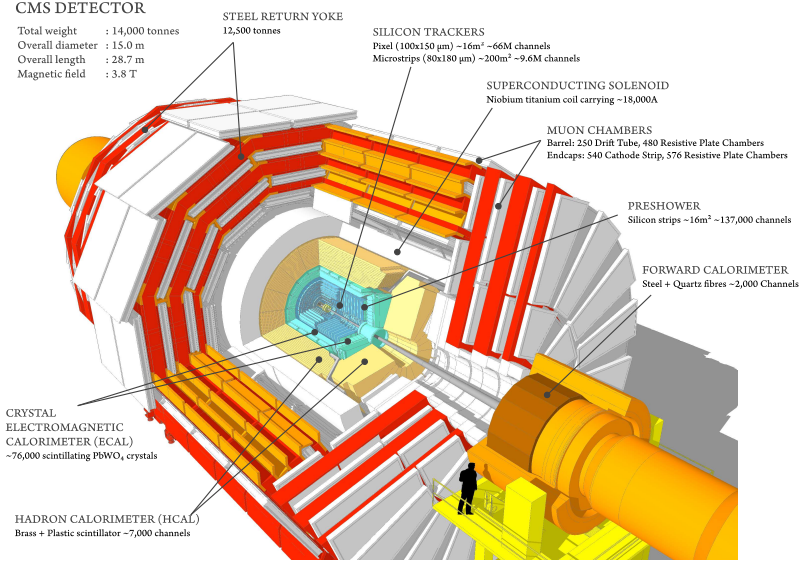


Рис. 1: Схематический вид слоёв установки CMS.

ду камерами мюонной системы расположены слои железа, выполняющие также роль возвратного ярма магнита.

**В третьей главе** описан поиск состояния  $X(5568)$ , распадающегося на  $B_s^0 \pi^\pm$ . **В первой части третьей главы** представлен обзор результатов других экспериментов по частице  $X(5568)$ . В начале 2016 г. коллаборация D0 заявила об обнаружении нового состояния в системе  $B_s^0 \pi^\pm$ , названного  $X(5568)$ , с измеренной массой и естественной шириной, соответственно,  $M_X = 5567.8 \pm 2.9$  (стат.) $_{-1.9}^{+0.9}$  (сист.) МэВ и  $\Gamma_X = 21.9 \pm 6.4$  (стат.) $_{-2.5}^{+5.0}$  (сист.) МэВ. Продукты её распада состоят из 4 разных кварков (b, s, u, d), что может быть объяснено молекулярной гипотезой (тесно связанные  $B^0$  и  $K^\pm$  мезоны), либо гипотезой о связанном состоянии четырёх кварков (тетракварк). Измеренная масса  $X(5568)$  на 200 МэВ ниже порога  $B^0 K^\pm$ , поэтому молекулярная гипотеза маловероятна. Коллаборация D0 также измерила  $\rho_X$  – отношение сечений рождения  $X(5568)$  и  $B_s^0$ , умноженное на неизвестную вероятность распада  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ , в двух кинематических диапазонах:  $8.6 \pm 2.4\%$  ( $8.2 \pm 3.1\%$ ) для  $p_T(B_s^0) > 10(15)$  ГэВ. Это от-

ношение является долей  $B_s^0$  мезонов, рождающихся из распада  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ , по отношению ко всем рождающимся  $B_s^0$  мезонам. Полученное значение этой доли, около 10% – неожиданно высокое.  $X(5568)$  представляет собой первый тетракварковый кандидат, в состав которого входят 4 разных кварка. Коллаборация LHCb на БАК первой не подтвердила результат D0, установив верхний предел на  $\rho_X$ :  $\rho_X^{LHCb} < 2.4\%$  на 95% уровне достоверности для  $p_T(B_s^0) > 10$  ГэВ и  $\rho_X^{LHCb} < 2.0\%$  @ 95% CL для  $p_T(B_s^0) > 15$  ГэВ. Эти пределы находятся в противоречии с измерениями D0, хотя и сделаны в других условиях и в другом кинематическом диапазоне. Затем коллаборация CMS представила свой результат поиска  $X(5568)$ : эта работа была выполнена с ключевым вкладом автора и описана в третьей главе диссертации. Верхний предел на отношение  $\rho_X$  (долю  $B_s^0$ , рождающихся из  $X(5568)$ ), вычисляется с использованием формулы

$$\rho_X \equiv \frac{\sigma(pp \rightarrow X(5568) + \dots) \times \mathcal{B}(X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm)}{\sigma(pp \rightarrow B_s^0 + \dots)} = \frac{N_{X(5568)}}{N_{B_s^0} \times \epsilon_{rel}},$$

где  $N_{X(5568)}$  ( $N_{B_s^0}$ ) – количество сигнальных событий  $X(5568)$  ( $B_s^0$ ), реконструированных в данных, а  $\epsilon_{rel} = \epsilon_{X(5568)}/\epsilon_{B_s^0}$  – относительная эффективность.

**В третьей части третьей главы** описан алгоритм реконструкции событий и детали используемых наборов моделирования. Восстановление кандидатов начинается с поиска двух мюонов противоположного заряда, образующих  $J/\psi$ -кандидат, совпадающих с теми, что вызвали срабатывание триггера. Затем димюонный кандидат комбинируется с двумя треками с инвариантной массой  $M(K^+K^-)$  в области  $\phi$  мезона, образуя  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ -кандидат. Требуется, чтобы его вершина была удалена от первичной вершины, а импульс был сонаправлен направлению из первичной вершины в восстановленную вершину  $B_s^0$ . С использованием аппроксимации распределения инвариантной массы, вычисляется эффективное разрешение по массе  $B_s^0$ , и определяются сигнальный и контрольные диапазоны массы  $B_s^0$ .

Далее описаны два набора данных моделирования: сигнальный (для сигнального процесса  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ , где  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$ ) и нормировочный (инклюзивный  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+K^-$ ). С использованием первого из них вычисляется разрешение по инвариантной массе  $B_s^0 \pi^\pm$ .

**В четвёртой части третьей главы** исследуется распределение инвариантной массы отобранных кандидатов  $B_s^0 \pi^\pm$ . В частности, распределение из сигналь-

ной области  $B_s^0$  сравнивается с распределением из контрольной области  $B_s^0$ , значимого отличия между ними не обнаружено, и ни на одном из них не видно пика на массе, где коллаборацией D0 заявлено существование частицы  $X(5568)$ . Для проверки процедуры реконструкции, критерии отбора изменяются так, что в сигнальный диапазон и в правый контрольный диапазон массы  $B_s^0$  даёт значимый вклад распад  $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ . При этом в распределении массы  $B_s^0 \pi^\pm$  из этих же двух диапазонов массы  $B_s^0$  ясно видны вклады от распадов возбуждённых  $V^+$  мезонов на  $B^{(*)0} \pi^\pm$ , который имеют такую же топологию, что и искомый сигнальный распад  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ . Затем, для получения численных ограничений на  $X(5568)$  и вычисления верхнего предела, производится аппроксимация распределения массы  $B_s^0 \pi^\pm$  из сигнальной области  $B_s^0$  суммой гладкой функции для описания фона и сигнальной функции, показанная на Рис. 2 для двух кинематических диапазонов. Полученное количество сигнальных событий  $X(5568)$  согласуется с нулём.

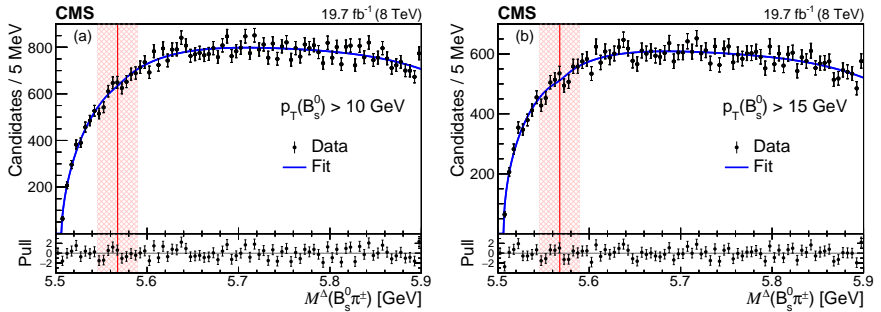


Рис. 2: Распределение по инвариантной массе  $B_s^0 \pi^\pm$  событий в сигнальном диапазоне  $B_s^0$  с наложенными результатами аппроксимации, полученное в двух кинематических диапазонах: (a)  $p_T(B_s^0) > 10$  ГэВ и (b)  $p_T(B_s^0) > 15$  ГэВ. Нижние графики показывают распределения «тяги», т.е. разности данных и функции аппроксимации, делённой на ошибку данных. Вертикальные штрихованные области показывают диапазон  $M_X \pm \Gamma_X$  вокруг массы  $X(5568)$ .

**В пятой части третьей главы** вычисляется верхний предел на долю  $B_s^0$  мезонов, рождающихся из распада  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ . Полученный верхний предел составляет  $p_X < 1.1\%(1.0\%)$  на уровне достоверности 95% для кинематического диапазона  $p_T(B_s^0) > 10(15)$  ГэВ, что противоречит результатам коллаборации D0. Причём, предел получен в кинематических условиях ( $p_T, \eta$ ), близких к условиям

эксперимента D0, в отличие от эксперимента LHCb. В дополнение, получен верхний предел на  $\rho_X$  в зависимости от массы и естественной ширины экзотического состояния  $X^\pm$ , распадающегося на  $B_S^0 \pi^\pm$ , для вычисления которого получены зависимости эффективности и разрешения по массе от значения массы  $B_S^0 \pi^\pm$ .

**В шестой части третьей главы** приведены результаты поиска кандидата в экзотическое тетракварковое состояние  $X(5568)$ . Существование состояния  $X(5568)$  не подтверждено. Полученный верхний предел на долю  $B_S^0$  мезонов, рождающихся из распада  $X(5568)$ , является более строгим, чем пределы, представленные другими коллаборациями.

**В четвёртой главе** описано исследование  $P$ -волновых состояний  $B_S^0$  мезона  $B_{s2}^*(5840)^0$  и  $B_{s1}(5830)^0$ . **В первой и второй частях** этой главы представлен обзор теоретических и экспериментальных результатов по  $P$ -волновым состояниям  $B_S^0$ , подтверждающий актуальность описанного в диссертации исследования. **В третьей части четвёртой главы** приведено краткое содержание исследования, включающее описание измеряемых величин и методы их вычисления.

**В четвёртой части четвёртой главы** представлены методы восстановления и отбора кандидатов. Реконструкция кандидатов похожа на процедуру, использованную в третьей главе. Восстановление кандидатов начинается с поиска двух мюонов противоположного заряда, образующих  $J/\psi$ -кандидат, который затем комбинируется с одним или двумя треками, формируя, соответственно,  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$  или  $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$  кандидат. Требуется, чтобы восстановленная вершина  $B$  кандидата была удалена от первичной вершины, а импульс был параллелен направлению из первичной вершины в восстановленную вершину  $B$  кандидата. Затем, для образования  $B^+ K^-$  кандидатов, дополнительный каон отбирается из треков, образующих первичную вершину, а для формирования  $B^0 K_S^0$  кандидатов, из специальной коллекции удалённых от области столкновений двух-трековых вершин отбирается кандидат  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ .

**В пятой части четвёртой главы** дана информация об используемых наборах данных моделирования. Всего используется 9 наборов моделирования, в которых сгенерированы распады  $B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-$ ,  $B_{s2}^* \rightarrow B^{*+} K^-$ ,  $B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-$ ,  $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0$ ,  $B_{s2}^* \rightarrow B^{*0} K_S^0$ ,  $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0$ ,  $B_2^* \rightarrow B^+ \pi^-$ ,  $B_2^* \rightarrow B^{*+} \pi^-$  и  $B_1 \rightarrow B^{*+} \pi^-$ .

**В шестой части четвёртой главы** исследуются распределения инвариантных масс отобранных  $B^+$  и  $B^0$  кандидатов. В случае распада  $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ , есть вероятность, что при реконструкции пион и каон будут перепутаны ( $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$ ),

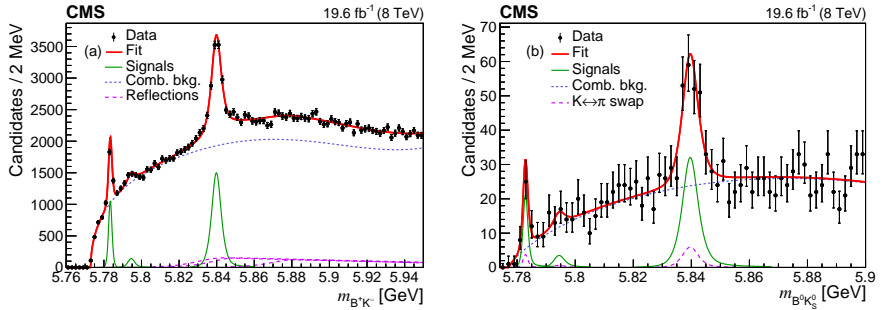


Рис. 3: Распределения инвариантной массы  $B^+K^-$  (a) и  $B^0K_S^0$  (b), полученные на данных. Чёрные точки показывают данные, красная кривая – полная функция аппроксимации, зелёные линии иллюстрируют вклады сигналов, а фон показан синей пунктирной линией. Розовые длинно-пунктирные кривые показывают: в (a) вклады от распадов  $B_{1,2}^{(*)} \rightarrow B^{(*)+}\pi^-$ , в (b) вклад  $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$  компоненты.

этот эффект изучается с использованием моделирования. В модель аппроксимации распределения инвариантной массы включается компонента с фиксированной формой, учитывающая возможность такого перепутывания, и доля  $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$  в сигнальном диапазоне  $B^0$  получается равной около 19%.

**В седьмой части четвёртой главы** анализируются сигналы от распадов  $B_{s1,2}^{(*)}$  мезонов на  $B^{(*)+}K^-$ . Разработан алгоритм учёта вкладов от распадов возбуждённых  $B^0$  мезонов на  $B^{(*)+}\pi^-$  в восстановленное на данных распределение массы  $B^+K^-$ . Для этого проведена аппроксимация полученного на данных распределения инвариантной массы  $B^+\pi^-$ , а также, с использованием моделирования, получены формы распадов  $B_2^* \rightarrow B^+\pi^-$ ,  $B_2^* \rightarrow B^{*+}\pi^-$  и  $B_1 \rightarrow B^{*+}\pi^-$ , если они восстановлены как  $B^+K^-$ -кандидаты. Из моделирования вычислены разрешения по инвариантной массе  $B^+K^-$ , затем проведена аппроксимация распределения инвариантной массы  $B^+K^-$ , из которой получены количества сигнальных событий распадов  $B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-$ ,  $B_{s2}^* \rightarrow B^{*+}K^-$  и  $B_{s1} \rightarrow B^{*+}K^-$ , разности масс  $M(B_{s2}^*) - m_{B^+}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}}$  и  $M(B_{s1}) - m_{B^{*+}}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}}$ , а также естественная ширина  $B_{s2}^*$  мезона. Результат аппроксимации представлен на Рис. 3 (a).

**В восьмой части четвёртой главы** исследуется распределение инвариантной массы отобранных  $B^0K_S^0$  кандидатов, показанное на Рис. 3 (b). С использованием моделирования получены разрешения по инвариантной массе и формы

вкладов от  $K^{\pm} \leftrightarrow \pi^{\pm}$  для трёх сигналов:  $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0$ ,  $B_{s2}^* \rightarrow B^{*0} K_S^0$  и  $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0$ . Проведена аппроксимация распределения  $m_{B^0 K_S^0}$ , вычислены значимости первого и третьего из этих распадов, они составляют, соответственно,  $6.3\sigma$  и  $3.6\sigma$ , что свидетельствует о первом обнаружении распада  $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0$  и первом свидетельстве распада  $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0$ .

**В девятой части четвёртой главы** вычислены отношения полных эффективностей изучаемых распадов, необходимые для вычисления отношений вероятностей распадов. **В десятой части четвёртой главы** описаны систематические погрешности измеряемых величин: отношений вероятностей распадов; отношений вероятностей распадов, умноженных на отношение сечений рождения  $B_{s1}$  и  $B_{s2}^*$  мезонов; шести разностей масс и естественной ширины  $B_{s2}^*$  мезона. Для каждого источника систематических погрешностей приведён алгоритм вычисления соответствующей погрешности. Полученные значения погрешностей и полные систематические погрешности приведены в таблицах в конце раздела.

**В последней части четвёртой главы** приведены результаты исследования  $P$ -волновых  $B_s^0$  мезонов: впервые обнаружен распад  $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0$  и получено первое свидетельство распада  $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0$ . Измерены отношения вероятностей распадов

$$R_2^{0\pm} = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)} = 0.432 \pm 0.077 \text{ (стат.)} \pm 0.075 \text{ (сист.)} \pm 0.021(\mathcal{B}),$$

$$R_1^{0\pm} = \frac{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)} = 0.492 \pm 0.122 \text{ (стат.)} \pm 0.068 \text{ (сист.)} \pm 0.024(\mathcal{B}),$$

$$R_{2^*}^{\pm} = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*+} K^-)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)} = 0.081 \pm 0.021 \text{ (стат.)} \pm 0.015 \text{ (сист.)},$$

$$R_{2^*}^0 = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)} = 0.093 \pm 0.086 \text{ (стат.)} \pm 0.014 \text{ (сист.)}.$$

Также измерены произведения сечений рождения на вероятности распадов

$$R_{\sigma}^{\pm} = \frac{\sigma(pp \rightarrow B_{s1} \dots) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)}{\sigma(pp \rightarrow B_{s2}^* \dots) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)} = 0.233 \pm 0.019 \text{ (стат.)} \pm 0.018 \text{ (сист.)},$$

$$R_{\sigma}^0 = \frac{\sigma(pp \rightarrow B_{s1} \dots) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\sigma(pp \rightarrow B_{s2}^* \dots) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)} = 0.266 \pm 0.079 \text{ (стат.)} \pm 0.063 \text{ (сист.)}.$$

Измеренные разности масс составляют

$$\begin{aligned}\Delta M_{B_{s2}^*}^{\pm} &= M(B_{s2}^*) - m_{B^+}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}} = 66.870 \pm 0.093 (\text{стат.}) \pm 0.073 (\text{сист.}) \text{ МэВ}, \\ \Delta M_{B_{s2}^*}^0 &= M(B_{s2}^*) - m_{B^0}^{\text{PDG}} - m_{K_S^0}^{\text{PDG}} = 62.370 \pm 0.478 (\text{стат.}) \pm 0.071 (\text{сист.}) \text{ МэВ}, \\ \Delta M_{B_{s1}}^{\pm} &= M(B_{s1}) - m_{B^{*+}}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}} = 10.452 \pm 0.089 (\text{стат.}) \pm 0.063 (\text{сист.}) \text{ МэВ}, \\ \Delta M_{B_{s1}}^0 &= M(B_{s1}) - m_{B^{*0}}^{\text{PDG}} - m_{K_S^0}^{\text{PDG}} = 5.612 \pm 0.225 (\text{стат.}) \pm 0.057 (\text{сист.}) \text{ МэВ}.\end{aligned}$$

Используя первое и третье измерение, определены массы  $B_{s1,2}^{(*)}$  мезонов:

$$M(B_{s2}^*) = 5839.857 \pm 0.093 (\text{стат.}) \pm 0.073 (\text{сист.}) \pm 0.151 (PDG) \text{ МэВ},$$

$$M(B_{s1}) = 5828.779 \pm 0.089 (\text{стат.}) \pm 0.063 (\text{сист.}) \pm 0.275 (PDG) \text{ МэВ}.$$

С использованием измерений выше, вычислены также разности масс между заряженными и нейтральными  $B$  мезонами:

$$M(B^0) - M(B^+) = 0.566 \pm 0.487 (\text{стат.}) \pm 0.098 (\text{сист.}) \pm 0.020 (PDG) \text{ МэВ},$$

$$M(B^{*0}) - M(B^{*+}) = 0.906 \pm 0.242 (\text{стат.}) \pm 0.085 (\text{сист.}) \pm 0.020 (PDG) \text{ МэВ}.$$

Разность масс  $M(B^{*0}) - M(B^{*+})$  измерена впервые, и в данной работе представлен новый метод измерения этих разностей масс.

Наконец, измерена естественная ширина  $B_{s2}^*$  мезона:

$$\Gamma(B_{s2}^*) = 1.52 \pm 0.34 (\text{стат.}) \pm 0.30 (\text{сист.}) \text{ МэВ}.$$

Полученные разности масс  $\Delta M_{B_{s2}^*}^{\pm}$  и  $\Delta M_{B_{s1}}^{\pm}$  и естественная ширина  $\Gamma(B_{s2}^*)$  находятся в согласии с предыдущими экспериментальными результатами коллабораций LHCb и CDF. Измеренные отношения  $R_{2^*}^{\pm}$  и  $R_{\sigma}^{\pm}$  согласуются с величинами, полученными коллаборацией LHCb.

**В заключении** описаны основные результаты диссертации. Работа выполнена с использованием данных, набранных экспериментальной установкой CMS в протон-протонных столкновениях на БАК при энергии в системе центра масс  $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$  и соответствующих интегральной светимости около  $20 \text{ фбн}^{-1}$ . Выполнены следующие задачи:

- Проведён поиск состояния  $X(5568)$ , распадающегося на  $B_S^0 \pi^{\pm}$ , установлен



верхний предел на долю  $B_s^0$ , рождающихся из распада  $X(5568)$ . Полученный предел является наиболее строгим на данный момент и находится в сильном противоречии с результатом коллаборации D0.

- Установлен верхний предел на долю  $B_s^0$ , рождающихся из распада экзотической частицы, распадающейся на  $B_s^0 \pi^\pm$ , в зависимости от массы и естественной ширины этой частицы.
- Восстановлены распады  $P$ -волновых состояний  $B_s^0$  мезонов  $B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-$ ,  $B_{s2}^* \rightarrow B^{*+} K^-$ ,  $B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-$ , измерены отношения  $\frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*+} K^-)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)}$  и  $\frac{\sigma(pp \rightarrow B_{s1} \dots) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)}{\sigma(pp \rightarrow B_{s2}^* \dots) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)}$ . Также в этих распадах измерены разности масс  $M(B_{s2}^*) - m_{B^+}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}}$  и  $M(B_{s1}) - m_{B^{*+}}^{\text{PDG}} - m_{K^-}^{\text{PDG}}$ , массы  $B_{s2}^*$  и  $B_{s1}$  мезонов и естественная ширина  $\Gamma(B_{s2}^*)$ .
- Впервые обнаружен распад  $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0$ , получено первое свидетельство распада  $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0$ ; измерены отношения  $\frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)}$ ,  $\frac{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)}$ ,  $\frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)}$  и  $\frac{\sigma(pp \rightarrow B_{s1} \dots) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\sigma(pp \rightarrow B_{s2}^* \dots) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)}$ . В дополнение, измерены разности масс  $M(B_{s2}^*) - m_{B^0}^{\text{PDG}} - m_{K_S^0}^{\text{PDG}}$  и  $M(B_{s1}) - m_{B^{*0}}^{\text{PDG}} - m_{K_S^0}^{\text{PDG}}$ .
- Новым методом измерены разности масс  $M(B^0) - M(B^+)$  и  $M(B^{*0}) - M(B^{*+})$ , где вторая измерена впервые.

## Публикации автора по теме диссертации

- [1] *CMS Collaboration, Sirunyan A. M. et al.* Search for the X(5568) state decaying into  $B_s^0 \pi^\pm$  in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // *Phys. Rev. Lett.* — 2018. — Vol. **120**. — no. 20. — P. 202005, arXiv:1712.06144, DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.202005.
- [2] *CMS Collaboration, Sirunyan Albert M et al.* Studies of  $B_{s2}^*(5840)^0$  and  $B_{s1}(5830)^0$  mesons including the observation of the  $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^0 K_S^0$  decay in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // *Eur. Phys. J. C.* — 2018. — Vol. **78**. — P. 939, arXiv:1809.03578, DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-6390-z.
- [3] *Polikarpov S.* Results on production and decay of B hadrons and onia and X(5568) state search in CMS // *Proceedings of Science.* — Vol. 314. — 2017. — Journal reference: PoS(EPS-HEP2017)395, DOI: 10.22323/1.314.0395.
- [4] *Polikarpov S.* Recent CMS B physics results // *EPJ Web of Conferences.* — Vol. 182. — 2018. — n. 02098, DOI: 10.1051/epjconf/201818202098.
- [5] *Polikarpov S.* Study of the  $P$ -wave  $B_s^0$  mesons at the CMS experiment in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV // *Proceedings of Science.* — Vol. 321. — 2018. — Journal reference: PoS(LHCP2018)184, DOI: 10.22323/1.321.0184.