

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Турчихина Семёна Михайловича «Распады  $B_c^+$  мезона и поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в эксперименте ATLAS», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Кандидатская диссертация С.М.Турчихина основана на анализе данных, набранных с использованием многоцелевого спектрометра ATLAS (в Европейском Центре Ядерных Исследований, ЦЕРН) в течение 2010-2012 г.г. Работа включает в себя две взаимосвязанные темы: измерение относительных парциальных ширин распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ , а также поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Необходимо отметить тот факт, что любая из двух указанных тем, является полноценной темой для кандидатской диссертации.

Диссертационная работа посвящена экспериментальной проверке Стандартной модели (СМ) и поиску новых распадов частиц, содержащих тяжелые кварки. **Актуальность** таких экспериментальных исследований не вызывает сомнений. Физика тяжёлых адронов, содержащих  $b$  и  $c$  кварки, является одной из наиболее динамично развивающихся областей современной экспериментальной физики высоких энергий. Измерение процессов рождения и распада таких состояний, их спектроскопии могут служить как для проверки предсказаний квантовой хромодинамики и уточнения параметров Стандартной модели, так и средством косвенного поиска проявлений новой физики, приводящих к отклонению измеряемых характеристик от предсказаний СМ.

Мезон  $B_c^+$  впервые наблюдался в 1998 г. в эксперименте CDF, но широкие возможности изучения его свойств открылись только с запуском БАК, благодаря высоким сечениям рождения  $b$  кварков при энергиях 7-8 ТэВ, большой статистике, накопленной в 2011-2012 гг., и использованию новейших детекторов: как специализированной установки LHCb, так и детекторов общего назначения ATLAS и CMS.

Редкий распад  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ , поиск которого также представлен в работе, представляет пример процесса, сильно подавленного в рамках СМ, вероятность которого чувствительна к вкладам физики за её пределами. До запуска БАК наблюдение и измерение относительной парциальной ширины этого распада оставались за пределами чувствительности существующих экспериментов, и ранние результаты его поисков давали лишь верхнее ограничение на эту величину. Анализ полного набора данных, собранных детекторами БАК в течение первого сеанса его работы, позволяет наблюдать этот распад на уровне предсказаний СМ.

**Новизна** проведённых исследований и полученных результатов состоит в следующем:

1. С использованием данных, набранных экспериментом ATLAS при энергиях пр соударений 7 и 8 ТэВ в 2011-2012 гг., измерены относительные парциальные ширины распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ , а также поляризация в распаде  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ . В ходе анализа впервые в эксперименте ATLAS была разработана и применена методика реконструкции распада, обладающего каскадной топологией с двумя смещёнными вершинами распадов  $B_c^+$  и  $D_s^+$  мезонов.
2. Проведён поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  с использованием данных эксперимента ATLAS, набранных в пр соударениях при энергии 7 ТэВ в 2011 г. Установлено верхнее ограничение на величину  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$ , которое являлось наиболее строгим в ATLAS на начало 2016 г.
3. Впервые в эксперименте ATLAS была разработана и использована методика полной реконструкции многочастичных эксклюзивных конечных состояний распадов  $b$ -адронов с использованием треков заряженных частиц, восстановленных внутренним трековым детектором на этапе отбора триггером высокого уровня ATLAS.

Все результаты, представленные в диссертации, получены в составе крупнейшей международной экспериментальной коллаборации, что обуславливает их **достоверность**. Они также находятся в согласии с результатами аналогичных измерений, выполненных в других экспериментах.

**Научная и практическая значимость** проделанной работы **не вызывает сомнения** и заключается в том, что полученные в ней экспериментальные результаты являются независимыми измерениями физических наблюдаемых, сравнение которых с теоретическими предсказаниями служит проверкой соответствующих моделей.

Измерение характеристик распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$  обладает точностью, сравнимой с более ранним измерением в эксперименте LHCb, и улучшит точность соответствующих мировых средних значений, публикуемых Particle Data Group. Разработанная и апробированная в анализе методика реконструкции распадов может быть использована для реконструкции более широкого класса распадов с аналогичными конечными состояниями на детекторах общего назначения БАК.

Защищаемое диссертантом верхнее ограничение на величину  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$  стало необходимым независимым подтверждением аналогичных результатов, полученных в экспериментах CMS и LHCb. Нарботки анализа данных ATLAS 2011 г. легли в основу более сложного анализа полного набора данных первого сеанса работы БАК 2011-2012 гг.

Новый алгоритм триггера высокого уровня для отбора полуплептонных распадов  $B \rightarrow$

$\mu^+\mu^-X$ , предложенный и разработанный С. М. Турчихиным, использовался при наборе данных в ATLAS, начиная с середины 2012 г. Это существенно увеличивает статистическую чувствительность физического анализа таких распадов с использованием этих данных.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, списков рисунков, таблиц и используемых сокращений, двух приложений. Объём работы составляет 142 страницы, она включает 58 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 178 наименований.

Во **введении** даётся обоснование актуальности темы работы, изложены её цели и задачи, описана новизна и практическая значимости исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описана экспериментальная установка ATLAS: подсистемы детектора, триггер, программная модель обработки данных. Приведены характеристики условий набора данных в эксперименте в течение первого сеанса работы БАК.

Во **второй главе** дан краткий обзор программы физики тяжёлых ароматов в эксперименте ATLAS, приведены ссылки на основные результаты. Также обсуждается текущее состояние теоретического описания и экспериментальных измерений сечений рождения  $b$ -кварков на адронных коллайдерах. Наконец, даётся более подробное описание триггера  $B$ -физики ATLAS и алгоритма триггерного отбора распадов  $B \rightarrow \mu^+\mu^-X$ .

**Третья глава** описывает физический анализ по измерению характеристик распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ . В начале главы дана краткая теоретическая мотивация этого анализа. Подробно описывается реконструкция и отбор сигнальных распадов, а также распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ , используемого в качестве нормировочного для измерения относительных парциальных ширин.

Для извлечения выходов сигналов и поляризации в распаде  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$  используется двухмерная аппроксимация инвариантной массы системы  $J/\psi D_s^{*+}$  и угла спиральности  $J/\psi$ -мезона. Такой метод существенно увеличивает чувствительность измерения поляризации по сравнению с одномерной аппроксимацией массы.

В конце главы приводятся результаты анализа. Измерены отношения парциальных ширин исследуемых распадов к нормировочному и между собой, а также доля поперечной поляризации в  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ . Доступные теоретические вычисления, сравнение с которыми приводится в работе, находятся в согласии с данными.

В **четвёртой главе** описан поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в данных, набранных в ATLAS в 2011 г. Даётся краткое теоретическое введение в физику подобных процессов. Описывается общая схема анализа: реконструкция и отбор кандидатов с использованием

многомерного классификатора, использование нормировочного канала распада  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ , установление верхнего предела на величину  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$ .

Более подробно описана методика оценки вклада эксклюзивных фоновых процессов — распадов нейтральных В-мезонов в пару лёгких адронов, разработка которой составляла непосредственный личный вклад диссертанта в данный анализ.

Оценивая работу в целом, можно отметить следующее. Диссертационная работа С. М. Турчихина выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты однозначно классифицируются как новые, обоснованные и обладающие большой научной и практической значимостью. Диссертация ясно изложена, написана грамотным языком, оформлена аккуратно. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. По материалам диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, результаты докладывались на ряде российских и международных конференций.

В то же время следует отметить ряд замечаний к работе:

1. Неполное описание физической программы эксперимента ATLAS.
2. Недостаточно подробно описан статистический метод  $CL_s$ , используемый для установления верхнего предела на относительную парциальную ширину распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в разделе 4.4.
3. Некоторые рисунки, например, 2.5 или 4.9, плохо читаются в чёрно-белом представлении. Впрочем, следует отметить, что в целом оформление рисунков выполнено довольно аккуратно.

Тем не менее, данные замечания не носят принципиального характера и **не снижают** научной ценности диссертации. Более того, представляется необходимым отметить тот положительный факт, что в основу исследовательской работы Турчихина С.М. положены конкретные экспериментальные исследования с очевидным практическим выходом, что выгодно отличает данную диссертацию от многих работ модельно-теоретического характера, в последнее время доминирующих в этой области физики.

Таким образом, диссертация С. М. Турчихина «Распады  $B_c^+$  мезона и поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в эксперименте ATLAS» является научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной проблеме современной физики элементарных частиц, и соответствует специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Полученные результаты являются новыми и имеют существенное значение для науки. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Работа полностью

удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а Турчихин Семён Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Отзыв составил:**

Директор ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ

НИЦ «Курчатовский институт»,

117218 г.Москва, Б.Черемушкинская ул., д. 25

Тел.: 8 (499) 123-80-93

e-mail: Victor.Egorychev@cern.ch

кандидат физико-математических наук



В.Ю.Егорычев

25/IV - 2016