

## 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

В основе кандидатской диссертации С. М. Турчихина лежит анализ экспериментальных данных о распадах В-мезонов, содержащих с-кварки, на кварконий типа  $J/\psi$  и D-мезоны, содержащие s-кварки, полученных международной коллаборацией ATLAS в Европейском Центре Ядерных Исследований CERN в течение 2010 – 2012 г.г.

Проводятся измерения относительных парциальных ширин таких распадов. Кроме того, приводятся результаты поиска редкого распада нейтрального В-мезона, содержащего s-кварк, на ди-мюонную пару.

**Актуальность** таких исследований очевидна, поскольку детальное измерение характеристик таких состояний может подтвердить предсказания, выполненные в рамках стандартной модели (СМ) или найти отклонение от них, что могло бы стимулировать поиск новой физики.

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

1. С использованием данных, набранных экспериментом ATLAS при энергиях  $pp$  соударений 7 и 8 ТэВ в 2011-2012 г.г., 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 методика реконструкции каскадного распада с двумя смещёнными вершинами  $B_c^+$  и  $D_s^+$  мезонов и пятью частицами в конечном состоянии.
2. Проведён поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  с использованием данных эксперимента ATLAS, набранных в  $pp$  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. В программном триггере высокого уровня эксперимента ATLAS была впервые разработана и применена методика реконструкции многочастичных конечных состояний полулептонных распадов b-адронов с парой мюонов в конечном состоянии  $B \rightarrow \mu^+\mu^-X$  с использованием треков заряженных частиц, восстановленных внутренним трековым детектором.

**Достоверность** данных коллаборации ATLAS и представленных в диссертации результатов подтверждается полным согласием с данными, полученными другими коллабора-

циями LHC, в частности, LHCb и CMS.

**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 для проверки соответствующих теоретических подходов.

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. Разработанная в ходе анализа методика реконструкции указанных конечных состояний может быть использована при исследовании других сходных распадов  $b$ -адронов на детекторах общего назначения LHC.

Защищаемое диссертантом верхнее ограничение на величину вероятности распада нейтрального  $B$ -мезона, содержащего  $s$ -кварк, на два мюона  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$  — подтверждение 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 LHC 2011-2012 г.г., представленного в марте 2016 г.

Важное методическое значение работы состоит в том, что новый триггерный алгоритм 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. Благодаря этому существенно возрастает чувствительность физического анализа таких распадов в этих данных, в частности, измерения угловых характеристик распада  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-K^{*0}$ , который ведётся в коллаборации ATLAS в настоящее время.

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

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

В **первой главе** даётся общая характеристика установки ATLAS на LHC. Описаны основные подсистемы детектора, триггер, программная модель обработки данных. Приведены характеристики условий набора данных в эксперименте в течение первого сеанса работы LHC в 2011 – 2012 г.г.

Во **второй главе** дан общий обзор программы  $B$ -физики эксперимента ATLAS, обоснована актуальность исследований тяжёлых адронов в данном эксперименте, кратко описаны

их основные направления и результаты, полученные с использованием данных первого сеанса работы. В конце главы приводится более детальное описание подсистемы триггера В-физики ATLAS и мюонного триггера, на котором она основана. В частности, описан алгоритм триггерного отбора распадов типа  $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ .

В **третьей главе** описан анализ по измерению характеристик распадов  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$  и  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ . В начале главы даётся физическая мотивация этого анализа. Описаны методы реконструкции и отбора этих распадов в экспериментальных данных ATLAS и измерения их парциальных ширины с использованием нормировочного распада  $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ , а также доли поперечной поляризации в распаде  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ .

Важно отметить, что для извлечения величин сигналов и поляризации в распаде  $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$  используется двухмерное фитирование инвариантной массы системы  $J/\psi D_s^{*+}$  и угла спиральности  $J/\psi$ -мезона. Такой метод существенно увеличивает чувствительность измерения поляризации по сравнению с одномерным фитированием массы, использовавшимся ранее в аналогичном анализе в эксперименте LHCb.

Описывается методика оценки систематических погрешностей измерения, приводятся результаты. Доступные теоретическими предсказания находятся в удовлетворительном согласии с данными.

В **четвёртой главе** даётся общее описание анализа по поиску редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Охарактеризованы основные этапы 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 детально описывается методика оценки вклада резонансных источников фона — распадов В-мезонов в пару заряженных пионов или каонов  $B_{(s)}^0 \rightarrow hh'$ , где оба дочерних адрона ложно идентифицируются как мюоны. В качестве результата приводится верхнее ограничение на величину относительной парциальной ширины  $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ .

Оценивая работу в целом, нужно отметить следующее. Диссертационная работа С. М. Турчихина выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и обладающие высокой научной и практической значимостью. Текст диссертации написан грамотным языком, работа ясно изложена и аккуратно оформлена. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. По материалам диссертации диссертант имеет 5 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК РФ. Результаты докладывались автором на ряде российских и международных конференций.

В то же время следует отметить два замечания к работе:

1. В диссертации отсутствует общее описание спектра физических задач эксперимента ATLAS. Описана лишь программа исследований по физике тяжёлых ароматов, тогда как эта область является лишь одной из многих не менее важных приоритетных для ATLAS направлений.
2. В разделе, посвящённом разработке триггера для отбора полуплептонных распадов  $B \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ , анализ его характеристик описан очень кратко. Приводится лишь грубая оценка эффективности отбора сигнальных процессов с использованием моделирования; отсутствует исследование возможных искажений, вносимых этим триггером, например, в угловые распределения отбираемых сигнальных распадов.

Тем не менее, данные замечания не носят принципиального характера и не снижают научной ценности диссертации. Отличительной особенностью диссертации Турчихина С. М. является ее практический, модельно независимый характер.

Таким образом, диссертация С. М. Турчихина «Распады  $B_c^+$  мезона и поиск редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  в эксперименте ATLAS» является 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 соответствует содержанию 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:**

Начальник сектора ЛЯП ОИЯИ

141980, Дубна, Московская обл.,

ул. Жолио Кюри, д.6

Тел.: 8 (49621) 63831

e-mail: Gennady.Lykasov@cern.ch

профессор, доктор физико-математических наук

Подпись Г.И. Лыкасова заверяю



*Г. И. Лыкасов*  
Г. И. Лыкасов  
29.04.2018 г.

директор ЛЯП А.В.Бедняков