

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Тодышева Корнелия Юрьевича “Аннигиляция электронов и позитронов в адроны в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ”**, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Актуальность исследования

Диссертация Тодышева Корнелия Юрьевича посвящена определению полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны при значениях энергии E в системе центра инерции сталкивающихся частиц в диапазоне от 1.84 до 3.72 ГэВ. Соответствующие измерения были выполнены в Институте ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера в городе Новосибирске, где с 2002 года на ускорительно-накопительном комплексе ВЭПП-4М с помощью детектора КЕДР ведутся эксперименты по изучению процессов аннигиляции e^+e^- -пар. Именно измерение полного сечения e^+e^- -аннигиляции в адроны является, пожалуй, наиболее прямым подтверждением того, что кварки обладают цветом. Результат принято представлять в виде отношения (R) сечения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})$ к борновскому сечению рождения мюонной пары $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$. Надёжное знание величины R представляет принципиальный интерес для кварковой модели и многочисленных её феноменологических приложений и, конечно, для расчётов в рамках квантовой хромодинамики (КХД). В изучаемой области энергий в процессе $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ на фоне непрерывного спектра рождаются узкие резонансы J/ψ и $\psi(2S)$, являющиеся связанными состояниями пары тяжёлых кварков c и \bar{c} . Их параметры определяются в диссертации с высокой точностью. Данные по обоим измеряемым на опыте компонентам сечения e^+e^- -аннигиляции в адроны — величине непрерывного фона, и вкладе узких резонансов — дают возможность проверить гипотезы, лежащие в основе современной теории элементарных частиц.

В диссертации К. Ю. Тодышева представлены результаты, которые определяют мировой уровень экспериментальных данных по измерению величины отношения $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$ в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ и произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для узких $c\bar{c}$ -резонансов $\psi(2S)$ и J/ψ . Эти фундаментальные величины измерены с наилучшей в мире точностью. Автором создана система оперативного контроля качества данных, используемая в экспериментах с детектором КЕДР. Разработанный им практический метод настройки первичного генератора моделирования распадов чармония методом Монте-Карло будет использован в последующих экспериментах. Способ даёт надёжную и точную оценку систематических неопределённостей эффективности регистрации событий, что в сочетании с достаточно простой реализацией обеспечивает его значительное преимущество по сравнению с ранее применявшимися методами.

Материалы диссертации были представлены автор в его докладах на целом ряде международных конференций, труды которых изданы в периодических научных

изданиях. Из всего сказанного выше следует, что тема диссертации современна и актуальна.

Достоверность исследования

В диссертации изложены все этапы получения с помощью детектора КЕДР на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М высокоточных данных по сечению процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны и величине R в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ, а также высокоточному определению величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны для узких $c\bar{c}$ -резонансов $\psi(2S)$ и J/ψ . Большое внимание уделено определению систематических погрешностей результатов измерений, процедуре моделирования и теоретическому анализу полученных данных.

Диссертация написана ясным языком. Изложение материала тщательно продумано. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, таких как Physics Letters B, Journal of High Energy Physics и Успехи Физических Наук. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о достоверности исследования и высокой степени обоснованности научных результатов, представленных в диссертации.

Научная новизна работы

В целом диссертация К. Ю. Тодышева представляет собой существенный законченный этап исследований в области экспериментальной физики элементарных частиц, имеющий **научную ценность**. В ней получены **оригинальные** результаты, находящиеся на современном **мировом** уровне и определяющие этот уровень. В диссертации автор продемонстрировал владение всем **современным** арсеналом методов экспериментальной физики высоких энергий, направленных на всестороннее изучение процесса e^+e^- -аннигиляции в адроны. Им развито **новое направление** прецизионного измерения полного сечения процесса $e^+e^- \rightarrow$ адроны в предасимптотической области энергий.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и списков иллюстраций и таблиц с данными. Представленные рисунки и таблицы наглядно иллюстрируют результаты измерений.

Во **Введении** кратко описан исторический путь, пройденный в экспериментах, посвящённых исследованиям процессов электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Сформулирована цель работы, состоящая в высокоточном измерении двух основных компонент сечения реакции $e^+e^- \rightarrow$ адроны в области энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ — сечения континуума и сечения рождения узких $c\bar{c}$ -резонансов, — представляющих собой фундаментальные величины, востребованные для проверки современной кварк-глюонной модели адронов. Перечислены полученные автором научные результаты и положения выносимые на защиту.

В **первой главе** описаны фундаментальные теоретические положения квантовой хромодинамики (КХД), которые послужили главной мотивацией для представленных в работе экспериментальных исследований. Приведены теоретические формулы, используемые для подгонки сечения резонансов с квантовыми числами $J^{PC} = 1^{--}$. Рассмотрены три важных случая применения экспериментальных результатов по определению величины R . Обсуждены данные,

полученные ранее в экспериментах коллабораций MARK-I и BES-II, и методы их анализа. Приведены также подробные формулы для вычисления инклюзивного адронного сечения в области узкого 1^{--} -резонанса с учётом радиационных поправок и интерференции с нерезонансным фоном в однофотонном канале. Обсуждены феноменологические подходы к решению проблемы когерентности резонансного и фонового вкладов. Глава заканчивается кратким обзором современных теоретических методов расчёта спектра чармония. У этой главы важная роль, она демонстрирует сложность объекта экспериментального исследования — полного сечения аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$.

Во **второй главе** описан ускорительный комплекс ВЭПП-4М и установленный на нём детектор КЕДР. Сначала приведены основные характеристики комплекса и подробно изложены реализованные на ВЭПП-4М методы измерения энергии сталкивающихся e^+e^- -пучков: метод резонансной деполяризации и метод обратного комптоновского рассеяния. Затем описаны все основные подсистемы детектора КЕДР и их характеристики: вершинный детектор, дрейфовая камера, аэрогелевые черенковские счётчики, время-пролётные сцинтилляционные счётчики, цилиндрический электромагнитный калориметр, торцевой электромагнитный калориметр на основе кристаллов CsI, мюонная система, система регистрации рассеянных электронов, монитор светимости, сверхпроводящая магнитная система детектора, система сбора данных и триггер — система аппаратного отбора событий. Представлена информация о статистике, набранной с помощью детектора КЕДР в 2001-2015 гг. на ВЭПП-4М в экспериментах по определению параметров J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов и исследованию их эксклюзивных мод распада и в экспериментах по сканированию величины R .

Третья глава диссертации посвящена изложению анализа данных эксперимента по определению величины R в области энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ. Сначала описана схема проведения экспериментов в сезонах 2010-2011 гг. и в 2014-2015 гг. и приведены впечатляющие данные для наблюдаемого сечения $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ в зависимости от энергии для сканирований, выполненных совместно с набором интеграла светимости в области узких резонансов (рисунки 3.1 и 3.2). Затем изложена процедура анализа экспериментальных данных. Далее описаны критерии отбора адронных событий, методы измерения и контроля светимости. Одну из ключевых частей приведённого в диссертации анализа данных составляют программы моделирования физических процессов, происходящих в детекторе. Их достоверное описание на каждой стадии моделирования необходимо для точного определения эффективности регистрации рассматриваемых процессов. Автор подробно описывает какие программы использовались для моделирования и проводит сравнение различных распределений для процессов $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$, полученных путём моделирования, с экспериментальными данными. На всех распределениях, представленных на рисунках 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 и 3.8, наблюдается удовлетворительное согласие между экспериментальными данными и моделированием. Представлены также результаты расчётов эффективности регистрации адронных событий для континуума u -, d - и s -кварков и вкладов от фоновых процессов рождения лептонных пар и двухфотонного рождения частиц, полученные из моделирования. Даны оценки вклада пучкового фона в наблюдаемое адронное сечение, полученные из экспериментальных данных, записанных в эксперименте при разведённых e^+e^- -пучках. Приведён расчёт

радиационной поправки. Одной из важных особенностей представленного в диссертации эксперимента является прямой учёт вклада в наблюдаемое сечение узких резонансов. Сканирование, выполненное с прецизионным измерением энергии накопителя в непосредственной окрестности резонансов, позволяет определить с высокой точностью их основные параметры, что в рассматриваемом анализе используется для вычисления сечения континуума. В заключение представлены результаты измерения величины R_{uds} . Глава производит цельное впечатление.

В самой большой **четвёртой главе** диссертации приведены итоговые результаты измерений величины R и обсуждаются вопросы, связанные с исследованием и достоверной оценкой систематических неопределённостей выполненного эксперимента. Здесь автор по-настоящему разошёлся! Чувствуется эмоциональный подъём, с которым излагаются использованные в деле многочисленнейшие приёмы и методы оценки систематических ошибок. Основные 12 вкладов в систематическую неопределённость величины R в эксперименте КЕДР приведены в диссертации в таблицах 4.1, 4.2 и 4.3. Основным методом оценки систематических неопределённостей, который использует автор, является сравнение результатов различных альтернативных вариантов моделирования процессов на всех его этапах, начиная с генерации исходных частиц и заканчивая рассмотрением эффективности восстановления треков при реконструкции событий. Способ оценки систематических погрешностей методом вариаций критериев отбора используется как вспомогательный. В разделе 4.2 этой главы обсуждается очень интересная и реально сложная проблема моделирования uds -континуума в процессе однофотонной e^+e^- -аннигиляции в адроны в области не слишком высоких энергий. Подробно описаны систематические неопределённости величины R , связанные с измерениями светимости, моделированием uds -континуума, вычислением радиационной поправки, работой детектора и накопителя, а также неопределённости, оцениваемые при вариации условий отбора адронных событий. Итоговые результаты эксперимента по измерению величины R в 22 точках по энергии в диапазоне от 1.84 до 3.72 ГэВ, полученные с помощью детектора КЕДР на ускорительном комплексе ВЭПП-4М, и их сравнение с результатами других экспериментов и расчётом, выполненным в рамках пертурбативной КХД и учитывающим вклад узких резонансов, представлены в таблице 4.14 и рисунках 4.12 и 4.13 в разделе 4.6. Видно, что данные детектора КЕДР являются на сегодняшний день лучшими по точности. Средневзвешенное экспериментальное значение R_{uds} , равное $2.225 \pm 0.020 \pm 0.047$, хорошо согласуется с теоретическим расчётом, выполненным в рамках теории возмущений КХД и дающим значение $R_{uds}^{pQCD} = 2.18 \pm 0.02$.

В **пятой главе** диссертации обсуждаются эксперименты по измерению с высокой точностью одного из важных параметров J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов, а именно, произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$. Прежде всего описаны условия отбора адронных событий при сканировании областей J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов и ограничения, способствующие эффективному подавлению вкладов ряда фоновых процессов. Рассказано о способах определения пучкового фона и связанных с его учётом систематических неопределённостях, вносимых в значения $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Представлены требования для прецизионного измерения светимости в экспериментах с детектором КЕДР с помощью регистрации событий e^+e^- -рассеяния. Приведены сравнения

экспериментальных данных по распределениям адронных событий и результатов моделирования. Последовательно описаны процедуры и результаты подгонок сечения в области $\psi(2S)$ - и J/ψ -резонансов. Свободными параметрами в случае $\psi(2S)$ -резонанса были его масса, произведение $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$, энергетический разброс σ_W и величина подложки R_{uds} . В случае J/ψ -резонанса из подгонки были найдены также значения $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ и $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{ee}$.

В **шестой главе** диссертации обсуждаются основные источники систематической неопределённости величины $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ в эксперименте по измерению параметров J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Главные источники систематической неопределённости определения светимости по данным CsI-калориметра связаны с несовершенством процедуры калибровки, выставкой калориметра, возможной нестабильностью пьедесталов и калибровочных коэффициентов электроники и неточностью моделирования. Неточность моделирования включает два неотделимых друг от друга эффекта. Первый заключается в несовершенстве моделирования распадов резонанса генератором событий, второй же связан с неодинаковой эффективностью реконструкции событий на экспериментальных данных и данных моделирования. Всё это детально описано в разделах 6.1 и 6.2. Далее обсуждаются систематические неопределённости, связанные с моделированием систем детектора, в частности, с вычислениями результатов программного триггера. В список систематических погрешностей добавлены также ошибки, связанные с определением энергии точек, используемых при подгонке сечения. Оценки данных неопределённостей получены сравнением различных способов интерполяции энергии между калибровками методом резонансной деполяризации. Очень интересное обсуждение неопределённости, связанной с модельным описанием формы сечения процесса $e^+e^- \rightarrow V \rightarrow$ адроны (конкретно с моделью интерференции распадов резонанса и электромагнитного нерезонансного рождения адронов), представлено в разделе 6.5. В разделе 6.6 приведены результаты измерения величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Результат для J/ψ -резонанса в четыре раза превосходит по точности результат предыдущего наиболее точного измерения данной величины, выполненного коллаборацией BES. Величина $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для $\psi(2S)$ -резонанса измерена с точностью 2.0%, что позволяет в два раза повысить точность определения значений полной и электронной ширин $\psi(2S)$.

Заключение содержит краткое перечисление основных результатов диссертации, для получения которых автором была проделана очень большая и многогранная работа по совершенствованию детектора КЕДР, сбору, обработке и анализу данных.

Подводя итог, скажу, что каких-то принципиальных замечаний по физике дела у меня нет. Здесь всё хорошо. Однако отмечу, что в третьей главе на стр. 56 при описании формулы (3.1), как и формулы (1.51) на стр. 28, автор попытался на объяснение индекса th , так что о его смысле можно только догадываться. И ещё. На стр. 140 выписано значение $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 2.233$ кэВ. Если его поделить на $\mathcal{B}_h = 0.9875$ и $\mathcal{B}_{ee} = 0.00772$, приведённые на стр. 141, то для центральных значений ширин распада $\psi(2S)$ будем иметь $\Gamma_{ee} = 2.261$ кэВ и $\Gamma = 293$ кэВ, отличающиеся от указанных в тексте значений 2.282 кэВ и 296 кэВ соответственно, в правильности которых нет сомнений. Указанные замечания не влияют на научную значимость результатов,

полученных в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях, соответствующих списку ВАК РФ, они хорошо известны специалистам в области физики высоких энергий, как экспериментаторам, так и теоретикам, и докладывались автором на многих международных конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертация Тодышева Корнелия Юрьевича является законченной научной работой, она соответствует требованиям п.9 “Положение о порядке присуждения учёных степеней”, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, и её автор, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук, доцент
лаборатория теоретической физики
Института математики им. С.Л. Соболева
Сибирского Отделения РАН
630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 4
e-mail: shestako@math.nsc.ru
телефон: 8(383)3297612

Отзыв Г.Н. Шестакова заверяю
Учёный секретарь ИМ СО РАН
кандидат физ.-мат. наук
30 октября 2019 г.

 Г.Н. Шестаков



И.Е. Светов