

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Дорохова Александра Евгеньевича о диссертации Тодышева Корнелия Юрьевича на тему «Аннигиляция электронов и позитронов в адроны в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ» на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, представленной в диссертационный совет Д 003.016.02 на базе ФГБУН Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Актуальными задачами современной физики элементарных частиц являются проверка и уточнение свойств стандартной модели и поиск новых взаимодействий за рамками стандартной модели. Одной из фундаментальных величин для проверки СМ является аномальный магнитный момент мюона (АММ), для которого с беспрецедентной точностью проверяется согласованность теоретических расчётов с экспериментальными измерениями. В настоящее время существует определенное расхождение между теорией и экспериментом. Однако, для ответа на вопрос, является ли это расхождение физически значимым, нужны новые еще более точные эксперименты по измерению АММ, а также существенное уменьшение теоретической ошибки в вычислениях АММ. Ошибка теоретических расчетов в основном обусловлена учетом адронных вкладов. На основе наиболее общих принципов квантовой теории поля вклад адронной поляризации вакуума в АММ непосредственно связан с измерением при низких энергиях полного сечения рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции, одной из наиболее фундаментальных наблюдаемых в физике элементарных частиц. При энергиях достаточно превышающих порог поведение сечения предсказывается в теории возмущений квантовой хромодинамики (КХД) и находится в хорошем согласии с экспериментальными измерениями от порога вплоть до наибольших энергий достижимых на современных установках. Прецизионное измерение полного сечения позволяет с высокой точностью определить постоянную тонкой структуры $\alpha(M_Z^2)$ в области пика Z^0 -бозона, массы тяжелых кварков, константу сильного взаимодействия $\alpha_S(s)$ и, если точные измерения возможны при разных значениях энергии, проверить эволюцию сечения, предписанного уравнениями ренорм группы.

Другой важнейшей и быстроразвивающейся тематикой является изучение адронных состояний, включающих тяжелые кварки и, в частности, системы состояний чармония. Само открытие J/Ψ - резонанса и c -кварка в 1974 году явилось поворотным моментом в создании самосогласованной Стандартной Модели. Для теории изучение спектра чармония и его свойств является важнейшим способом изучения конфайнмента кварков, природы связанных состояний за счет сильных взаимодействий, непертурбативных аспектов КХД. Состояния чармония, в частности J/Ψ , используются как для анализа, так и как средство калибровки в современных ускорителях.

Поэтому тематика диссертации, связанная с точными измерениями полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны (величины $R(s)$ -отношения) в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ, а также измерения величин произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee}B_h$ для J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов, является актуальной, а используемые методы измерения современными.

Объем диссертационной работы составляет 167 страниц, включая 52 рисунка и 44 таблицы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 186 наименований.

Во введении дан обзор текущего состояния исследований по теме диссертационной работы, сформулирована цель диссертационной работы, кратко изложены содержание работы и положения, выносимые на защиту, а также список конференций, на которых докладывались материалы диссертации.

В первой главе приведены известные сведения по теории инклюзивного рождения адронов при электрон-позитронной аннигиляции в рамках КХД, дан краткий обзор измерений сечения в подобном диапазоне энергий в предыдущих экспериментах, а также отмечена специфика извлечения параметров узкого 1^{--} - резонанса из экспериментальных данных по сечению.

Во второй главе дано детальное описание основного инструмента, используемого для получения новых результатов, детектора КЕДР и коллайдера со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4М. Рассмотрены методы измерения энергии коллайдера. Дан обзор экспериментов, выполненных с помощью детектора КЕДР.

Серия экспериментов по измерению R отношения в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ была выполнена за период с 2010 по 2015 год. Определение величины R было проведено в 22-х точках по энергии, суммарный интеграл светимости составил 2.7 пкбн^{-1} из них примерно 0.7 пкбн^{-1} было набрано в области J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов. В экспериментах по измерению величины $\Gamma_{ee}B_h$ для J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов интеграл светимости составил 0.23 и 0.6 пкбн^{-1} соответственно.

Третья глава посвящена анализу данных эксперимента по определению величины R в области энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ.

Приведены схема проведения эксперимента и процедура анализа экспериментальных данных. Представлены методики для отбора событий и измерения светимости. Ключевым моментом при анализе данных является моделирование методом Монте-Карло, начиная с генерации исходных частиц и завершая формированием сигналов электроники и последующим восстановлением события. Дан подробный анализ различного рода поправок к сечению за счет фоновых процессов, пучкового фона и радиационных поправок.

Определена величина R -отношения, соответствующая измеренному наблюдаемому значению сечения. Следует подчеркнуть, что существенной особенностью настоящего анализа был учет прямого, не связанного с «радиационным хвостом», вклада в наблюдаемое сечение узких J/Ψ - и $\Psi(2S)$ - резонансов, вычисленный аналитически на основании параметров, приведённых Particle Data Group. Сканиро-

вание, выполненное с прецизионным измерением энергии накопителя в непосредственной окрестности резонанса, позволило определить с высокой точностью его основные параметры, что в рассматриваемом анализе используется для вычисления сечения континуума u -, d - и s -кварков, $R_{uds}(s)$.

В четвёртой главе сформулирован один из основных результатов исследований в эксперименте с детектором КЕДР: приведены данные об измерениях величин $R(s)$ и $R_{uds}(s)$, как функции энергии в диапазоне от 1.84 до 3.72 ГэВ. Эти результаты являются наиболее точными по сравнению с аналогичными измерениями в предыдущих экспериментах. Особенно впечатляет Рис. 4.12, где результаты эксперимента КЕДР сравниваются с другими экспериментами и где показано согласие полученных данных с теоретическими предсказаниями, выполненными в рамках теории возмущений КХД. Из результатов эксперимента КЕДР извлечена константа сильного взаимодействия $\alpha_s(m_\tau) = 0.378_{-0.120}^{+0.173}$, величина которой находится в согласии с результатом, полученным в экспериментах по полуплептонным распадам.

Подробно обсуждаются ключевые для любого прецизионного эксперимента вопросы, связанные с исследованием и достоверной оценкой систематических неопределённостей выполненного эксперимента. При этом основным методом оценки систематических неопределённостей является сравнение результатов различных альтернативных вариантов на всех этапах моделирования, начиная с генерации исходных частиц и заканчивая рассмотрением эффективности восстановления треков при реконструкции событий. Подробно обсуждаются систематические погрешности, связанные с измерением светимости, моделированием uds - континуума, вычислением радиационной поправки, а также систематические неопределённости, связанные с работой детектора и накопителя. Описана процедура усреднения результатов.

Пятая и шестая главы посвящены экспериментам по измерению с высокой точностью произведения электронной ширины Γ_{ee} на вероятность распада в адроны B_h для J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов. С учетом среднемирового значения вероятности распадов $\Psi(2S)$ в адроны B_h и e^+e^- - пару B_{ee} , извлечены значения электронной Γ_{ee} и полной Γ ширины $\Psi(2S)$ - резонанса. Отметим, что полученные из эксперимента КЕДР значения ширин в несколько раз превосходят по точности предыдущие измерения, выполненные коллаборацией BES. Эти результаты являются одними из основополагающих результатов диссертационной работы.

Подробно обсуждаются условия отбора событий процессов $e^+e^- \rightarrow$ адроны и $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$, а также основные источники систематической неопределённости величины $\Gamma_{ee}B_h$ в эксперименте по измерению параметров J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов.

Подробно рассмотрены систематические погрешности, связанные с отбором событий, измерением светимости, эффективностью регистрации адронных событий, вкладом пучкового фона, вычислением радиационной поправки и моделированием процессов распада резонансов в адроны, а также неопределённости, связанные с работой детектора и накопителя. Описана процедура подгонки сечения в области

J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов.

В заключении изложены результаты и положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

Представленная диссертация является плодом многолетней работы К.Ю. Тодышева в эксперименте на ускорительном комплексе ВЭПП-4М с детектором КЕДР. На всех этапах подготовки, эксплуатации и обработки данных автор принимал самое активное участие и внес определяющий вклад. К.Ю. Тодышев лично участвовал в наборе экспериментальной статистики.

Так в экспериментах с детектором КЕДР автор активно участвовал в подготовке к работе и калибровке дрейфовой камеры детектора, разработал систему оперативного контроля качества данных, обеспечил эксплуатацию и текущую модернизацию системы на протяжении всего жизненного цикла детектора. Автором был разработан сценарий набора интеграла светимости, проведен анализ данных в эксперименте по измерению величины $R(s)$ и в эксперименте по измерению параметров J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов.

Результаты измерения величины $R(s)$ внесены в базы данных сечений процессов в физике элементарных частиц и используются при определении АМММ, постоянной тонкой структуры $\alpha(M_Z^2)$, константы сильного взаимодействия α_s и масс тяжёлых кварков.

Прецизионное измерение величины $\Gamma_{ee}B_h$ для J/Ψ - и $\Psi(2S)$ -резонансов позволит существенно развить и повысить предсказательные возможности теоретических подходов к изучению сильных взаимодействий при низких энергиях, таких как КХД на решетке, киральная теория возмущений, эффективная теория поля с тяжёлыми кварками и другие.

Практический метод настройки первичного генератора моделирования распадов чармония методом Монте-Карло, представленный в работе, может использоваться в будущих экспериментах.

Результаты экспериментов и методы обработки данных, разработанные автором, неоднократно докладывались на международных конференциях.

В целом диссертация написана подробно и ясно, хорошо проиллюстрирована. Для результатов измерений проводится систематическое сравнение с известными теоретическими оценками и экспериментальными результатами. Диссертация представляет хороший обзор как по текущему состоянию проблемы, так и по описанию экспериментальной установки и методик обработки данных. В качестве критических замечаний можно отметить следующее:

- список результатов диссертации, которые выносятся на защиту, представлен во введении. Однако в основном тексте диссертации ссылки на результаты автора отсутствуют и не всегда вполне ясно, какое положение в методике достигнуто при решающем вкладе автора.
- В тексте диссертации встречаются опечатки, например, в формуле 1.27 на странице 15 имеется лишняя степень числа π , а в формуле 1.37 на странице

16 не указана степень 2 при величине m_f . На странице 79 написано «оценки систематической неопределенностей» вместо «оценки систематической неопределенности» 143 (1 строка) написано «искреннею» вместо «искреннюю», страница 129 (пункт 2) «с экспериентам значением» вместо «с экспериентальным значением» и ряд других.

- На странице 31 в Таблице 1.1 в строках 7 и 8 сдвинуты столбцы.
- Следовало бы более подробно обсудить улучшение точности вычисления фундаментальных характеристик КХД при применении результатов, достигнутых в диссертационной работе.
- В разделе 4.3 обсуждаются систематические неопределенности, связанные с вычислением радиационных поправок. При этом не принимаются во внимание вклады поправок, за счет излучения из конечного состояния и его интерференции с излучением из начального состояния. Эти вклады не описываются формулой (1.43), они невелики, но оценка их величины была бы уместна.
- В Заключении было бы желательно определить перспективы как развития эксперимента КЕДР, так и возможности улучшения полученных параметров в дальнейших экспериментах.

В то же время указанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы, посвящённой актуальным проблемам современной физики фундаментальных взаимодействий и выполненной на высоком научном уровне.

Текст автореферата диссертации правильно отражает ее содержание. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, докладывались автором на международных конференциях по физике высоких энергий, обсуждались на семинарах в российских и международных научных центрах и имеют высокую цитируемость.

Представленная диссертационная работа К.Ю. Тодышева «Аннигиляция электронов и позитронов в адроны в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ» является законченным научным исследованием по актуальной тематике, отвечает всем требованиям Высшей аттестационной комиссии к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук и критериям установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Тодышев Корнелий Юрьевич, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент
ведущий научный сотрудник
сектора №5 Научного отдела теории фундаментальных взаимодействий
Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований
доктор физико-математических наук Александр Евгеньевич Дорохов
Тел.: +7(49621) 6-27-30, e-mail: dorokhov@theor.jinr.ru
Специальность, по которой защищена диссертация:
01.04.02 – Теоретическая физика

А.Е. Дорохов
14.11.19

Адрес места работы:
141980, Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,
Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

Подпись ведущего научного сотрудника Лаборатории теоретической физики им.
Н.Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований А. Е. Дорохова удостоверяю:

Ученый секретарь ЛТФ



А.В. Андреев

А.В. Андреев