

## ОТЗЫВ

официального оппонента А.А. Соколова на диссертацию

Тодышева Корнелия Юрьевича на тему

“Аннигиляция электронов и позитронов в адроны в диапазоне энергий от 1.84  
до 3.72 ГэВ”

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц,  
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

Диссертационная работа К.Ю. Тодышева посвящена измерению сечения адронной  $e^+e^-$ -аннигиляции в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ в центре масс системы в эксперименте на детекторе КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М. Кроме этого в работе были проведены измерения величин произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов.

### Актуальность темы исследования

К фундаментальным характеристикам, изучаемым в эксперименте относится величина  $R$ , определяемая как отношение полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны, которое вычислено с учётом радиационных поправок, к сечению рождения мюонной пары в борновском приближении. Прецизионное измерение величины  $R$  имеет ключевое значение при определении аномального магнитного момента мюона  $a_\mu$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha(M_Z^2)$  в области пика  $Z^0$ -бозона, константы сильного взаимодействия  $\alpha_s(s)$  и масс тяжёлых кварков. Теоретические расчёты, связанные с вычислением указанных характеристик, требуют точного определения вклада адронной поляризации вакуума, который может быть получен только в экспериментах по измерению величины  $R$ .

Повышение точности определения параметров  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов востребовано для построения достоверного описания спектра чармония, что особенно важно для теории сильного взаимодействия – квантовой хромодинамики (КХД). В рассматриваемой области энергии константа сильного взаимодействия не является малым параметром и теория возмущений – основной аналитический метод квантовой теории поля – становится неприменимой. Поэтому для теоретического описания структуры  $c\bar{c}$ -системы, предсказания масс и парциальных ширин состояний чармония используют полуфеноменологические подходы, в большей или меньшей степени опирающиеся на КХД, в частности, нерелятивистские потенциальные модели.

В настоящее время точное измерение величины  $R$  и параметров  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов по-прежнему является важной и актуальной экспериментальной задачей, востребованной для проверки КХД и верификации Стандартной Модели в целом.

### **Новизна полученных результатов**

Результаты измерения величины  $R$ , полученные в работе, являются наиболее точными в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ. В области энергии, где важен учёт узких резонансов, впервые использовался метод прямого вычитания  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов, параметры которых были определены с высокой точностью из экспериментальной подгонки.

Точность измерения величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $\psi(2S)$ -мезона превосходит точность аналогичного результата эксперимента MARK-I почти на порядок и в два раза превышает точность сопоставимых измерений полной и электронной ширины детектором BES-II, которые до момента публикации результатов детектора КЕДР являлись наилучшими.

Измерение величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ -мезона выполнено с точностью в четыре раза превосходящей результат предыдущего наиболее точного прямого измерения данной величины, проведённого в эксперименте BES.

### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

Результаты измерения величины  $R$  внесены в базы данных сечений процессов в физике элементарных частиц. В настоящее время они используются при определении аномального магнитного момента мюона  $\alpha_\mu$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha(M_Z^2)$  в области пика  $Z^0$ -бозона, константы сильного взаимодействия  $\alpha_s(s)$  и масс тяжёлых夸克ков.

Прецизионное измерение величины произведения  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов позволяет значительно повысить точность определения электронной и полной ширин указанных резонансов. Достигнутые результаты могут быть использованы для более точной настройки потенциальных моделей чармония, повышая их предсказательные возможности для более сложных состояний.

Практический метод настройки первичного генератора моделирования распадов чармония методом Монте-Карло, представленный в работе, может использоваться в будущих экспериментах. Способ даёт надёжную и точную оценку систематических неопределённостей эффективности регистрации событий, что в сочетании с достаточно простой реализацией обеспечивает его значительным преимуществом по сравнению с ранее применявшимися методами.

## **Оценка содержания диссертации, ее завершенность**

Диссертация является завершенной работой. Ее содержание и структура соответствуют заявленной специальности и цели исследования.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во **введении** кратко обсуждена актуальность работы, сформулирована цель, обсуждены научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также представлены выносимые на защиту научные результаты.

В **первой главе** рассмотрено сечение однофотонной аннигиляции  $e^+e^-$ - пары. Аргументирована практическая значимость эксперимента по измерению сечения инклузивного рождения адронов и представлены теоретические формулы, используемые для подгонки сечения образования резонансов с квантовыми числами  $J^{PC} = 1^{--}$ .

В рассматриваемом диапазоне энергий вычисления величины  $R$ , выполненные в рамках теории возмущений КХД, априори нельзя считать достоверными. В этом случае в расчётах используют непертурбативные методы, к которым относятся, например, правила сумм и операторное разложение. Тем не менее, в силу цветового конфайнамента, точность расчётов КХД не может быть сравнимой с вычислениями, выполненными в рамках КЭД, и это, конечно, одна из основных причин, почему измерение величины  $R$  является важной экспериментальной задачей.

В данной главе представлено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow$  адроны в окрестности узкого резонанса ( $J/\psi$ , либо  $\psi(2S)$ ) с учётом интерференции с точностью, превышающей 0.2%. Во **второй главе** описывается детектор КЕДР и параметры ускорительного комплекса ВЭПП-4М, рассмотрены методы измерения энергии коллайдера. Также кратко изложена хронология экспериментов, проведённых с детектором КЕДР на ВЭПП-4М с 2002 по 2015 год.

Накопительный комплекс ВЭПП-4М позволяет осуществлять столкновения электрон-позитронных пучков при энергии от 1.8 до 11 ГэВ в системе центра масс с пиковой светимостью  $2.5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в области  $\psi(2S)$ . Реализованные на ВЭПП-4М способы прецизионного измерения энергии методом резонансной деполяризации и методом обратного комптоновского рассеяния дают возможность рассматривать целый ряд уникальных физических задач.

Серия экспериментов по измерению  $R$  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  $2.7 \text{ пкбн}^{-1}$ . Из них примерно  $0.7 \text{ пкбн}^{-1}$  было набрано в области  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов.

В экспериментах по измерению величины  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов

интеграл светимости составил 0.23 и 0.6  $\text{пкбн}^{-1}$  соответственно.

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

Наблюдаемое адронное сечение  $\sigma_{mh}^{obs}(s)$  определяется формулой:

$\sigma_{mh}^{obs}(s) = (N_{mh} - N_{res.bg.}) / \int L dt$ , где  $N_{mh}$  - число адронных событий, прошедших отбор,  $N_{res.bg.}$  - число событий пучкового фона при выбранных условиях отбора, а  $\int L dt$  - интеграл светимости.

Величина R, соответствующая измеренному наблюдаемому значению сечения, вычисляется согласно равенству:

$$R = (\sigma_{mh}^{obs}(s) - \sum \varepsilon_{bg}(s) \sigma_{bg}(s) - \sum(s) \sigma_\psi(s)) / (\varepsilon(s)(1 + \delta(s)) \sigma_0^{e+e- \rightarrow \mu^+ \mu^-}(s)),$$

где  $\sigma_0^{e+e- \rightarrow \mu^+ \mu^-}(s)$  - борновское сечение процесса  $e+e- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , а  $\varepsilon(s)$  - эффективность регистрации событий однофотонной аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны. Второе слагаемое в числителе содержит вклады в наблюдаемое сечение процессов рождения лептонных пар  $\ell^+ \ell^-$ , где  $\ell = e, \mu, \tau$ , а также процессов двухфотонного рождения. Третье слагаемое включает в себя вклады  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов, которые учитываются непосредственно при вычислении сечения, а не как часть радиационной поправки  $\delta$ .

Эффективности регистрации адронных событий  $\varepsilon$  и фоновых процессов  $\varepsilon_{bg}$  находились из моделирования. Эффективности регистрации событий, связанных с рождением  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов, определялись подгонкой резонансов, выполняемой при каждом сканировании, проводимом в соответствующем диапазоне энергии.

Свободными параметрами подгонки резонанса являлись:  $\varepsilon_\psi$  - эффективность регистрации событий рождения резонанса при заданных среднемировом значении лептонной ширины  $\Gamma_{ee}$  и её произведении на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ , энергетический разброс полной энергии в системе центра масс сталкивающихся пучков, а также величина адронного сечения для точки сканирования, лежащей ниже резонанса.

В **четвёртой главе** приведены результаты измерений величины R, обсуждаются вопросы, связанные с исследованием и оценкой систематических неопределённостей выполненного эксперимента.

Основным методом оценки систематических неопределённостей в диссертационной работе является сравнение результатов различных альтернативных вариантов на всех этапах моделирования, начиная с генерацией исходных частиц и заканчивая рассмотрением эффективности восстановления треков при реконструкции событий. Систематические погрешности, полученные вариации критериев отбора, суммируются квадратично с не-

определенностями, определенными явными сравнениями. Такой подход игнорирует возможный повторный учёт некоторых факторов, но при этом в большей степени обеспечивается надёжность и достоверность получаемых результатов.

В **пятой главе** представлен анализ экспериментальных данных, выполненный при измерении произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов. Здесь подробно обсуждаются условия отбора событий процессов  $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$  и  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ , последний из которых используется для определения светимости.

Определение параметров резонансов осуществлялось путём минимизации функции правдоподобия, включающей ожидаемые и найденные числа событий  $e^+e^-$ -рассеяния и адронных событий. Моделирование распадов  $J/\psi \rightarrow \text{адроны}$  и  $\psi(2S) \rightarrow \text{адроны}$  выполнялось программой, разработанной коллаборацией BES в рамках пакета JETSET 7.4.

В **шестой главе** обсуждаются основные источники систематической неопределенности величины  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  в эксперименте по измерению параметров  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонанса.

Неопределенность эффективности регистрации адронных событий является одной из основных систематических погрешностей при измерении сечения рождения  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов. Данная неопределенность 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.

Поскольку при моделировании адронных распадов  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов использовался только один генератор, разработанный в рамках пакета программ JETSET 7.4, то основной оценки систематической неопределенности первичного моделирования послужило рассмотрении большого числа существенно отличающихся вариантов моделирования, полученных при различных опциях и параметрах с достаточной степенью достоверности описывающих данные. Было рассмотрено более ста различных наборов опций и параметров при моделировании распадов  $\psi(2S)$ -мезона и несколько десятков вариантов генерации распадов  $J/\psi$ .

В **Заключении** представлены основные результаты работы.

### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. В автореферате обоснована актуальность темы, приведены цели работы, кратко изложено основное содержание работы, представлены результаты работы и список публикаций, содержащий основ-

ные результаты работы.

### **Личный вклад автора**

На этапе ввода в эксплуатацию детектора КЕДР автор активно участвовал в подготовке к работе дрейфовой камеры детектора. В ходе первых экспериментов с детектором КЕДР автор являлся координатором эксперимента, отвечавшим за процесс набора статистики, взаимодействие с установкой ВЭПП-4М и за поддержку дежурного персонала при решении возникающих проблем. Автором была разработана система оперативного контроля качества данных, используемая в экспериментах с детектором КЕДР.

С 2002 по 2015 год автором проводилась калибровка дрейфовой камеры детектора КЕДР. Для обсуждаемых в настоящей работе экспериментов автором был разработан сценарий набора интеграла светимости. Автор лично провёл анализ данных в эксперименте по измерению величины  $R$  и в эксперименте по измерению параметров  $\psi(2S)$ , а в эксперименте по измерению параметров  $J/\psi$  осуществлял непосредственное научное руководство работой по анализу данных. Изложенные в диссертационной работе результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

### **Замечания по диссертации**

В качестве замечаний к диссертационной работе можно отметить следующее:

Раздел 3.4. “Кроме того, моделирование континуума от u-, d-, s-кварков осуществлялось альтернативным способом в рамках пакета программ JETSET 7.4, при этом параметры генерации первичных частиц настраивались независимо в каждой точке по энергии...” .

В работе не объясняется необходимость настройки параметров программы в каждой точке по энергии. Насколько отличаются результаты при различных настройках?

Раздел 3.5. Табл. 3.9. Чем объясняется значительное отличие вклада в наблюдаемое сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  в точке 14?

Раздел 3.6. В работе не объясняется, каким образом производился расчет пучкового фона. Пучковый фон определяется суммой двух источников: рассеяние пучка на остаточном газе и рассеяние на стенках вакуумной камеры. Почему систематическая ошибка расчета пучкового фона определялась из разности этих двух источников?

Почему вклад пучкового фона отличается в 2010 и 2011 гг. (табл. 3.10, 3.11)?

Глава 4, табл. 4.1. Чем объясняется значительное отличие вклада от моделирования uds-континуума в систематическую ошибку в точке 1?

Раздел 4.5, табл. 4.13. Было бы полезно объяснить, каким образом формировалась корреляционная матрица.

Глава 6, табл. 6.1, 6.2. Было бы полезно объяснить, каким образом находилась общая часть ошибки в первом и втором сканировании?

Раздел 6.2., стр. 129. “процесс выбора удовлетворительных вариантов моделирования осуществлялся.... выбором дополнительного параметра...”. Какой параметр при этом использовался?

Раздел 6.2. В табл. 6.5 неточно сформулированы подзаголовки в отличие от аналогичной табл.6.6.

## Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на качество исследования, а также на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты. Результаты диссертации по измерению величины  $R$  используются при определении аномального магнитного момента мюона  $\alpha_\mu$ , постоянной тонкой структуры  $\alpha(M_Z^2)$  в области пика  $Z^0$ -бозона, константы сильного взаимодействия  $\alpha_s(s)$  и масс тяжёлых夸克ов.

Прецизионное измерение величины произведения  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -мезонов могут быть использованы для более точной настройки потенциальных моделей чармония, повышая их возможности для предсказания более сложных состояний.

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

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой и характеризуется высоким научным уровнем. Работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и являются достоверными и оригинальными.

Диссертация К.Ю. Тодышева на соискание учёной степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, посвященной измерению сечения адронной  $e+e-$ -аннигиляции в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ в центре масс системы в эксперименте на детекторе КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М. Кроме этого в работе были проведены измерения величин произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$  для  $J/\psi$ - и  $\psi(2S)$ -резонансов. Считаю, что диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук и критериям, установленным в п.9 "Положения о порядке присуждения учёных степеней", утверждённого постановлением

Правительства РФ от 24 сентября 2013 года N 842, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент,

Соколов Анатолий Александрович,

доктор физико-математических наук

по специальности 01.04.23 - физика высоких энергий

142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1,

тел. (4967) 71-35- 28,

адрес электронной почты: sokolov\_a@ihep.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова

Научного исследовательского центра «Курчатовский институт»,

ведущий научный сотрудник отделения экспериментальной физики.

«01» октября 2019



А.А. Соколов

Подпись Соколова Анатолия Александровича заверяю

Ученый секретарь

НИЦ "Курчатовский институт" - ИФВЭ



И.Н. Прокопенко