

На правах рукописи

ТОДЫШЕВ Корнелий Юрьевич

**АННИГИЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ
В АДРОНЫ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ
ОТ 1.84 ДО 3.72 ГэВ**

**01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- ДОРОХОВ** – доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация
Александр Евгеньевич Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, ведущий научный сотрудник.
- СОКОЛОВ** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино, ведущий научный сотрудник.
- ШЕСТАКОВ** – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С. Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник.
- ВЕДУЩАЯ** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва.
- ОРГАНИЗАЦИЯ**

Защита диссертации состоится « 3 » декабря 2019 г. в « 12:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте

<http://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#d-003-016-02>

Автореферат разослан « 15 » октября 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор, чл.-корр. РАН

В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Основной целью настоящей работы является измерение сечения адронной e^+e^- -аннигиляции в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ в центре масс системы. Кроме этого в работе были проведены измерения величин произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Эксперименты проводились в Институте ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера, где с 2002 года на ускорительном комплексе VEPP-4М ведутся эксперименты с детектором КЕДР по изучению процессов аннигиляции электрон-позитронных пар.

Прецизионное измерение величины R имеет ключевое значение при определении аномального магнитного момента мюона a_μ , 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/ψ - и $\psi(2S)$ -мезонов востребовано для построения достоверного описания спектра чармония, что особенно важно для на теории сильного взаимодействия — квантовой хромодинамики (КХД). В отличие от квантовой электродинамики, 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/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов по-прежнему является важной и актуальной экспериментальной задачей, востребованной для проверки КХД и верификации Стандартной Модели в целом. Определение с высокой точностью адронной поляризации вакуума в широком диапазоне энергий играет ключевую роль при вычислении аномального магнитного момента мюона, что является целеуказателем для поиска процессов, выходящих за рамки Стандартной Модели.

Цель работы состояла в следующем:

- измерение величины R в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ;
- измерение величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны для $\psi(2S)$ -мезона $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$;
- измерение величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны для J/ψ -мезона $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$.

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/ψ осуществлял непосредственное научное руководство работой по анализу данных. Изложенные в диссертационной работе результаты получены автором лично или при его определяющем вкладе.

Научная новизна

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/ψ - 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 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/ψ -мезона выполнено с точностью в четыре раза превосходящей результат предыдущего наиболее точного прямого измерения данной величины, проведённого в эксперименте BES.

Научная и практическая ценность

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 a_μ , постоянной тонкой структуры $\alpha(M_Z^2)$ в области пика Z^0 -бозона, константы сильного взаимодействия $\alpha_s(s)$ и масс тяжёлых кварков.

Прецизионное измерение величины произведения $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для J/ψ - и $\psi(2S)$ -мезонов позволяет значительно повысить точность определения электронной и полной ширин указанных резонансов. Достиженные 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Впервые выполнено подробное измерение величины R в двадцати двух точках по энергии в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ, что соответствует области энергии от порога рождения пары протон-антипротон до порога рождения $D\bar{D}$ -пары очарованных мезонов. Измерения величины R в области энергий от 1.84 до 3.05 ГэВ в большинстве точек выполнено с точностью 3.9% при систематической неопределённости 2.4%, подобный уровень систематической погрешности в указанном диапазоне энергии достигнут впервые. В диапазоне энергий от 3.08 до 3.72 ГэВ измерения величины R в большинстве точек выполнено с точностью 2.6% при уровне систематической неопределённости 1.9%. Показано, что результаты измерения величины R хорошо согласуются с расчётом, выполненным в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики.

- Впервые для получения величины R в области энергии, где важен учёт узких резонансов, использовался метод явного вычитания J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов, параметры которых были определены с высокой точностью из экспериментальной подгонки.
- С точностью 2.0% измерена величина произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для $\psi(2S)$ -мезона, получено значение

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 2.233 \pm 0.015 \pm 0.037 \pm 0.020 \text{ кэВ},$$

что позволяет в два раза повысить точность определения значений полной и электронной ширин $\psi(2S)$.

- С точностью 1.9% измерена величина произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для J/ψ -мезона, получено значение

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 4.884 \pm 0.048 \pm 0.078 \text{ кэВ},$$

что по точности в четыре раза превосходит предыдущее наиболее точное прямое измерение данной величины. Данный результат получен Т. А. Харламовой под непосредственным научным руководством автора.

Апробация работы

Материалы диссертации были представлены на следующих международных конференциях: Международная сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН (Москва, Россия, 2012 г.), The 4th International Workshop on Charm Physics (Beijing, China, 2010), The 36th International Conference for High Energy Physics (Melbourne, Australia, 2012), The 13th International Workshop on Tau Lepton Physics (Aachen, Germany, 2014), The 10th International Workshop on e^+e^- collisions from Phi to Psi (Hefei, China, 2015), The 12th International Workshop on Heavy Quarkonium (Beijing, China, 2017), Workshop on hadronic vacuum polarization contributions to muon $g-2$ (Tsukuba, Japan, 2018), The 9th International Workshop on Charm Physics (Новосибирск, Россия, 2018), The International Workshop on e^+e^- Collisions From Phi to Psi (Новосибирск, Россия, 2019).

Результаты диссертации опубликованы в международных научных журналах [1-11], входящих в список ВАК по направлению «Физика».

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, списка иллюстраций и списка таблиц. Объём диссертации составляет 167 страниц, включая 52 рисунка и 44 таблицы. Список литературы состоит из 186 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обсуждены актуальность и практическая значимость проведённых исследований, сформулирована цель диссертационной работы, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

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

Наблюдаемая зависимость инклюзивного сечения аннигиляции e^+e^- -пары в адроны является наиболее простым для понимания следствием КХД, что, однако, не снимает всех трудностей, сопряжённых как с проведением прецизионного экспериментального измерения данной величины, так и с усложнением теоретического расчёта по мере повышения его точности. В первую очередь это связано с тем, что теория возмущений КХД, построенная по аналогии с квантовой электродинамикой (КЭД), работает лишь в области больших передач импульсов или, иными словами, лишь при малых расстояниях, в случае когда константа связи $\alpha_s \equiv \frac{g^2}{4\pi}$ мала.

В низшем порядке теории возмущений полное сечение адронной аннигиляции для неполяризованных пучков имеет вид

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{адроны}}(s) = -\frac{4\pi\alpha}{s\sqrt{1 - \frac{4m_\pi^2}{s}}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{s}\right) \text{Im}_h \Pi(s), \quad (1)$$

где величина $\text{Im}_h \Pi(s)$ обозначает мнимую часть поляризации вакуума, соответствующую адронному промежуточному состоянию. Поскольку адронному рождению соответствует область энергии, в которой выполняются следующие условия $s \geq 4m_\pi^2 \gg m_e^2$, то в большинстве случаев достаточно использовать приближение

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{адроны}}(s) = -\frac{4\pi\alpha}{s} \text{Im}_h \Pi(s). \quad (2)$$

Аналогично приведённому выше расчёту можно вычислить сечение рождения мюонной пары в низшем порядке теории возмущений, заменив адронный ток на электромагнитный ток мюонов. Элементарное вычисление приводит к мюонному аналогу функции $\Pi(s)$:

$$\text{Im} \Pi^{\mu^+ \mu^-}(s) = -\frac{\alpha}{3} \left(1 + \frac{2m^2}{s}\right) \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{s}} H(s - 4m_\mu^2), \quad (3)$$

где $H(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда. В рассматриваемой области энергий $s \gg 4m_\mu^2$, используя (2), получаем

$$\sigma_0^{e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-} = \frac{4\pi\alpha^2}{3s}. \quad (4)$$

Достаточно естественным ввести определение величины R , как отношение полного сечения к сечению рождения мюонной пары в борновском приближении (4):

$$R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sigma^{e^+ e^- \rightarrow \text{адроны}}(s)}{\sigma_0^{e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-}} \quad (5)$$

Из (2) и (5) следует, что

$$R = -\frac{3}{\alpha} \text{Im}_h \Pi(s). \quad (6)$$

Заменив в (3) m_μ на массу кварка m_f и домножив на $3Q_f^2$, в низшем порядке КХДб можно записать вклад в R каждого аромата

$$R_f^{(0)}(s) = 3Q_f^2 \left(1 + \frac{2m_f}{s}\right) \sqrt{1 - \frac{4m_f}{s}} H(s - 4m_f^2) \underset{s \gg 4m_f^2}{\simeq} 3Q_f^2, \quad (7)$$

где заряд соответствующего сорта кварков Q_f приведён в единицах $|e|$. Множитель 3 возникает в (7) при суммировании по трём цветовым состояниям кварка. Суммируя по всем доступным на данной энергии ароматам, т.е. учитывая только кварки, обладающие массой меньше чем половина энергии в системе центра масс, получаем полную величину R в низшем порядке КХД

$$R^{(0)} = 3 \sum_f Q_f^2. \quad (8)$$

Во втором порядке пертурбативной КХД для рассматриваемого диапазона энергий

$$R_{\text{uds}}(s) = 2 \times \left(1 + \frac{\alpha_s}{\pi} + \frac{\alpha_s^2}{\pi^2} \times \left(\frac{365}{24} - 9\zeta_3 - \frac{11}{4}\right)\right). \quad (9)$$

где ζ_n – дзета-функции Эйлера-Римана.

В экспериментах, где характерный масштаб энергий много меньше массы Z^0 -бозона, величина R , вычисленная в рамках пертурбативной КХД в приближении безмассовых кварков, может быть записана в настоящее время вплоть до четвёртого порядка. Поправки к R , связанные с конечной массой кварков, на достаточном удалении от порога рождения соответствующего кварка подавлены как $m_f^2(s)/s$. Следует также отметить, что в рассматриваемом в настоящей работе диапазоне энергий вклад электрослабого взаимодействия в R не превышает 0.02%, что пренебрежимо мало по сравнению с систематическими неопределённостями экспериментальных данных.

При $s = (2 \text{ ГэВ})^2$, где $\alpha_s \simeq 0.3$, вычисления величины R , выполненные в рамках теории возмущений КХД, априори нельзя считать достоверными. В этом случае, по мере возможности, в расчётах используют непертурбативные методы, к которым относятся, например, правила сумм и операторное разложение. Тем не менее, в силу цветового конфайнмента, 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.

Обсуждая аннигиляцию e^+e^- -пары в исследуемом диапазоне энергий, будет естественным рассмотреть сечение рождения J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов, которое напрямую связано с величиной произведения электронной ширины резонанса на вероятность его распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$.

С учётом интерференции сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \text{адроны}$ в окрестности узкого резонанса (J/ψ , либо $\psi(2S)$) с точностью, превышающей 0.2%, может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{\psi(2S)}(s) = & \frac{12\pi}{s} \left\{ \left(1 + \delta_{sf} \right) \left[\frac{\Gamma_{ee}\Gamma_h}{\Gamma M} \text{Im} f(s) - \frac{2\alpha\sqrt{R}\Gamma_{ee}\Gamma_h}{3\sqrt{s}} \lambda \text{Re} \frac{f(s)}{(1-\Pi_0)^*} \right] \right. \\ & - \frac{\beta\Gamma_{ee}\Gamma_h}{2\Gamma M} \left[\left(1 + \frac{M^2}{s} \right) \arctan \frac{\Gamma s}{M(M^2 - s + \Gamma^2)} \right. \\ & \left. \left. - \frac{\Gamma M}{2s} \ln \frac{\left(\frac{M^2}{s} \right)^2 + \left(\frac{\Gamma M}{s} \right)^2}{\left(1 - \frac{M^2}{s} \right)^2 + \left(\frac{\Gamma M}{s} \right)^2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Gamma_{ee}, \Gamma_h, \Gamma, M$ – «экспериментальные» или «физические» параметры резонанса, определяемые с учётом поляризационного фактора, причём «экспериментальная» парциальная электронная ширина удовлетворяет соотношению

$$\Gamma_{ee} = \frac{\Gamma^{(0)}}{|1 - \Pi_0|^2}, \quad (11)$$

где Π_0 – оператор поляризации вакуума, из которого исключён вклад $\psi(2S)$, а $\Gamma^{(0)}$ – «голая» парциальная ширина, соответствующая борновскому сечению процесса.

$$\delta_{sf} = \frac{3}{4}\beta + \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{\pi^2}{3} - \frac{1}{2} \right) + \beta^2 \left(\frac{37}{96} - \frac{\pi^2}{12} - \frac{1}{36} \ln \frac{W}{m_e} \right), \quad (12)$$

$$f = \frac{\pi\beta}{\sin \pi\beta} \left(\frac{s}{s - M^2 - iM\Gamma} \right)^{1-\beta}, \quad \beta = \frac{4\alpha}{\pi} \left(\ln \left(\frac{W}{m_e} \right) - \frac{1}{2} \right). \quad (13)$$

Параметр λ , характеризует силу интерференции. Обычно предполагается

$$\lambda \approx \sqrt{\frac{R\mathcal{B}_{ee}}{\mathcal{B}_h}}, \quad (14)$$

где \mathcal{B}_h и \mathcal{B}_{ee} – вероятности распада резонанса в адроны и e^+e^- -пару.

Во второй главе описывается детектор КЕДР и параметры ускорительного комплекса VEPP-4М, рассмотрены методы измерения энергии коллайдера. Также кратко изложена хронология экспериментов, проведённых с детектором КЕДР на VEPP-4М с 2002 по 2015 год.

Накопительный комплекс VEPP-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.

На рисунке 1 показано расположение основных систем детектора КЕДР. Детектор КЕДР состоит из вершинного детектора, дрейфовой камеры, время-пролётной системы на основе сцинтилляционных счётчиков, цилиндрического жидко-криптонового электромагнитного калориметра и торцевого электромагнитного CsI-калориметра, системы пороговых аэрогелевых счётчиков и мюонной системы на основе стриммерных трубок. Продольное магнитное поле создаётся сверхпроводящим соленоидом. В экспериментах, обсуждаемых в настоящей работе, величина магнитного поля составляла 0.6 Тл, кроме сканирования J/ψ -резонанса, в течение которого величина магнитного поля была равна 0.65 Тл.

Серия экспериментов по измерению R в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ была выполнена за период с 2010 по 2015 год.

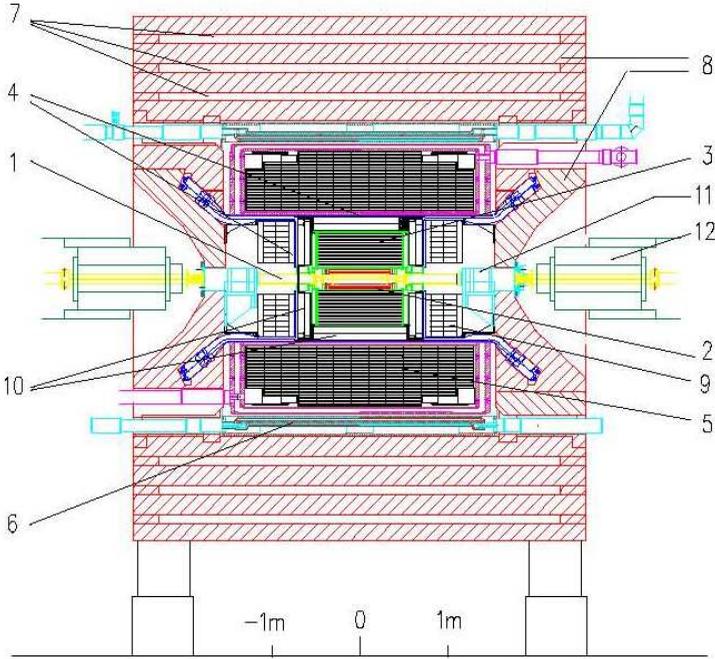


Рис. 1. Схема детектора КЕДР. Продольный разрез. Числами обозначены: 1 – вакуумная камера, 2 – вершинный детектор, 3 – дрейфовая камера, 4 – время-пролётная система, 5 – цилиндрический LKr-калориметр, 6 – обмотка магнита, 7 – мюонная система, 8 – ярмо магнита, 9 – торцевой CsI-калориметр, 10 – аэрогелевые черенковские счётчики.

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 $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ 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 .

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

$$\sigma_{mh}^{\text{obs}}(s) = \frac{N_{mh} - N_{\text{res.bg.}}}{\int \mathcal{L} dt}, \quad (15)$$

где N_{mh} – число адронных событий, прошедших отбор, $N_{\text{res.bg.}}$ – число событий пучкового фона при выбранных условиях отбора, а $\int \mathcal{L} dt$ – интеграл светимости.

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

$$R = \frac{\sigma_{mh}^{\text{obs}}(s) - \sum \varepsilon_{\text{bg}}(s) \sigma_{\text{bg}}(s) - \sum \varepsilon_{\psi}(s) \sigma_{\psi}(s)}{\varepsilon(s) (1 + \delta(s)) \sigma_0^{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}(s)}, \quad (16)$$

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 l^+l^- , где $l = e, \mu, \tau$, а также процессов двухфотонного рождения. Третье слагаемое включает в себя вклады J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов, учитываются непосредственно при вычислении сечения, а не как часть радиационной поправки δ .

Эффективности регистрации адронных событий ε и фоновых процессов ε_{bg} находились из моделирования. Эффективности регистрации событий, связанных с рождением J/ψ - и $\psi(2S)$ -мезонов, определялись подгонкой резонансов, выполняемой при каждом сканировании, проводимом в соответствующем диапазоне энергии. В эксперименте по измерению величины R для энергий ниже рождения J/ψ -мезона в 2010 г. соотношение, используемое при расчёте R , упрощается очевидным образом и подгонка резонансов не требуется.

Свободными параметрами подгонки резонанса являлись: ε_{ψ} – эффективность регистрации событий рождения резонанса при заданных среднемировом значении лептонной ширины Γ_{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.

Следует подчеркнуть, что вклад в наблюдаемое сечение радиационного «хвоста» резонанса $\varepsilon_{\psi}\sigma_{\psi}$ зависит от комбинации $\varepsilon_{\psi}\Gamma_{ee}\mathcal{B}_h$ и нечувствителен непосредственно к заданным значениям лептонной ширины Γ_{ee} и вероятности распада в адроны \mathcal{B}_h .

В рассматриваемом анализе фактор $1 + \delta(s)$, связанный с радиационными поправками, вычисляется согласно соотношению:

$$1 + \delta(s) = \int \frac{dx}{1-x} \frac{\mathcal{F}(s, x)}{|1 - \tilde{\Pi}((1-x)s)|^2} \frac{\tilde{R}((1-x)s) \varepsilon((1-x)s)}{R(s) \varepsilon(s)}, \quad (17)$$

где $\mathcal{F}(s, x)$ – функция радиационных поправок, взятая из классической работы Э. А. Кураева и В. С. Фадына. Оператор вакуумной поляризации $\tilde{\Pi}$ и величина \tilde{R} не включают в себя вклады J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов.

Таким образом, результатом описанной выше процедуры анализа экспериментальных данных является непосредственно значение R_{uds} .

Моделирование однофотонной аннигиляции e^+e^- -пары в адроны проводилось программой LUARLW. 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 области энергий выше J/ψ -резонанса и для шести энергетических точек, лежащих ниже J/ψ -резонанса. В области энергии ниже 1.94 ГэВ дополнительно к перечисленным вариантам использовался генератор MHC2000, основанный на рассмотрении совокупности эксклюзивных процессов.

Сравнение распределения по заряженной множественности N_{trk}^{IP} для моделирования с экспериментальными данными представлено на рисунке 2. В целом все рассмотренные в работе распределения для характеристик события, полученные в результате моделирования, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

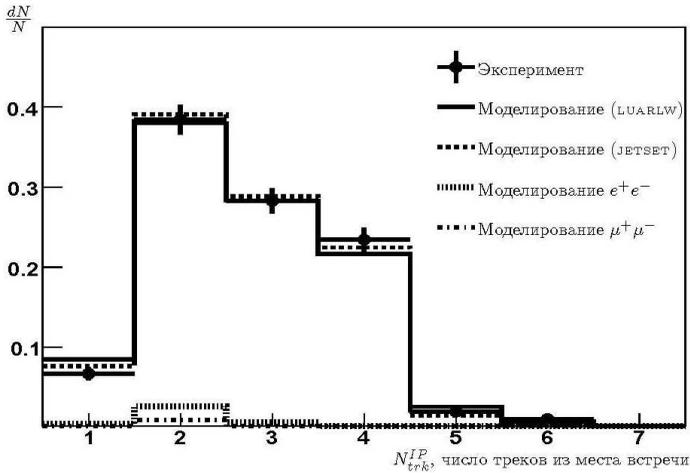


Рис. 2. Распределение по заряженной множественности N_{trk}^{IP} для событий, прошедших «адронный» отбор, при энергии 2.14 ГэВ системе центра масс. Распределения нормированы. N – число событий в гистограмме.

В четвёртой главе приведены результаты измерений величины R , обсуждаются вопросы, связанные с исследованием и достоверной 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 генерации

ей исходных частиц и заканчивая рассмотрением эффективности восстановления треков при реконструкции событий. Систематические погрешности, полученные вариаций критериев отбора, суммируются квадратично с неопределённостями, определёнными явными сравнениями. Такой подход игнорирует возможный повторный учёт некоторых факторов, но при этом в большей степени обеспечивается надёжность и достоверность получаемых результатов.

Результаты измерения зависимости $R(s)$ представлены в таблице 1. В таблице приведены величины R_{uds} и R для средневзвешенных значений энергий в системе центра масс, найденных путём усреднения с весом равным интегралу светимости, набранного при выполнении соответствующего измерения.

Таблица 1. Итоговая таблица результатов экспериментов по измерению величины R .

Точка	Энергия, МэВ	$R_{uds}(s)\{R(s)\}$
Результаты эксперимента 2010 г.		
1	1841.0 ± 2	$2.226 \pm 0.139 \pm 0.158$
2	1937.0 ± 2	$2.141 \pm 0.081 \pm 0.073$
3	2037.3 ± 2	$2.238 \pm 0.068 \pm 0.072$
4	2135.7 ± 2	$2.275 \pm 0.072 \pm 0.055$
5	2239.2 ± 2	$2.208 \pm 0.069 \pm 0.053$
6	2339.5 ± 2	$2.194 \pm 0.064 \pm 0.048$
7	2444.1 ± 2	$2.175 \pm 0.067 \pm 0.048$
8	2542.6 ± 2	$2.222 \pm 0.070 \pm 0.047$
9	2644.8 ± 2	$2.220 \pm 0.069 \pm 0.049$
10	2744.6 ± 2	$2.269 \pm 0.065 \pm 0.050$
11	2849.7 ± 2	$2.223 \pm 0.065 \pm 0.047$
12	2948.9 ± 2	$2.234 \pm 0.064 \pm 0.051$
13	3048.1 ± 2	$2.278 \pm 0.075 \pm 0.048$
Результаты, полученные на основе экспериментов 2011 и 2014-2015 гг.		
14	3076.7 ± 0.2	$2.188 \pm 0.056 \pm 0.042$
15	3119.6 ± 0.4	$2.212\{2.235\} \pm 0.042 \pm 0.049$
16	3222.5 ± 0.8	$2.194\{2.195\} \pm 0.040 \pm 0.035$
17	3314.7 ± 0.6	$2.219\{2.219\} \pm 0.035 \pm 0.035$
18	3418.3 ± 0.3	$2.185\{2.185\} \pm 0.032 \pm 0.035$
19	3499.6 ± 0.4	$2.224\{2.224\} \pm 0.054 \pm 0.040$
20	3520.8 ± 0.4	$2.200\{2.201\} \pm 0.050 \pm 0.044$
21	3618.2 ± 1.0	$2.212\{2.218\} \pm 0.038 \pm 0.035$
22	3719.4 ± 0.7	$2.204\{2.228\} \pm 0.039 \pm 0.042$

Основные вклады в систематическую неопределённость величины R в эксперименте КЕДР приведены в таблицах 2, 3 и 4. При усреднении

результатов измерения величины R в заданной точке по энергии отдельные измерения рассматриваются как независимые эксперименты, имеющие независимые статистические и частично коррелированные систематические ошибки. Найденные результаты усредняются с весами, учитывающими статистические погрешности и некоррелированные вклады систематических неопределённостей. Итоговая систематическая неопределённость результата содержит как коррелированную составляющую, так и вклад, вычисленный путём взвешивания некоррелированных систематических погрешностей отдельных измерений.

Таблица 2. Систематические неопределённости величины R в эксперименте 2010 г., %. Введены обозначения точек «т. n », соответствующие точкам сканирования R , приведённым в таблице 1.

	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7
Светимость	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Рад. поправка	2.0	1.5	1.2	1.0	0.9	0.7	0.6
Мод. uds континуума	6.6	2.5	2.5	1.2	1.2	1.2	1.2
Эфф. восст. трека	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Вклад процессов l^+l^-	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
Вклад процессов e^+e^-X	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Эффективность триггера	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Ядерное взаимодействие	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Нейтральные события	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вар. условий отбора	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Ускорительный фон	0.6	0.5	0.4	0.7	0.8	0.6	0.8
Определение энергии	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Квадратичная сумма	7.1	3.4	3.2	2.4	2.4	2.2	2.2
	т. 8	т. 9	т. 10	т. 11	т. 12	т. 13	
Светимость	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
Рад. поправка	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Мод. uds континуума	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
Эфф. восст. трека	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
Вклад процессов l^+l^-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
Вклад процессов e^+e^-X	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Эффективность триггера	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
Ядерное взаимодействие	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
Нейтральные события	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Вар. условий отбора	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
Ускорительный фон	0.4	0.6	0.8	0.4	0.9	0.5	
Определение энергии	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Квадратичная сумма	2.1	2.2	2.2	2.1	2.3	2.1	

Таблица 3. Систематические неопределённости величины R в эксперименте 2011 г., %.

	т. 15	т. 16	т. 17	т. 18	т. 20	т. 21	т. 22
Светимость	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Рад. поправка	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5
Мод. uds континуума	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	2.1
Эфф. восст. трека	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Вклад процессов l^+l^-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
Вклад процессов e^+e^-X	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
Эффективность триггера	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ядерное взаимодействие	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вар. условий отбора	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Сканирование 1							
Вклад J/ψ и $\psi(2S)$	2.7	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	1.4
Ускорительный фон	1.1	0.8	0.7	0.7	0.9	0.7	0.7
Квадратичная сумма	3.5	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1	3.0
Сканирование 2							
Вклад J/ψ и $\psi(2S)$	2.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	1.3
Ускорительный фон	1.1	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.5
Квадратичная сумма	3.6	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.9
Корр. часть ошибки	2.3	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	2.5

Таблица 4. Систематические неопределённости величины R в эксперименте 2014-2015 гг., %.

	т. 14	т. 15	т. 16	т. 17	т. 18	т. 19	т. 21	т. 22
Светимость	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Рад. поправка	0.8	0.8	0.5	0.7	0.6	0.5	0.7	0.5
Мод. uds континуума	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Эфф. восст. трека	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Вклад процессов e^+e^-X	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вклад процессов l^+l^-	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
Эффективность триггера	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Ядерное взаимодействие	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вариация условий отбора	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Вклады J/ψ и $\psi(2S)$	0.1	1.8	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	1.1
Ускорительный фон	0.4	0.8	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.6
Квадратичная сумма	1.9	2.7	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	2.2

При определении $R(s)$ учитывался прямой, не связанный с «радиационным хвостом» вклад J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Ошибка определения данного вклада пренебрежимо мала по сравнению с погрешностями найденных значений $R_{uds}(s)$.

Результаты измерения величины $R(s)$ представлены на рисунке 3 совместно с данными предыдущих экспериментов. Ниже 3.07 ГэВ точность измерения величины R лучше 3.9%, а выше 2.6%, при систематических неопределённостях 2.4% и 1.9% соответственно. В диапазоне энергии от 1.84 до 3.05 ГэВ средневзвешенное экспериментальное значение R_{uds} равное $2.225 \pm 0.020 \pm 0.047$ согласуется с теоретическим расчётом, выполненным в рамках теории возмущений КХД и дающим значение $R_{uds}^{pQCD} = 2.18 \pm 0.02$. Для диапазоне энергии от 3.07 до 3.72 ГэВ среднее значение $\bar{R}_{uds} = 2.204 \pm 0.014 \pm 0.026$ примерно на одно стандартное отклонение выше ожидаемой согласно теории величины $R_{uds}^{pQCD} = 2.16 \pm 0.01$.

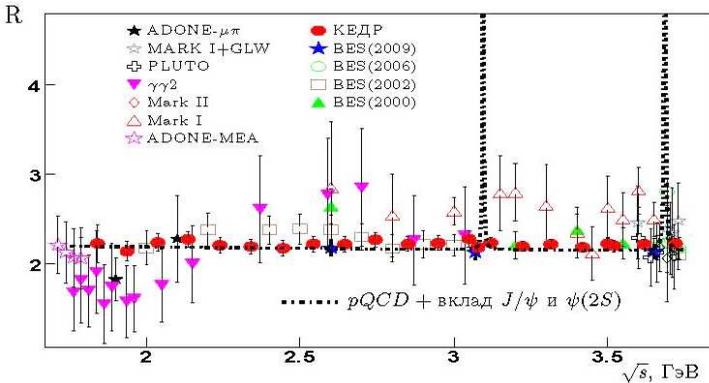


Рис. 3. Величина $R(s)$, измеренная в эксперименте с детектором КЕДР на ускорительном комплексе ВЭПП-4М, в сравнении с результатами других экспериментов и теоретическим расчётом.

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/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Здесь же подробно обсуждаются условия отбора событий процессов $e^+e^- \rightarrow$ адроны и $e^+e^- \rightarrow (\gamma)$, последний из которых используется для вычисления светимости.

Определение параметров резонансов осуществлялось путём минимизации функции правдоподобия, включающей ожидаемые и найденные числа событий e^+e^- -рассеяния и адронных событий. Экспериментальные точки и кривые подгонки показаны на рисунке 4. Слева на рисунке 4 показано адронное сечение аннигиляции электрон-позитронной пары в зависимости от энергии для трёх сканирований $\psi(2S)$. Экспериментальные данные приведены с поправкой на эффективность восстановления событий, полученной из моделирования. Разница между сканированиями связана с различной в трёх сканированиях величиной энергетиче-

ского разброса, которая соответственно равна $\sigma_W = 1.08 \pm 0.02$, $\sigma_W = 1.06 \pm 0.01$ и $\sigma_W = 0.98 \pm 0.01$ МэВ. В правой части рисунка 4 приведено наблюдаемое адронное сечение аннигиляции электрон-позитронной пары в зависимости от энергии, полученное при сканировании J/ψ -резонанса.

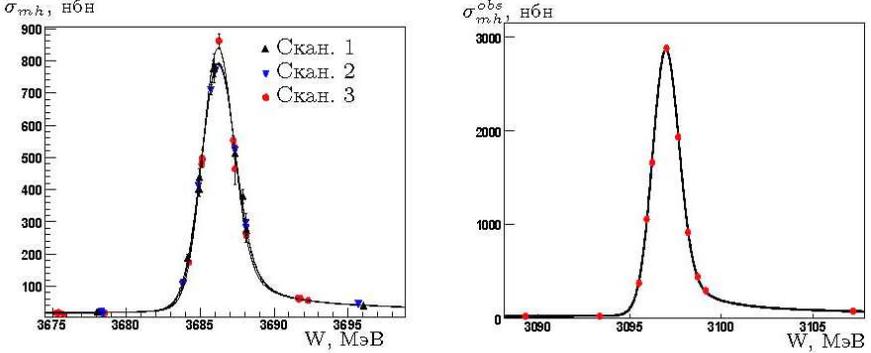


Рис. 4. Адронное сечение аннигиляции электрон-позитронной пары вблизи J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Кривые – результаты подгонки резонансов.

Моделирование распадов $J/\psi \rightarrow \text{адроны}$ и $\psi(2S) \rightarrow \text{адроны}$ выполняется программой, разработанной коллаборацией BES в рамках пакета JETSET 7.4. Сравнение распределений заряженной множественности для событий моделирования процессов $J/\psi \rightarrow \text{адроны}$ и $\psi(2S) \rightarrow \text{адроны}$ с экспериментальными данными представлено на рисунке 5.

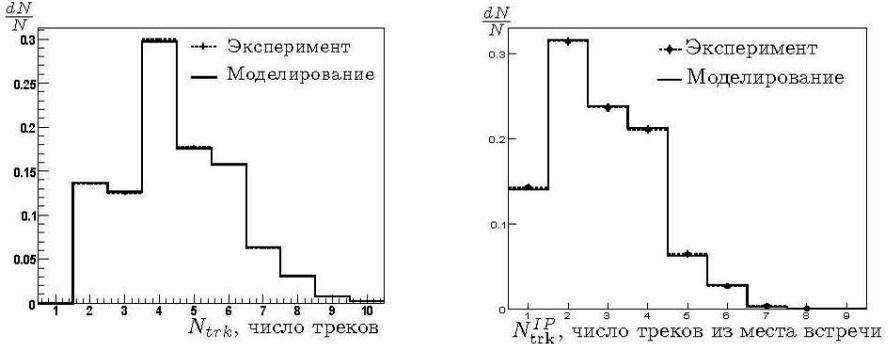


Рис. 5. Распределение по заряженной множественности для событий процессов $\psi(2S) \rightarrow \text{адроны}$ (слева) и событий $J/\psi \rightarrow \text{адроны}$ (справа). Здесь N – полное число событий в гистограмме. Все распределения нормированы.

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

Неопределённость эффективности регистрации адронных событий является одной из основных систематических погрешностей при измерении сечения рождения J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов. Данная неопределённость 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/ψ - и $\psi(2S)$ -мезонов использовался только один генератор, разработанного в рамках пакета программ JETSET 7.4, то основой оценки систематической неопределённости первичного моделирования послужило рассмотрение большого числа существенно отличающихся вариантов моделирования, полученных при различных опциях и параметрах с достаточной степенью достоверности описывающих данные. Сам по себе процесс выбора удовлетворительных вариантов моделирования осуществлялся следующим образом:

1. исходя из представлений о процессе фрагментации партонных и адронных, модифицировалась наиболее критичная опция или параметр;
2. выбирался дополнительный параметр, изменение которого позволяло согласовать среднее значение заряженной множественности, полученную моделированием, с экспериментальным значением;
3. проводилось моделирование при нескольких значениях этого параметра с тем, чтобы получить зависимость эффективности отбора событий от множественности.

Кроме заряженной множественности контролировались распределения ряда других инклюзивных характеристик события. При обнаружении видимого несогласия с экспериментальными данными полученный вариант моделирования отвергался. Было рассмотрено более ста различных наборов опций и параметров при моделировании распадов $\psi(2S)$ -мезона и несколько десятков вариантов генерации распадов J/ψ .

Итоговая погрешность определения величины $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$, связанная с первичным моделированием, вместе с остальными по систематическим неопределённостям приведена в таблице 5. Для величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\psi(2S)$ -мезона $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ получен следующий результат:

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 2.233 \pm 0.015 \pm 0.037 \pm 0.020 \text{ кэВ.}$$

Первая и вторая ошибка соответствует статистической и систематической погрешности результата. Модельная зависимость результата характери-

зается третьей ошибкой. В предыдущих работах она не учитывалась. Точность настоящего результата почти на порядок превосходит по точности результат коллаборацией MARK-I, опубликованный более сорока лет назад. Такое сравнение верно в историческом плане, но не отражает реального состояния дел, поскольку в публикациях по измерению параметров узких резонансов обычно приводят электронную ширину. Как правило рассматриваются работы, представляющие результаты в виде электронной ширины с точностью, существенно превосходящей точность результата MARK-I.

Таблица 5. Основные источники погрешности при вычислении $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$. Для первого и второго сканирования в скобках указана общая часть ошибки. Величины ошибок указаны в %.

Источник погрешности	Эксперимент по измерению параметров $\psi(2S)$				Эксперимент по измерению параметров J/ψ
	скан. 1	скан. 2	скан. 3	общая часть	
Измерение светимости	1.6	1.7(1.6)	1.2	0.5	1.0
Моделирование адронных событий	1.0	1.0(1.0)	1.1	1.0	0.7
Неопределённости, связанные с детектором					
Триггер	0.2	0.2(0.2)	0.2	0.2	0.5
Описание ядерного взаимодействия	0.2	0.2(0.2)	0.3	0.2	0.2
Наводка между каналами в ВД	0.1	0.17(0.1)	0.1	0.1	0.2
Угловое разрешение	Включена в ошибку измерения светимости				0.2
Критерии подавление космических событий	—	—	—	—	0.3
Вариации критериев отбора событий (раздел)					
	0.5	0.3(0.3)	0.6	0.3	0.5
Особенности работы коллайдера					
Определение энергии	0.15	0.18(0.15)	0.6	0.15	0.3
Форма распределения по энергии	0.2	0.2(0.2)	0.2	0.2	0.2
Пучковый фон	0.1	0.1(< 0.1)	0.1	< 0.1	0.2
Теоретическое описание					
Расчёт сечения	0.3	0.3(0.3)	0.3	0.3	0.4
Квадратичная сумма	2.0	2.1(2.0)	1.9	1.3	1.6

Используя произведение $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ и среднемировые значения вероятности распадов $\psi(2S)$ в адроны $\mathcal{B}_h = 0.9875 \pm 0.0013$ и e^+e^- -пару $\mathcal{B}_{ee} = 0.00772 \pm 0.00017$, получаем электронную и полную ширину $\psi(2S)$ -

резонанса:

$$\begin{aligned}\Gamma_{ee} &= 2.282 \pm 0.015 \pm 0.038 \pm 0.021 \text{ кэВ}, \\ \Gamma &= 296 \pm 2 \pm 8 \pm 3 \text{ кэВ}.\end{aligned}$$

Точность, приведённых значений электронной и полной ширины, превосходит в два-три раза наиболее точные измерения, сделанные в работах коллаборации BES. В 2018 году коллаборацией КЕДР были проанализированы лептонные моды распада $\psi(2S)$ -мезона и подтвержден результат для электронной ширины, указанный выше.

Измеренная величина произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны J/ψ -мезона $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ составляет:

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 4.884 \pm 0.048 \pm 0.078 \text{ кэВ},$$

что в четыре раза превосходит по точности результат предыдущего наиболее точного измерения данной величины, выполненного коллаборацией BES.

В заключении представлены основные результаты работы:

- Впервые выполнено подробное измерение величины R в двадцати двух точках по энергии в диапазоне энергий от 1.84 до 3.72 ГэВ, что соответствует области энергии от порога рождения пары протон-антипротон до порога рождения $D\bar{D}$ -пары очарованных мезонов. Измерения величины R в области энергий от 1.84 до 3.05 ГэВ в большинстве точек выполнено с точностью 3.9% при систематической неопределённости 2.4%, подобный уровень систематической погрешности в указанном диапазоне энергии достигнут впервые. В диапазоне энергии от 3.08 до 3.72 ГэВ измерения величины R в большинстве точек выполнено с точностью 2.6% при уровне систематической неопределённости 1.9%. Показано, что результаты измерения величины R хорошо согласуются с расчётом, выполненным в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики.
- Впервые для получения величины R в области энергии, где важен учёт узких резонансов, использовался метод явного вычитания J/ψ - и $\psi(2S)$ -резонансов, параметры которых были определены с высокой точностью из экспериментальной подгонки.
- С точностью 2.0% измерена величина произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для $\psi(2S)$ -мезона, получено значение

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 2.233 \pm 0.015 \pm 0.037 \pm 0.020 \text{ кэВ},$$

что позволяет в два раза повысить точность определения значений полной и электронной ширин $\psi(2S)$.

- С точностью 1.9% измерена величина произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h$ для J/ψ -мезона, получено значение

$$\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_h = 4.884 \pm 0.048 \pm 0.078 \text{ кэВ},$$

что по точности в четыре раза превосходит предыдущее наиболее точное прямое измерение данной величины. Данный результат получен Т. А. Харламовой под непосредственным научным руководством автора.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах (в рецензируемых журналах ВАК):

1. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of main parameters of the $\psi(2S)$ resonance. Phys. Lett. B **711**, 280 (2012).

2. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of $\Gamma_{ee}(J/\psi)$ with KEDR detector. Journal of High Energy Physics **05**, 119 (2018).

3. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of R_{uds} and R between 3.12 and 3.72 GeV at the KEDR detector. Phys. Lett. B **753**, 533 (2016).

4. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of R between 1.84 and 3.05 GeV at the KEDR detector. Phys. Lett. B **770**, 174 (2017).

5. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Precise measurement of R_{uds} and R between 1.84 and 3.72 GeV at the KEDR detector. Phys. Lett. B **788**, 42 (2019).

6. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of $\Gamma_{ee} \times \mathcal{B}_{\mu\mu}$ for $\psi(2S)$. Phys. Lett. B **781**, 174 (2018).

7. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Search for narrow resonances in e^+e^- annihilation between 1.85 and 3.1 GeV with the KEDR Detector. Phys. Lett. B **703**, 543 (2011).

8. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$ and $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$. Phys. Lett. B **685**, 134 (2010).

9. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of the ratio of the lepton widths $\Gamma_{ee}/\Gamma_{\mu\mu}$ for the J/ψ meson. Phys. Lett. B **731**, 227 (2014).

10. V. V. Anashin, . . . , K. Yu. Todyshev *et al.* Measurement of $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$ decay rate and η_c parameters at KEDR. Phys. Lett. B **738**, 391 (2014).

11. Е. Б. Левичев, А. Н. Скринский, Ю. А. Тихонов, К. Ю. Тодышев. Прецизионное измерение масс элементарных частиц на коллайдере ВЭПП-4М с детектором «Кедр». УФН 184, 75 (2014).

ТОДЫШЕВ Корнелий Юрьевич

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 6.07.2019 г.

Подписано в печать 8.07.2019 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 3

Обработано на IBM PC и отпечатано на
роталпринте ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.