

*На правах рукописи*

**ХАРЛАМОВА Татьяна Александровна**

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОЙ И ПАРЦИАЛЬНЫХ  
ШИРИН  $J/\psi$ -МЕЗОНА С ДЕТЕКТОРОМ КЕДР**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата 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.

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ТОДЫШЕВ — кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Корнелий Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.  
Юрьевич

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ДОРОХОВ — доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, ведущий научный сотрудник.  
Александр  
Евгеньевич

ДЗЮБА — кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Гатчина, старший научный сотрудник.  
Алексей  
Александрович

ВЕДУЩАЯ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева  
ОРГАНИЗАЦИЯ: РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится « 3 » декабря 2019 г. в « 10:00 » 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

Данная диссертация посвящена прецизионному измерению полной и парциальных ширин  $J/\psi$ -мезона. Параметры  $J/\psi$ -мезона определяются фундаментальными свойствами сильного и электромагнитного взаимодействий  $c$ -кварков. Узкие резонансы дают вклад в поляризацию вакуума, и таким образом используются для вычисления  $R$ , массы  $c$ -кварка и адронного вклада в  $(g-2)$  мюона, что делает необходимым повышение точности определения их характеристик.

Лептонная ширина  $J/\psi$ -мезона пропорциональна квадрату константы связи, которая в свою очередь определяется волновой функцией  $c$ -кварка. Волновая функция может вычисляться с помощью потенциальных моделей и решёточных расчётов квантовой хромодинамики (КХД). Точность получения лептонной ширины  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  с помощью многочисленных потенциальных моделей и решёточных расчётов постоянно улучшается и уже сравнима со среднемировой точностью определения лептонной ширины. Таким образом новые прецизионные измерения лептонных ширин помогают развитию методов решёточных расчётов. Кроме того, их точное знание стимулирует развитие потенциальных моделей чармония, повышающую предсказательные возможности этих моделей для более сложных кварковых состояний.

В современных адронных экспериментах, таких как ALICE, ATLAS, CMS, ЛНСб, измерение сечения инклюзивного рождения  $J/\psi$ -мезона при высоких энергиях также играет важную роль, так как резонанс достаточно легко идентифицируется по распаду в пару лептонов. Во-первых, ширина  $J/\psi$ -мезона используется для проверки предсказаний, полученных в рамках квантовой хромодинамики. Во-вторых, параметры  $J/\psi$ -резонанса имеют методическое значение определения эффективностей и калибровки детектора.

При обработке эксклюзивных каналов распада  $J/\psi$ -мезона важную роль играет информация с дрейфовой камеры. Одной из целей диссертационной работы была разработка метода идентификации заряженных частиц по их ионизационным потерям в дрейфовой камере.

## Цели работы состояли в следующем:

- прямое прецизионное измерение ширины  $J/\psi$ -мезона;

- измерение парциальных ширин  $J/\psi$ -мезона и величины произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$ ;
- разработка метода идентификации заряженных частиц по их ионизационным потерям в дрейфовой камере.

## Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автором проведен анализ экспериментальных событий процессов  $e^+e^- \rightarrow$  адроны и  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  в области энергии рождения  $J/\psi$ -мезона с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М по данным 2005 г. и оценены систематические неопределённости результата. Кроме того, с 2015 г. до настоящего времени автор проводит калибровку трековой системы детектора КЕДР, включающую в себя дрейфовую камеру и вершинный детектор. Также автором разработаны программы для калибровки ионизационных потерь в дрейфовой камере и идентификации заряженных частиц.

## Научная новизна

Для получения полной и лептонной ширины  $J/\psi$ -мезона в экспериментах ВаВаг, CLEO и BESIII измерялась величина  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\mu\mu}(J/\psi)$  в процессе с излучением в начальном состоянии  $e^+e^- \rightarrow J/\psi\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ . При этом вероятность распада на мюонную  $\mathcal{B}_{\mu\mu}(J/\psi)$  и электронную  $\mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$  пару бралась из других экспериментов. На установках BES и КЕДР было проведено сканирование резонанса и измерено произведение электронной ширины  $J/\psi$ -мезона на вероятность его распада в исследуемое конечное состояние. В эксперименте BES в 1995 году изучались все возможные моды распада - на лептоны и адроны, однако достигнутая точность измерения ширины составила 10.5 %. В эксперименте КЕДР в 2010 году были рассмотрены лептонные  $e^+e^-$  и  $\mu^+\mu^-$  конечные состояния и измерены величины  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\mu\mu}(J/\psi)$ . В данной работе изучены адронное и электронное  $e^+e^-$  конечные состояния, что вместе с измеренным на детекторе КЕДР отношением лептонных ширин  $\Gamma_{ee}/\Gamma_{\mu\mu}$  позволило измерить полную и парциальные ширины прямым методом, используя данные только одного эксперимента. Достигнутая точность результатов для значений  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  в четыре раза превосходит результаты предыдущих экспериментов.

## Научная и практическая ценность

Полученные автором результаты измерения параметров  $J/\psi$ -мезона были включены в таблицы среднемировых значений, подготовленные ParticleDataGroup (PDG), и улучшили среднемировую точность определения лептонной ширины. Результаты, полученные для значения  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$ , определяют среднемировое значение.

В работе проведена настройка моделирования распадов  $J/\psi$ -мезона методом Монте-Карло и получены параметры генератора событий JETSET, что может использоваться в будущих экспериментах.

Разработанные автором программы калибровки ионизационных потерь и идентификации заряженных частиц могут использоваться в экспериментах с детектором КЕДР на ВЭПП-4М.

## Основные положения, выносимые на защиту:

- Напрямую измерена полная  $\Gamma(J/\psi)$ , парциальные адронная  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$  и электронная  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  ширины  $J/\psi$ -мезона с точностью 2.2, 2.3 и 1.9 % соответственно. С помощью принципа лептонной универсальности получена парциальная мюонная ширина  $\Gamma_{\mu\mu}(J/\psi)$  с точностью 2.0 %.
- Измерена величина произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны для  $J/\psi$ -мезона  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  с точностью 1.9 %.
- Написано программное обеспечение для анализа данных об ионизационных потерях  $dE/dx$  в дрейфовой камере детектора КЕДР и идентификации заряженных частиц. Проведена калибровка ионизационных потерь с помощью космических мюонов, достигнутое разрешение составило 9.5 % для минимально ионизирующих частиц при нормальном падении.

## Степень достоверности и апробация результатов

В настоящей работе проведено измерение полной и парциальных ширин  $J/\psi$ -мезона. Полученные результаты согласуются с измерениями, выполненными в предыдущих экспериментах ADONE, MARKI, DASP, BES, BaBar, CLEO и BESIII. При этом полученные в работе результаты для значений полной и лептонной ширины  $J/\psi$ -мезона являются прямой и

независимой проверкой, так как получены при сканировании резонанса. Достигнутые результаты для значений  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  имеют в четыре раза лучшую точность в сравнении с последним измерением в адронном канале.

Материалы были представлены на следующих международных и российских конференциях: International Workshop on Heavy Quarkonium в мае 2019 г., в ноябре 2017 г. и в июне 2016 г., International Workshop on  $e^+e^-$  collisions from Phi to Psi в феврале 2019 г. (Новосибирск, Россия), в июне 2017 г. (Майнц, Германия) и в сентябре 2015 г., The 9<sup>th</sup> International Workshop on Charm Physics в мае 2018 г. (Новосибирск, Россия), на семинаре ЦЕРН-ИЯФ по  $e^+e^-$ -коллайдерам в августе 2016 г. (Женева, Швейцария), на Международной сессии-конференции секции ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук (ОФН РАН) в ноябре 2013 г. (Москва, Россия), а также на Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс" в апреле 2013 г. (Новосибирск, Россия).

Результаты диссертации опубликованы в международных научных журналах [1-6], входящих в список ВАК по направлению «Физика».

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка иллюстраций и списка таблиц. Объём диссертации составляет 125 страниц, включая 52 рисунка и 19 таблиц. Список литературы содержит 100 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обсуждаются актуальность и практическая значимость проведённых исследований, сформулированы цели диссертационной работы, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** описана история открытия  $J/\psi$ -мезона и семейства чармония в 1974 г., а также даётся обзор экспериментов по изучению параметров резонанса.

Измерение ширины  $J/\psi$ -мезона проводилось в экспериментах MarkI и ADONE с точностью  $\sim 20\%$ , затем на детекторах BES, BaBar, CLEO, КЕДР и обновленном BESIII. На установках BES и КЕДР было проведено сканирование резонанса, при этом площадь под графиком наблюдаемого

сечения в зависимости от энергии пропорциональна произведению электронной ширины  $J/\psi$ -мезона на вероятность его распада в исследуемое конечное состояние. В экспериментах BaBar, CLEO и BESIII измерялась величина  $\Gamma_{ee} \cdot \mathcal{B}_{\mu\mu}(J/\psi)$  в процессе с излучением в начальном состоянии  $e^+e^- \rightarrow J/\psi\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$  с точностью 3.2, 2.7 и 1.5 % соответственно. В таблице 1 приведены результаты для значений  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma(J/\psi)$ , полученных из данных наиболее точных экспериментов и решёточных расчётов КХД. При этом значения, приводимые для экспериментов BaBar, CLEO, КЕДР и BESIII, были рассчитаны по измеренным величинам с учётом наиболее актуальных значений вероятностей распада  $J/\psi$ -мезона на пару лептонов, взятых из таблиц PDG.

Таблица 1. Результаты наиболее точных значений  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma(J/\psi)$ , полученных в различных экспериментах.

Эксперимент	$\Gamma_{ee}(J/\psi)$ , кэВ	$\Gamma(J/\psi)$ , кэВ	Процесс
BES 95	$5.14 \pm 0.39$	$84.4 \pm 8.9$	$e^+e^- \rightarrow$ адроны, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ , $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
BaBar 04	$5.53 \pm 0.18$	$92.7 \pm 3.1$	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ ISR
CLEO 06	$5.68 \pm 0.16$	$95.1 \pm 2.7$	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ ISR
КЕДР 10	$5.57 \pm 0.13$	$93.2 \pm 2.0$	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ , $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$
BESIII 16	$5.59 \pm 0.09$	$93.7 \pm 1.6$	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ ISR
PDG	$5.55 \pm 0.14 \pm 0.02$	$92.9 \pm 2.8$	
КЕДР 18	$5.55 \pm 0.10$	$92.9 \pm 1.8$	$e^+e^- \rightarrow$ адроны, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$
Решёточные КХД-расчёты:			
HISQ	$5.48 \pm 0.16$	$91.8 \pm 2.7$	
Twisted mass	$5.8 \pm 0.2$	$97.1 \pm 3.4$	

Сечение аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow$  адроны вблизи энергии  $J/\psi$ -резонанса можно записать в виде:

$$\sigma_{\text{n.r.}}^{\text{адр}}(W) = \frac{12\pi}{W^2} \left\{ \left( 1 + \delta_{\text{sf}} \right) \left[ \frac{\Gamma_{ee}\Gamma_{\text{адр}}}{\Gamma M} \text{Im} f(W) - \frac{2\alpha\sqrt{R}\Gamma_{ee}\Gamma_{\text{адр}}}{3W} \lambda \text{Re} \frac{f^*(W)}{1-\Pi_0} \right] - \frac{\beta\Gamma_{ee}\Gamma_{\text{адр}}}{2\Gamma M} \left[ \left( 1 + \frac{M^2}{W^2} \right) \arctan \frac{\Gamma W^2}{M(M^2 - W^2 + \Gamma^2)} - \frac{\Gamma M}{2W^2} \ln \frac{\left( \frac{M^2}{W^2} \right)^2 + \left( \frac{\Gamma M}{W^2} \right)^2}{\left( 1 - \frac{M^2}{W^2} \right)^2 + \left( \frac{\Gamma M}{W^2} \right)^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $W$  – энергия в системе центра масс (СЦМ),  $M$  – масса резонанса,  $\Gamma$  – полная ширина резонанса,  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры и  $R$  – отношение  $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$  вне области резонанса. Оператор поляризации вакуума  $\Pi_0$  не включает в себя вклад от резонанса. Первое слагаемое в (1) соответствует процессу рождения резонанса  $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow$  адроны, второе – поправке на интерференцию, третье и четвертое – поправке на излучение энергичного фотона.

Радиационная поправка  $\delta_{\text{sf}}$ , входящая в формулу (1), получена до членов, содержащих  $\beta^2$ :

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

$$\beta = \frac{4\alpha}{\pi} \left( \ln \frac{W}{m_e} - \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

где  $m_e$  – масса электрона. Функция  $f$  определена следующим образом:

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

Параметр  $\lambda$  характеризует силу интерференционных эффектов в инклюзивном сечении рождения адронов, являясь отношением амплитуд однофотонного и общего адронного конечных состояний, и в предположении,



что относительные фазы для амплитуд сильного и электромагнитного взаимодействий в различных модах распада не скоррелированы, равен:

$$\lambda = \sqrt{\frac{R\mathcal{B}_{ee}}{\mathcal{B}_{\text{адр}}}}. \quad (5)$$

Дифференциальное сечение процесса  $e^+e^-$  можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{ee\rightarrow ee} &= \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{КЭД}}^{ee\rightarrow ee} + \frac{1}{W^2} (1 + \delta_{sf}) \left\{ \frac{9}{4} \frac{\Gamma_{ee}^2}{4GM} (1 + \cos^2 \theta) \text{Im } f - \right. \\ &\quad \left. \frac{3\alpha}{2} \frac{\Gamma_{ee}}{M} \left[ (1 + \cos^2 \theta) \text{Re} \frac{f^*}{1 - \Pi_0(s)} - \frac{(1 + \cos \theta)^2}{(1 - \cos \theta)} \text{Re} \frac{f^*}{1 - \Pi_0(t)} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $s = W^2$  и  $t = -W^2 \cdot (1 - \cos \theta)/2$  – квадрат энергии в СЦМ и передачи импульса,  $\theta$  – угол рассеяния электрона. Первое слагаемое в выражении (6) представляет собой квантовое электродинамическое сечение упругого рассеяния, полученное методом моделирования Монте Карло. Второе слагаемое характеризует вклад резонанса, а третье – их интерференцию. Формулы (1) и (6) позволяют вычислять сечения с точностью около 0.1 %.

**Во второй главе** описывается ускорительный комплекс ВЭПП-4 и детектор КЕДР.

Комплекс ВЭПП-4 состоит из линейного ускорителя электронов до энергии 50 МэВ, синхротрона Б-4, промежуточного накопителя ВЭПП-3 и  $e^+e^-$ -коллайдера ВЭПП-4М. Ускоритель спроектирован для работы в диапазоне энергий сталкивающихся пучков от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс и в области  $J/\psi$ -мезона имеет пиковую светимость  $\sim 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Установка позволяет измерять энергию пучков с хорошей точностью двумя независимыми методами – методом резонансной деполяризации и методом обратного комптоновского рассеяния.

Детектор КЕДР является универсальным магнитным детектором для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках. Основные системы КЕДРа включают в себя трековую систему, состоящую из вершинного детектора и дрейфовой камеры (ДК), два калориметра – баррельный CsI и торцевой жидкокриптоновый (ЛКр), сцинтилляционные счётчики, аэрогелевые черенковские счётчики, мюонную систему и монитор светимости. В главе приведено краткое описание основных систем детектора.

**Третья глава** посвящена дрейфовой камере детектора КЕДР.

ДК состоит из семи суперслоев – четырёх аксиальных и трех стерео. Каждый суперслой состоит из ячеек с шестью рабочими анодными проволочками. Всего в камере 1512 анодных проволочек. Частица, пересекающая все суперслои ДК, даёт 42 измерения координаты и ионизационных потерь. Основными особенностями ДК детектора являются:

- конструкция из аксиальных и стерео слоев для измерения продольной координаты;
- использование ДМЭ («холодного газа») для достижения пространственного разрешения порядка 100 мкм при характерном размере ячейки  $\sim 30$  мм.

Для калибровки ионизационных потерь энергии  $dE/dx$  используются данные заходов с космическими частицами (преимущественно мюонами). Для каждой проволочки строятся распределения ионизационных потерь, которые имеют вид несимметричных колоколообразных функций. К измеряемым амплитудам сигналов применяется ряд поправок для их унификации и последующего суммирования:

- поправка на отличие коэффициентов газового усиления для различных анодных проволочек;
- калибровочные константы электроники;
- нормировка на  $dx$ ;
- коррекция на расстояние от трека до анодной проволочки;
- поправка, связанная с временем дрейфа;
- поправка, определяемая углом наклона трека к анодной проволочке;
- поправка, определяемая углом наклона трека к линии дрейфа;
- поправка, связанная с продольной координатой.

Вычисление ионизационных потерь  $dE/dx$  на треке проводилось суммированием измеряемых потерь по хитам с весами, пропорциональными  $dx$ :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{трека}} = \frac{\sum NU_{sedHits} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{хита}} \cdot W_{\text{хита}}}{\sum NU_{sedHits} W_{\text{хита}}}, \quad (7)$$

где  $W_{\text{хита}} = \left(\frac{1}{dX\alpha}\right)^2$  и  $\alpha = 0.23$ . При этом используемое число хитов ( $NU_{\text{usedHits}}$ ) зависело от плотности ионизации на треке (модифицированный метод "усечённого среднего").

После учёта найденных эффектов, влияющих на измеренное значение  $dE/dx$ , была построена кривая Бете-Блоха для космических мюонов (рис. 1). Вид зависимости наиболее вероятных потерь энергии  $dE/dx$  от  $\lg(\beta\gamma)$  одинаков для всех видов частиц, в то время как зависимость от импульса имеет "ветки" на малых импульсах, что позволяет проводить идентификацию частиц.

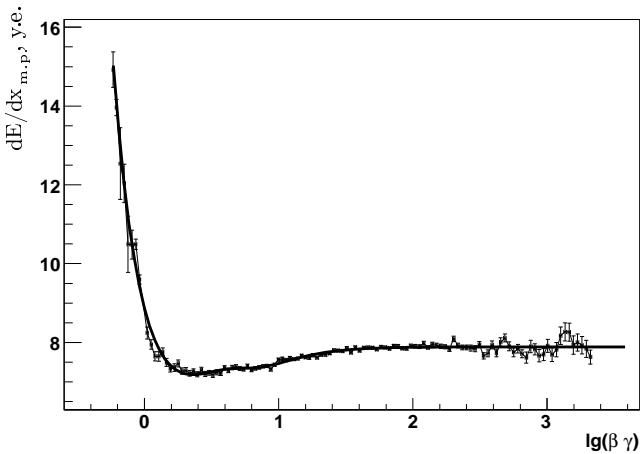


Рис. 1. Зависимость вероятных потерь энергии космических мюонов от  $\beta\gamma$ .

Разрешение дрейфовой камеры по энергетическим потерям является в общем случае функцией нескольких переменных — числа усредняемых амплитуд, длины трека, величины энергетических потерь и поперечного импульса частицы. Для минимально ионизирующих частиц при перпендикулярном падении ( $N = 42$ ,  $L = 42 \times 0.45 \approx 19$  см) разрешение составляет 9.5 %. Проектное разрешение по  $dE/dx$  составляет 10.3 %, разрешение, вычисленное без учёта систематик — 8.2 %. Полученная калибровка позволяет проводить идентификацию релятивистских заряженных частиц.

Параметром, характеризующим возможность различать две частицы, является величина, называемая коэффициентом разделения (сепарации) и определяемая равенствами:

$$S = \frac{\left| \frac{dE}{dx} 1 - \frac{dE}{dx} 2 \right|}{\sigma}, \quad \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}. \quad (8)$$

Здесь  $\frac{dE}{dx}_{1,2}$ ,  $\sigma_{1,2}$  — наиболее вероятные ионизационные потери энергии и стандартные отклонения потерь энергии для первой и второй частиц соответственно.

Были построены зависимости величины сепарации  $S$  от импульса для пионов, каонов и протонов (рис. 2). Из зависимости от импульса величины  $S$  видно, что степень разделения  $\pi - K$  превышает  $2\sigma$  при импульсе до 480 МэВ/с,  $K - p$  — до 930 МэВ/с,  $\pi - p$  — до 900 МэВ/с.

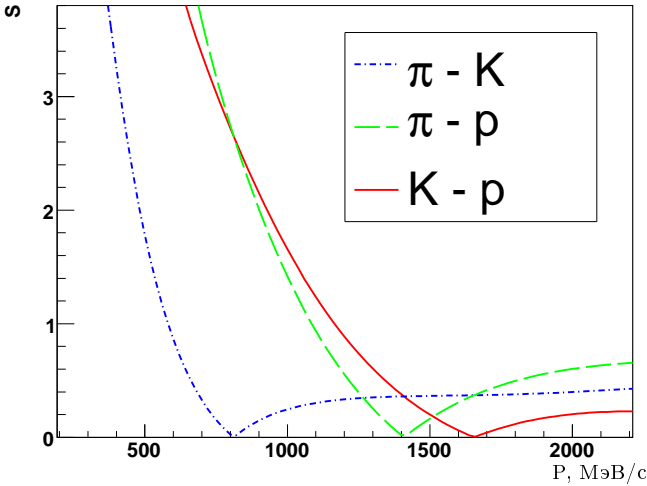


Рис. 2. Зависимость расчётного коэффициента разделения  $S$  (в единицах стандартных отклонений  $\sigma$ ) от импульса.

**В четвёртой главе** описан эксперимент по измерению ширины  $J/\psi$ -мезона. Здесь же подробно обсуждаются условия отбора событий процессов  $e^+e^- \rightarrow$  адроны и  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ , последний из которых используется для вычисления светимости.

Для анализа использовались данные, набранные в 2005 г. в области  $J/\psi$ -мезона. При сканировании набор статистики производился в 11 точках по энергии как показано на рис. 3. Интегральная светимость составила  $230 \text{ нбн}^{-1}$ , что соответствует примерно 250 тысячам рожденных  $J/\psi$ -мезонов.

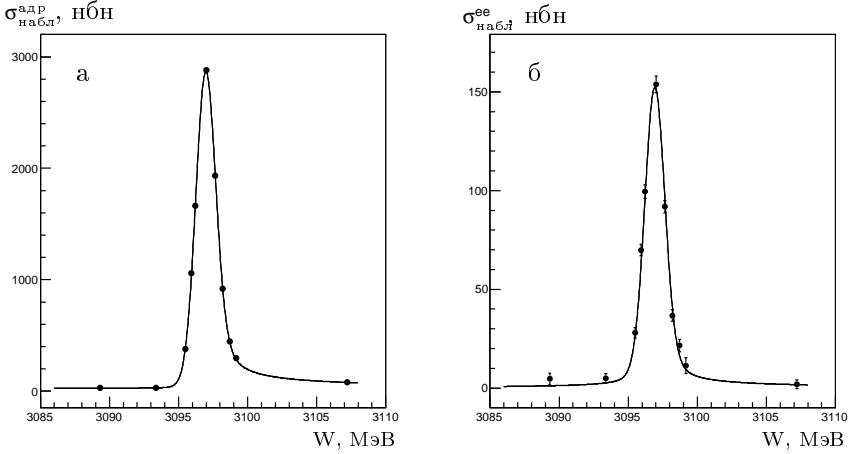


Рис. 3. Наблюдаемое сечение процессов  $J/\psi \rightarrow \text{адроны}$  (а) и  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  (б) в зависимости от энергии центра масс сталкивающихся пучков. Кривые представляют собой результат фитирования.

Абсолютное значение светимости определялось по процессу  $e^+e^-$ -рассеяния на большие углы с учётом вклада от распада  $J/\psi$ -мезона на электрон-позитронную пару по формуле (6). Распределение по углу вылета электрона для отобранных  $e^+e^-$ -событий показано рис. 4. Угловые распределения для событий от упругого Баба-рассеяния и от распадов  $J/\psi$ -мезона сильно различаются, позволяя разделить эти вклады в каждой точке по энергии.

Для получения значений искомых параметров ширины  $\Gamma(J/\psi)$  и её произведения на вероятности распада в электроны и адроны проводилась совместная подгонка данных в адронном и электронном каналах в области энергий  $J/\psi$ -резонанса.

Числа адронных  $N_i$  и электронных  $n_{ij}$  событий, наблюдаемые в каждой энергетической точке  $i$  и в каждом угловом интервале  $j$ , подгонялись одновременно в зависимости от энергии столкновения и угла рассеяния

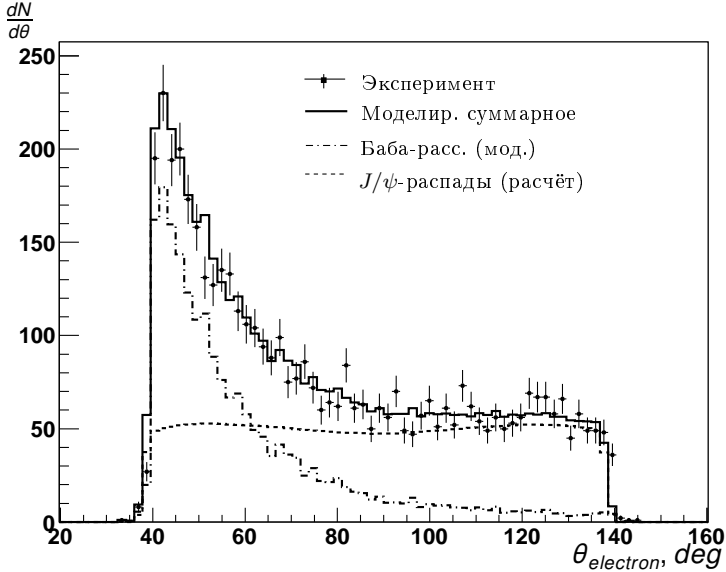


Рис. 4. Распределение по полярному углу электрона при энергии в системе центра масс 3097 МэВ. Точками показаны экспериментальные данные, гистограммы соответствуют моделированию: упругого рассеяния (точкати́ре), распадов  $J/\psi$ -резонанса и их интерференцию, вычисленную по формуле (6) (пунктир), а также сумме всех вкладов (сплошная линия).

электрона с использованием следующей функции минимизации:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(N_i^{\text{эксп}} - N_i^{\text{теор}})^2}{N_i^{\text{эксп}}} + \sum_i \sum_j \frac{(n_{ij}^{\text{эксп}} - n_{ij}^{\text{теор}})^2}{n_{ij}^{\text{эксп}}}, \quad (9)$$

где  $N_i^{\text{эксп/теор}}$  и  $n_{ij}^{\text{эксп/теор}}$  – экспериментально измеренные и теоретически ожидаемые числа адронных и лептонных событий соответственно. Теоретически ожидаемые числа событий определялись следующим образом:

$$\begin{aligned} N_i^{\text{теор}} &= L_i \cdot \sigma^{\text{адр}}(W_i), \\ n_{ij}^{\text{теор}} &= L_i \cdot \sigma^{ee}(W_i, \theta_j). \end{aligned} \quad (10)$$

Наблюдаемые сечение рождения адронов  $\sigma^{\text{адр}}(W_i)$  и электронов  $\sigma^{ee}(W_i, \theta_j)$  получались из формул (1) и (6) с помощью свертки с функцией распределения по энергии сталкивающихся пучков и с учётом детекторных эффективностей. Относительная светимость измерялась монитором светимости по однократному тормозному излучению, коэффициент абсолютной светимости определялся из подгонки.

Статистические ошибки параметров  $\Gamma(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  сильно коррелированы. Для корректного определения ошибок этих величин подгонка экспериментальных данных проводилась отдельно для разных наборов свободных параметров. В первом случае подгонялись величины  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$ , во втором —  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$ , в третьем —  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$ , в четвертом —  $\Gamma(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$ . Все наборы содержали дополнительные свободные параметры: коэффициент абсолютной калибровки светимости  $R_L$ , массу резонанса  $m(J/\psi)$ , энергетический разброс пучков  $\sigma_W$  и сечение видимого континуума  $\sigma_0$ . Для связи значений  $\Gamma(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  использовалось отношение лептонных ширин  $\Gamma_{e^+e^-} / \Gamma_{\mu^+\mu^-}(J/\psi)$ , измеренное коллаборацией КЕДР [6].

**В пятой главе** обсуждаются вопросы, связанные с исследованием и достоверной оценкой систематических неопределённостей выполненного эксперимента, а также приводится сравнение полученного результата с предыдущими экспериментами.

Все вклады в систематическую неопределённость результата были разделены на пять категорий: систематические неопределённости, связанные с измерением светимости, моделированием адронных распадов, детекторными и ускорительными эффектами, теоретические неопределённости. Для большинства вкладов оценки погрешностей лептонной ширины были получены как изменение её значения при подгонке данных, что позволяет непосредственно учесть вклады вариаций от отдельных точек в ошибку измеряемых величин.

К основным источникам неопределённостей, связанных с измерением светимости, относятся: калибровка ЛКг-калориметра, вычисление упругого сечения  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ , определение эффективности регистрации, вариация условий отбора. Неопределённости, связанные с моделированием адронных событий, включают в себя: настройку генератора  $J/\psi \rightarrow$  адроны, отбор событий для настройки генератора, моделирование потери трека и точность табличных вероятностей адронных распадов, по которым проводилось перевзвешивание моделирования. К наибольшему детекторным

неопределённостям относятся: неэффективность триггера, описание ядерного взаимодействия, критерии отбора событий. Ускорительные неопределённости включают в себя: измерение энергии в точке, пучковый фон, негауссовость распределения по энергии в пучке, а теоретические – расчет сечения, модель интерференции и численное интегрирование.

Особенность данного анализа заключается в том, что для энергии в системе центра масс меньше 10 ГэВ не существует надежного генератора распадов. Для моделирования фрагментации партонов в адроны используется лундовская модель, которую необходимо настраивать. Множественность заряженных частиц  $N_{\text{IP}}$  является наиболее чувствительной характеристикой события при вариациях параметров генератора, и поэтому использовалась при настройке. Дополнительно проверялось согласие с экспериментальными данными распределений по сферичности заряженных треков, моментам Фокса-Вольфрама, энерговыделению в калориметре, а также по таким инклюзивным характеристикам события, как распределения по импульсу, азимутальному и полярному углам.

Процедура оценки эффективности регистрации включала в себя следующие этапы:

- вариация одного из параметров JetSet;
- выбор и вариация дополнительного параметра для согласования  $\langle N_{\text{IP}} \rangle$ ;
- определение зависимости эффективности от множественности.

Для оценки этой неопределенности использовался рисунок 5: для заштрихованной прямоугольной области вертикальные границы отображают статистическую ошибку экспериментально измеренной средней множественности, а горизонтальные — соответствующую оценку неопределённости эффективности регистрации, полученные по пересечению вертикальных границ с крайними траекториями изменения параметров генератора.

Итоговая эффективность адронных событий была получена путем усреднения эффективностей, вычисленных для разных вариантов моделирования при средней множественности, соответствующей экспериментально измеренной  $\langle N_{\text{IP}} \rangle$ , как показано на рис. 5, и равнялась  $74.2 \pm 0.4 \%$ .

Основные систематические неопределённости при измерении значений  $\Gamma(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  приведены в таблице 2 и составили 1.6%.

Полученные полная и лептонная ширины хорошо согласуются со среднемировыми значениями и с результатами, полученными в предыдущих экспериментах (рис. 6).



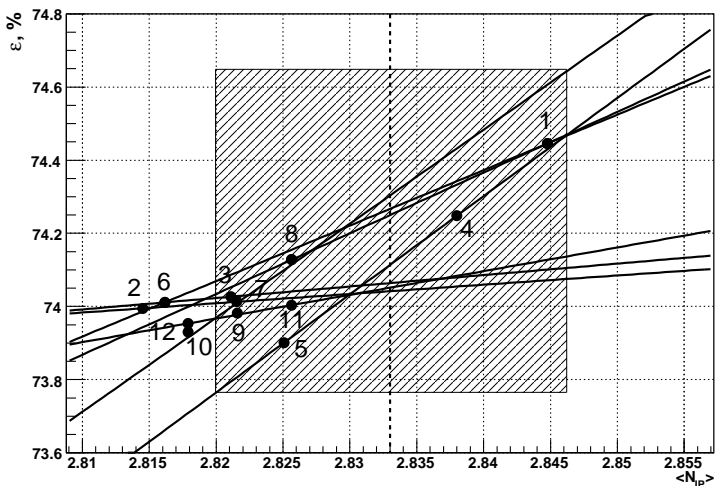


Рис. 5. Эффективность регистрации как функция средней зарядовой множественности для различных вариантов моделирования распадов  $J/\psi$ -мезона.

Таблица 2. Основные систематические неопределённости при измерении значений  $\Gamma(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$ ,  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$ .

Источник	Неопределённость, %
Светимость	1.0
Моделирование распадов $J/\psi$	0.7
Отклик детектора	0.8
Ускорительные эффекты	0.4
Теоретические неопределённости	0.4
Квадратичная сумма	1.6

Полученные результаты для значений  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$  согласуются с результатами предыдущих экспериментов, как показано на рис. 7, и имеют в четыре раза лучшую точность в сравнении с последним измерением в адронном канале коллаборацией BES.

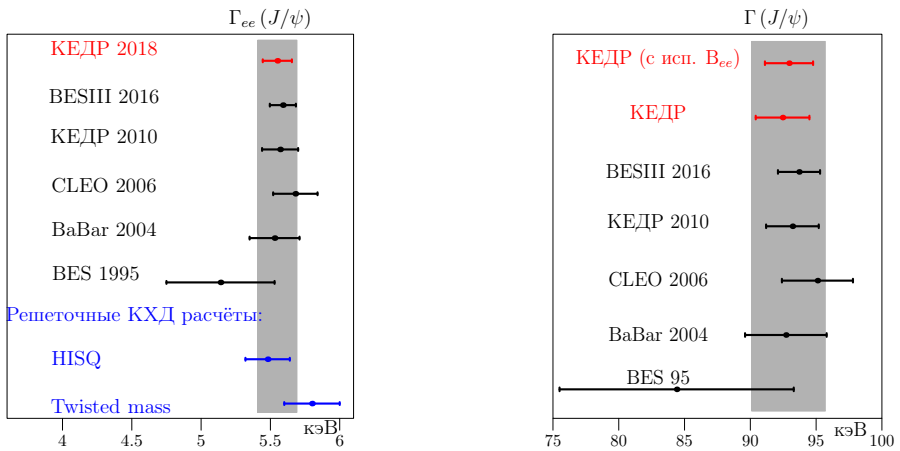


Рис. 6. Сравнение  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  и  $\Gamma(J/\psi)$ , полученных в наиболее точных экспериментах и с помощью вычислений КХД на решётках. Значения  $\Gamma(J/\psi)$ , приведённые экспериментами BESIII, KECD (2010), CLEO (2006), BaBar (2004), получены с использованием среднемировых значений вероятности распада  $J/\psi$ -мезона в пару лептонов. Серым прямоугольником показаны среднемировые значения и их неопределённость.

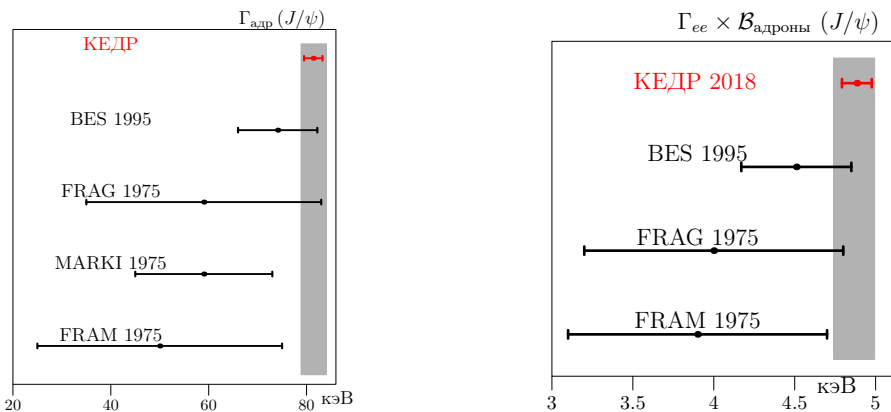


Рис. 7. Сравнение  $\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi)$  и  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi)$ , измеренных в наиболее точных экспериментах. Серым прямоугольником показаны среднемировые значения и их неопределённость.

С помощью измеренного в эксперименте КЕДР отношения лептонных ширин  $\Gamma_{e^+e^-}/\Gamma_{\mu^+\mu^-}(J/\psi)$  и измеренной в данной работе парциальной электронной ширины можно также получить парциальную ширину распада  $J/\psi$ -мезона на мюон-антимюонную пару.

Результаты работы по анализу ширин  $J/\psi$ -мезона включены в обновленные в 2019 г. таблицы PDG.

**В Заключение** представлены основные результаты работы:

- Разработано программное обеспечение для калибровки ионизационных потерь  $dE/dx$  в дрейфовой камере детектора КЕДР, проводимой с помощью космических мюонов, а также для идентификации заряженных частиц по ионизационным потерям. Достигнутое разрешение составило 9.5 % для минимально ионизирующих частиц при нормальном падении, что лучше проектного разрешения 10.3 %.
- Прямым способом измерены полная, адронная и электронная ширины  $J/\psi$ -мезона:

$$\Gamma(J/\psi) = 92.45 \pm 1.40 \pm 1.48 \text{ кэВ},$$

$$\Gamma_{\text{адр}}(J/\psi) = 81.37 \pm 1.36 \pm 1.30 \text{ кэВ},$$

$$\Gamma_{ee}(J/\psi) = 5.550 \pm 0.056 \pm 0.089 \text{ кэВ},$$

С помощью отношения лептонных ширин  $J/\psi$ -мезона  $\Gamma_{e^+e^-}/\Gamma_{\mu^+\mu^-}(J/\psi)$  вычислена мюонная ширина:

$$\Gamma_{\mu\mu}(J/\psi) = 5.538 \pm 0.111 \text{ кэВ}.$$

- Проведено наиболее актуальное измерение произведения электронной ширины на вероятность распада в адроны для  $J/\psi$ -мезона:

$$\Gamma_{ee}(J/\psi) \cdot \mathcal{B}_{\text{адр}}(J/\psi) = 4.884 \pm 0.048 \pm 0.078 \text{ кэВ}.$$

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

1. V. V. Anashin, . . . , T. A. Kharlamova *et al.* Measurement of  $\Gamma_{ee}(J/\psi)$  with KEDR detector. Journal of High Energy Physics **05**, 119 (2018).

2. Т. А. Харламова. Измерение произведения лептонной ширины на вероятность распада  $J/\psi$ -мезона в адроны. Ядерная физика, **78**, 5, с. 399-402 (2015).

T. A. Kharlamova. Measurement of the product of the leptonic width of the  $J/\psi$  meson and the branching ratio for its decay to hadrons. *Physics of Atomic Nuclei* **78**, 3, p. 369-372 (2015).

3. V. V. Anashin, ..., T. A. Kharlamova, *et al.* The KEDR detector. *Physics of Particles and Nuclei* **44**, 4, p. 657–702 (2013).

4. V. V. Anashin, ..., T. A. Kharlamova, *et al.* (KEDR Collaboration). Final analysis of KEDR data on  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  masses. *Phys. Lett. B* **749** 50 (2015).

5. V. V. Anashin, ..., T. A. Kharlamova *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).

6. V. V. Anashin, ..., T. A. Kharlamova *et al.* Measurement of the ratio of the lepton widths  $\Gamma_{ee}/\Gamma_{\mu\mu}$  for the  $J/\psi$  meson. *Phys. Lett. B* **731**, 227 (2014).

*ХАРЛАМОВА Татьяна Александровна*

**Измерение полной и парциальных ширин  $J/\psi$ -мезона с  
детектором КЕДР**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 7.08.2019 г.

Подписано в печать 8.08.2019 г.

Формат бумаги 100×90 1/25 Объем 1.3 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

---

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на  
ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*