

*На правах рукописи*

**БАЛДИН Евгений Михайлович**

**ИЗМЕРЕНИЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРИНЫ  $J/\psi$ -МЕЗОНА  
НА ВЕРОЯТНОСТЬ РАСПАДА В ЛЕПТОНЫ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК — 2010**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН.

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

Тихонов  
Юрий Анатольевич — доктор физико-математических наук, профессор, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

Хазин  
Борис Исаакович — доктор физико-математических наук, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

Сербо  
Валерий Георгиевич — доктор физико-математических наук, профессор, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск.

**ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ:** — ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий», г. Протвино, Московская обл.

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

в « \_\_\_\_\_ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.02 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,  
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2010 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор

В. С. Фадин

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

С 2002 года в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР ведутся эксперименты в области рождения  $\psi$ -резонансов ( $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\psi(3770)$ ) и  $\tau$ -лептона. Измерение фундаментальных параметров  $J/\psi$ -мезона является одной из основных задач этих экспериментов.

Данная работа посвящена определению произведений электронной ширины  $J/\psi$ -мезона и вероятностей его распада на  $e^+e^-$  ( $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ ) и  $\mu^+\mu^-$  ( $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ ) пары с высокой точностью.

$J/\psi$ -мезон является низшим и наиболее узким связанным состоянием  $c\bar{c}$  кварков (чармония) с квантовыми числами  $J^{PC} = 1^{--}$ , который часто называют «атомом водорода» для квантовой хромодинамики. Исследование его параметров представляет особый интерес. Полная  $\Gamma$  и лептонная  $\Gamma_{\ell\ell}$  ширины резонанса дают важную информацию о свойствах сильного взаимодействия.

Теоретическое значение лептонной ширины  $J/\psi$ -мезона может быть вычислено из первых принципов в рамках решёточной КХД, предсказывается с помощью правил сумм КХД и может быть получено в рамках потенциальных моделей. Повышение точности экспериментальных измерений лептонной ширины и других параметров  $J/\psi$  стимулирует прогресс в развитии теории.

Настоящая работа посвящена измерению произведений электронной ширины  $J/\psi$ -мезона и вероятностей его распада на  $e^+e^-$  ( $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ ) и  $\mu^+\mu^-$  пары ( $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ ). В отличие от непосредственного измерения самой лептонной ширины, в случае измерения произведения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\ell\ell}/\Gamma$  отсутствуют систематические ошибки, связанные с неопределённостью моделирования адронных распадов резонанса, поскольку задача сводится к измерению площади под резонансной кривой процесса  $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$  от порога рождения до определённого максимального значения энергии  $e^+e^-$  пары. При наличии независимых данных о вероятности распада  $\mathcal{B}_{ee} = \Gamma_{ee}/\Gamma$  этот результат позволяет получить значение лептонных ширин  $\Gamma_{ee}$  и  $\Gamma_{\mu\mu}$ . Следует также отметить, что для измерения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  требуется сканирование по энергии, т. е. измерение сечения рождения  $e^+e^-$  пары и точное определение энергии в нескольких точках резонансной кривой. В данном эксперименте энергия измерялась с высокой точностью с помощью метода резонансной деполяризации.

## Цель работы состояла в следующем:

- Измерение  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$   $J/\psi$ -мезона;
- Измерение  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$   $J/\psi$ -мезона;
- Создание базы данных детектора КЕДР и организация визуализации медленного контроля для обеспечения проведения экспериментов на комплексе ВЭПП-4М и последующего анализа экспериментальных данных.

## Научная новизна работы

Наиболее точное измерение  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  было проведено в эксперименте DASP в 1979 г. Точность измерения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ , достигнутая в этом эксперименте, составляет 6%. В данной работе точность измерения этой величины улучшена более чем в два раза.

Наиболее точное значение величины  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  было получено с помощью метода радиационного возврата в эксперименте CLEO-c в 2006 году. Точность значения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ , измеренного в настоящей работе, составляет 2.7%, что примерно на 10% лучше результата CLEO-c.

## Личный вклад автора

Автор активно участвовал в подготовке и в проведении эксперимента на установке ВЭПП-4М/КЕДР. На этапе подготовки эксперимента автор был непосредственно задействован в сборке торцевого CsI калориметра, после которой тестировал и настраивал электронику CsI и LKt калориметров. Для обеспечения эксперимента автором была разработана база данных детектора КЕДР. Автор предложил способ измерения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ , проделал анализ данных сканирования  $J/\psi$ -резонанса и получил результаты измерений величин  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  для  $J/\psi$ -мезона, точности которых превышают точность предыдущих результатов измерений.

## Апробация работы

Материалы диссертации были представлены в мае 2009 года на семинаре лабораторий высоких энергий в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера,

в ноябре 2007 года на сессии-конференции Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской Академии Наук в докладе «Измерение  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma_{J/\psi}$ -мезона», в апреле 2008 года на международном рабочем совещании «International Workshop on  $e^+e^-$  collisions from  $\phi$  to  $\psi$ » в Италии в рамках доклада «Results on  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\psi(3770)$  spectroscopy and other results from KEDR», в декабре 2008 года на сессии-конференции Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской Академии Наук в докладе «Измерение  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}(\Gamma_{\mu\mu})/\Gamma_{J/\psi}$ -мезона», в октябре 2009 года на международном рабочем совещании «International Workshop on  $e^+e^-$  collisions from  $\phi$  to  $\psi$ » в Китае в докладе «Measurement of  $J/\psi$  leptonic widths with the KEDR detector» и в ноябре 2009 года на сессии-конференции Секции ядерной физики Отделения физических наук Российской Академии Наук в докладе «Измерение  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  для  $J/\psi$ -мезона».

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 08-02-00258 «Измерение полной и лептонных ширин  $J/\psi$ -резонанса».

Работа по измерению произведений лептонных ширин на вероятности распада  $J/\psi$  мезона в  $e^+e^-$  и  $\mu^+\mu^-$  пара признана лучшей работой 2009 года ИЯФ им. Г. И. Будкера по ФЭЧ.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объём диссертации составляет 120 страниц, из которых 14 страниц занимает список литературы, состоящий из 123 наименований. В диссертации были использованы 29 иллюстраций и 11 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** представлен обзор литературы посвящённой теории и экспериментам по измерению параметров  $J/\psi$ -резонанса.

$J/\psi$ -мезон был открыт экспериментально в 1974 году. Вскоре после открытия было осознано, что эта частица является связанным состоянием  $c\bar{c}$ -кварков.

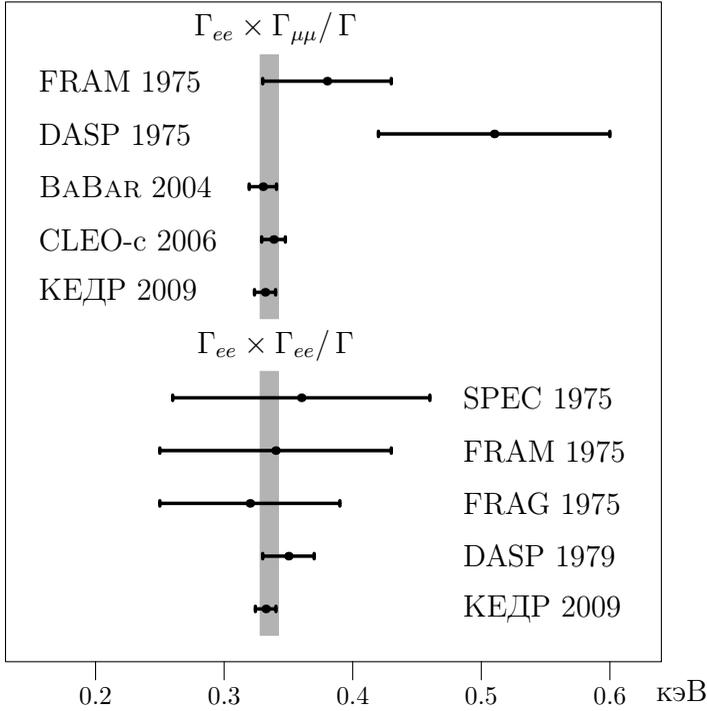


Рис. 1. Результаты измерений  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ . Ошибки для каждого измерения соответствуют среднеквадратичной сумме систематической и статистической ошибок. Положение светлой полосы и её ширина соответствует среднему значению и неопределённости  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ , приведённым в PDG-2008, соответственно.

Полная  $\Gamma$  и лептонная  $\Gamma_{\ell\ell}$  ширины кваркониев позволяют определить характеристики потенциала сильного взаимодействия. Лептонная ширина используется в теоретических расчётах различных процессов, например, радиационных переходов вида  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$ , двойного рождения чармония  $e^+e^- \rightarrow J/\psi\eta_c$  и двухфотонного распада  $\eta_c$ .

Фактически сразу после открытия  $J/\psi$ -мезона на ускорителе SPEAR в SLAC было измерено значение величины  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma$ . Это измерение помечено на рис. 1 как SPEC 1975. Чуть позже последовали измерения, сделанные в эксперименте ADONE во Фраскати (Frascati) (результаты

на рис. 1 MEA group detector помечены как FRAM 1975 и gamma gamma group detector как FRAG 1975).

Наиболее точным измерением  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  на момент окончания анализа, представленного в данной работе, было измерение, сделанное на  $e^+e^-$  коллайдере DORIS в эксперименте DASP (рис. 1 метка DASP 1979).

Во всех вышеперечисленных экспериментах осуществлялось сканирование в районе  $J/\psi$  резонанса и так или иначе измерялось сечение распада  $J/\psi$  в лептонную пару.

Наиболее точные результаты по измерению величины  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  получены с использованием метода радиационного возврата на экспериментах BABAR (рис. 1 метка BABAR 2004) при энергии в центре масс 10.58 ГэВ и CLEO-c (рис. 1 метка CLEO-c 2006) при энергии в центре масс 3.773 ГэВ.

**Во второй главе** обсуждаются теоретические сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  и  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$  в области  $J/\psi$ -резонанса.

Для проведения анализа использовалась следующая теоретическая зависимость сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ :

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{ee \rightarrow \mu\mu} \approx \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{КЭД}}^{ee \rightarrow \mu\mu} + \frac{1}{M^2} (1 + \delta_{\text{sf}}) (1 + \cos^2 \theta) \times \left\{ \frac{9}{4} \frac{\Gamma_{ee} \Gamma_{\mu\mu}}{\Gamma M} \text{Im}\mathcal{F} - \frac{3\alpha}{2} \frac{\sqrt{\Gamma_{ee} \Gamma_{\mu\mu}}}{M} \text{Re} \frac{\mathcal{F}}{1 - \Pi_0} \right\}, \quad (1)$$

где

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

и

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\beta}{\sin \pi\beta} \left( \frac{M/2}{-W + M - i\Gamma/2} \right)^{1-\beta}, \quad \beta = \frac{4\alpha}{\pi} \left( \ln \frac{W}{m_e} - \frac{1}{2} \right). \quad (3)$$

Формула (1) состоит из резонансного вклада распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ , пропорционального измеряемой величине  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ , интерференционного слагаемого, пропорционального корню из произведения лептонных ширин  $\sqrt{\Gamma_{ee} \Gamma_{\mu\mu}}$  и нерезонансного сечения  $\sigma_{\text{КЭД}}$ , полностью описываемого квантовой электродинамикой.

Для процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  использовалась формула:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{ee \rightarrow ee} \approx \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{КЭД}}^{ee \rightarrow ee} + \frac{1}{M^2} \left\{ \frac{9}{4} \frac{\Gamma_{ee}^2}{\Gamma M} (1 + \cos^2 \theta) (1 + \delta_{\text{sf}}) \text{Im}\mathcal{F} - \frac{3\alpha}{2} \frac{\Gamma_{ee}}{M} \left[ (1 + \cos^2 \theta) - \frac{(1 + \cos \theta)^2}{(1 - \cos \theta)} \right] \text{Re}\mathcal{F} \right\}, \quad (4)$$

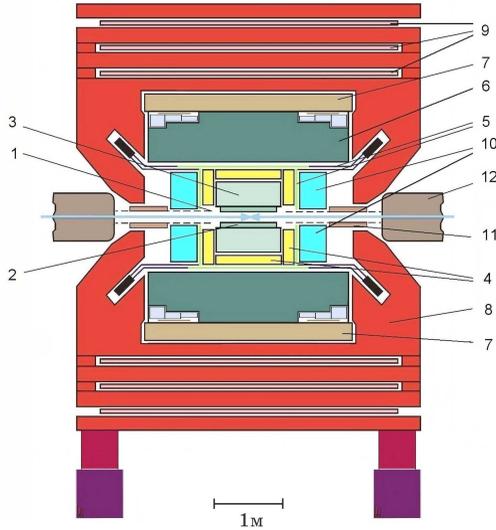


Рис. 2. Детектор КЕДР, разрез вдоль пучка.

Формула (4) включает резонансный вклад распада  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , пропорциональный измеряемой величине  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ , интерференционный член, пропорциональный  $\Gamma_{ee}$  и нерезонансный вклад  $\sigma_{\text{КЭД}}$ , полностью описываемый квантовой электродинамикой (Баба-рассеяние). В интерференционном члене формулы (4) не учтены степенные поправки по  $\beta$ , что не влияет на точность измерения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ .

**Третья глава** посвящена общему описанию ускорительного комплекса ВЭПП-4М и детектора КЕДР.

Ускорительный комплекс ВЭПП-4М предназначен для проведения широкого спектра экспериментов по физике элементарных частиц в диапазоне энергий  $W = 2 \div 12$  ГэВ, фотоядерных исследований и экспериментов с синхротронным излучением.

С помощью метода резонансной деполяризации на экспериментах с детектором КЕДР была достигнута точность калибровки энергии  $10^{-6}$ . Интерполяция энергии на время набора светимости в экспериментах по изучению  $J/\psi$ -резонанса снижается приблизительно до  $6 \cdot 10^{-6}$  ( $\simeq 10$  кэВ).

В состав детектора КЕДР, изображённого на рис. 2, входят вакуумная камера (1), вершинный детектор (2), дрейфовая камера (3), аэрогелевые

черенковские счётчики (4), сцинтилляционные счётчики (5), калориметр на основе жидкого криптона (6), торцевой CsI-калориметр (10) и мюонная система (9), встроенная в ярмо (8) сверхпроводящей магнитной катушки с полем 0.65 Тл (7). Детектор также включает систему регистрации рассеянных электронов для исследования двухфотонных процессов. Для оперативного измерения светимости используются два сэндвич-калориметра, состоящих из чередующихся пластин сцинтилляционной пластмассы и свинца, регистрирующих  $\gamma$ -кванты однократного тормозного излучения и находящихся по обе стороны от места встречи.

**В четвёртой главе** подробно описана база данных детектора КЕДР, разработанная и поддерживаемая автором.

Эксперименты в физике высоких энергий характеризуются большим числом каналов электроники, по которым поступают данные с детектора, и значительным промежутком времени (годы) который отводится на проведение исследований. Для сохранения структурированной информации о состоянии систем детектора с целью последующего её извлечения для обработки экспериментальных событий необходима надёжная система управления базами данных (СУБД).

Информация о состоянии детектора разделяется на два типа данных: калибровочные константы и результаты измерений системы медленного контроля. По сути эти данные представляют из себя массивы чисел с привязкой к конкретному моменту времени.

**В пятой главе** представлена информация об эксперименте по сканированию  $J/\psi$ -резонанса, проведённого в апреле 2005.

Набор статистики производился в одиннадцати точках по энергии. Расположение этих точек показано на рис. 3. За время сканирования было проведено 26 калибровок энергии пучка методом резонансной деполяризации. Набор статистики в каждой точке, кроме находящихся вне резонансной области, обязательно начинался и заканчивался калибровкой энергии. Точность определения энергии в каждой из точек набора статистики была не хуже 25 кэВ.

Набранная за время сканирования интегральная светимость составляет около  $230 \text{ нб}^{-1}$ , что с учётом энергии и светимости в точках набора соответствует примерно 15 тысячам распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ .

**Шестая глава** посвящена обработке и анализу экспериментальных данных для измерения величин  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$   $J/\psi$ -мезона. Здесь же подробно обсуждаются возможные систематические ошибки, и представлены для сравнения результаты других измерений.

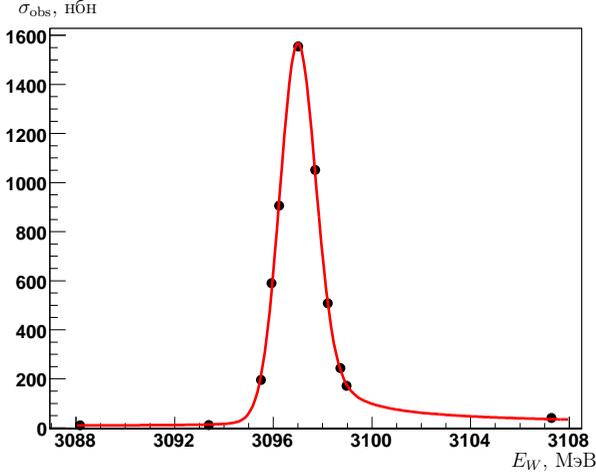


Рис. 3. Наблюдаемое сечение  $J/\psi \rightarrow$  адроны (сканирование 2005 года).

Если при анализе данных эксперимента по сканированию  $J/\psi$ -резонанса отобрать  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  события, то вклад в них дают три эффекта: нерезонансный фон от Баба-рассеяния, резонансный вклад от распада  $J/\psi$  на пару  $e^+e^-$  и интерференция.

Поведение сечения этих процессов в зависимости от энергии и от угла рассеяния электрона существенно различается. Процесс Баба-рассеяния хорошо изучен, что позволяет не только выделить резонансный и интерференционный вклады с извлечением величины  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ , но и одновременно провести абсолютную калибровку светимости.

Для определения параметров резонанса события  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  распределялись по нескольким угловым интервалам. В каждой  $i$ -ой точке по энергии и  $j$ -ом угловом интервале ожидаемое число событий параметризовалось формулой:

$$N_{\text{экс.}}(E_i, \theta_j) = \mathcal{R}_{\mathcal{L}} \times \mathcal{L}(E_i) \times \left( \sigma_{\text{резон.}}^{\text{теор.}}(E_i, \theta_j) \cdot \varepsilon_{\text{пик}}^{\text{мод.}}(E_i, \theta_j) + \right. \\ \left. + \sigma_{\text{интер.}}^{\text{теор.}}(E_i, \theta_j) \cdot \varepsilon_{\text{интер.}}^{\text{мод.}}(E_i, \theta_j) + \sigma_{\text{Баба}}^{\text{мод.}}(E_i, \theta_j) \cdot \varepsilon_{\text{Баба}}^{\text{мод.}}(E_i, \theta_j) \right). \quad (5)$$

В формуле (5) интеграл светимости  $\mathcal{L}(E_i)$ , набранный в  $i$ -ой точке, умножается на сумму произведений теоретических сечений  $\sigma^{\text{теор.}}$  и эф-

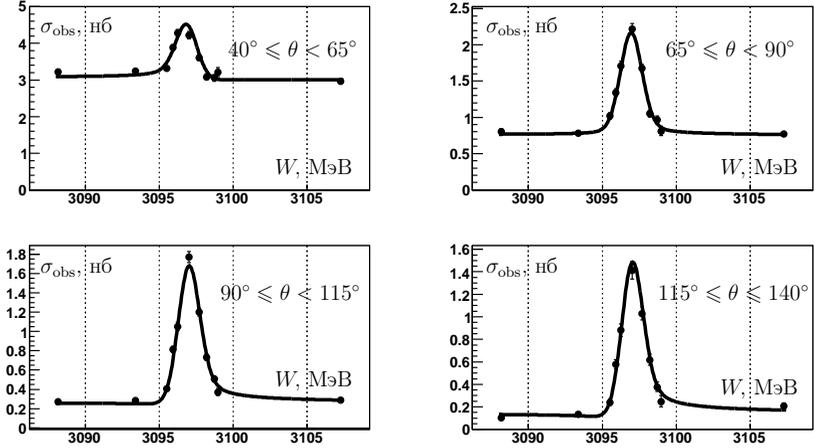


Рис. 4. Подгонка наблюдаемого в эксперименте сечения  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  в зависимости от энергии для четырёх интервалов угла рассеяния  $\theta$ .

фективности регистрации  $\varepsilon^{\text{мод.}}$ , полученных по данным моделирования. В качестве угла  $\theta$  можно взять угол вылета как электрона, так и позитрона. Подгонка проводилась для обоих случаев, а результат усреднялся, при этом разница составляла 0.6 %.

Свободными параметрами подгонки являются величина  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ , определяющая амплитуду резонансного сигнала ( $\sigma_{\text{пик}}^{\text{теор.}} \propto \Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$ ), электронная ширина  $\Gamma_{ee}$ , задающая величину интерференционной волны ( $\sigma_{\text{интер.}}^{\text{теор.}} \propto \Gamma_{ee}$ ), и коэффициент  $\mathcal{R}_{\mathcal{L}}$ , отвечающий за абсолютную калибровку используемого монитора светимости.

На рис. 4 представлены результаты подгонки экспериментальных данных  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$  теоретической зависимостью для четырёх угловых интервалов. Под малыми углами преобладают события Баба-рассеяния, под большими — события от распада  $J/\psi$ -мезона. Эффект интерференции при этом меняет знак.

При подгонке экспериментальных данных формулой (5) с помощью метода максимального правдоподобия в 10 угловых ( $\theta$ ) интервалах получен один из основных результатов анализа:  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma = 0.3323 \pm \pm 0.0064$  (стат) кэВ. Величина статистической ошибки составляет 1.9 %.

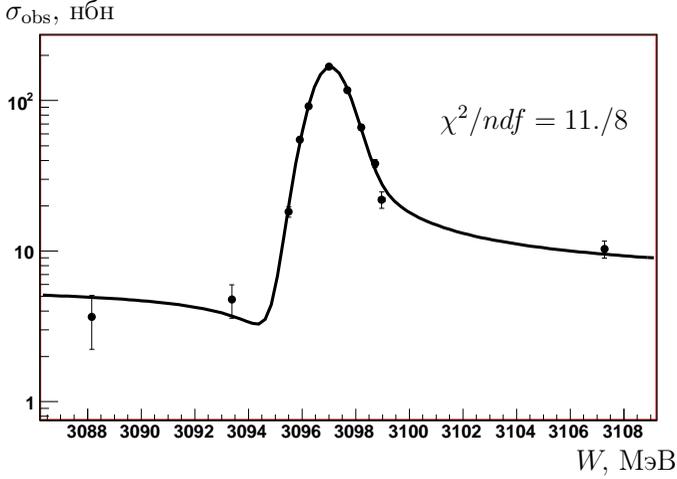


Рис. 5. Подгонка наблюдаемого на эксперименте сечения  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$  как функции от энергии после вычитания космического фона.

Аналогично формуле (5) в каждой  $i$ -ой точке по энергии ожидаемое число событий  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$  параметризовалось формулой:

$$N_{\text{экс.}}(E_i) = \mathcal{R}_{\mathcal{L}} \times \mathcal{L}(E_i) \times \left( \sigma_{\text{пик}}^{\text{теор.}}(E_i) \cdot \varepsilon_{\text{пик}}^{\text{мод.}}(E_i) + \right. \\ \left. + \sigma_{\text{интер.}}^{\text{теор.}}(E_i) \cdot \varepsilon_{\text{интер.}}^{\text{мод.}}(E_i) + \sigma_{\text{подл.}}^{\text{теор.}}(E_i) \cdot \varepsilon_{\text{подл.}}^{\text{мод.}}(E_i) \right) + A_{\text{кос.}} \times T, \quad (6)$$

где, как и в (5),  $\mathcal{L}$  — относительная светимость, получаемая по однократному тормозному излучению,  $\mathcal{R}_{\mathcal{L}}$  — нормировочный коэффициент, который берётся из подгонки процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$ ,  $A_{\text{кос.}}$  — число космических событий, прошедших отбор, в единицу времени, а  $T$  — время набора статистики с учётом КПД набора.

Свободными параметрами подгонки являются: величина  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ , определяющая амплитуду резонансного сигнала ( $\sigma_{\text{пик}}^{\text{теор.}}(E_i) \propto \Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ ), корень квадратный из произведения электронной и мюонной ширины, задающий величину интерференционной волны ( $\sigma_{\text{интер.}}^{\text{теор.}}(E_i) \propto \sqrt{\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}}$ ), и коэффициент  $A_{\text{кос.}}$ , характеризующий фон космических частиц.

На рис. 5 представлен результат подгонки экспериментальных данных  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$  теоретической зависимостью после вычитания космического фона.

При подгонке экспериментальных данных формулой (6) получен второй основной результат анализа:  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma = 0.3318 \pm 0.0052$  (стат) кэВ. Величина статистическая ошибки составляет около 1.6 %.

Основная часть шестой главы посвящена обсуждению систематических неопределённостей. В таблицах 1 и 2 перечислены значимые систематические неопределённости, дающие вклад в систематическую ошибку измерения величин  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ , соответственно.

В эксперименте КЕДР на  $e^+e^-$  коллайдере ВЭПП-4М измерены произведения электронной ширины  $J/\psi$ -мезона и вероятностей его распада на  $e^+e^-$  ( $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma$ ) и  $\mu^+\mu^-$  ( $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ ) пары. Получены следующие экспериментальные результаты:

$$\begin{aligned} \Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma &= 0.3323 \pm 0.0064 \text{ (стат.)} \pm 0.0048 \text{ (сист.) кэВ,} \\ \Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma &= 0.3318 \pm 0.0052 \text{ (стат.)} \pm 0.0063 \text{ (сист.) кэВ.} \end{aligned} \quad (7)$$

Комбинации этих величин

$$\begin{aligned} \Gamma_{ee} \times (\Gamma_{ee} + \Gamma_{\mu\mu}) / \Gamma &= 0.6641 \pm 0.0082 \text{ (стат.)} \pm 0.0100 \text{ (сист.) кэВ,} \\ \Gamma_{ee} / \Gamma_{\mu\mu} &= 1.002 \pm 0.021 \text{ (стат.)} \pm 0.013 \text{ (сист.)} \end{aligned}$$

могут использоваться для улучшения точности лептонной и полной ширины  $J/\psi$ -резонанса, а так же для проверки лептонной универсальности.

В предположении лептонной универсальности, которая для  $J/\psi$  проверена с точностью около 1.3 %, произведение электронной ширины на вероятность распада  $J/\psi$ -мезона на электронную или мюонную пару:

$$\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\ell\ell} / \Gamma = (0.3321 \pm 0.0065) \text{ кэВ} \quad (8)$$

Для получения значения лептонной и полной ширины из  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\ell\ell} / \Gamma$  можно использовать вероятность распада  $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$ , которая известна с процентной точностью  $\Gamma_{ee} / \Gamma = (5.94 \pm 0.06) \%$  из анализа каскадного распада  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ :

$$\begin{aligned} \Gamma_{\ell\ell} &= (5.59 \pm 0.12) \text{ кэВ} \\ \Gamma &= (94.1 \pm 2.7) \text{ кэВ} \end{aligned} \quad (9)$$

Графическое сравнение результатов по измерению величин  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$  приведено на рис. 1 (стр. 6). На рис. 6 и 7 соответственно представлены сравнения между значениями  $\Gamma_{ee}$  и  $\Gamma$  полученными в разных экспериментах.

Таблица 1. Источники систематической неопределённости  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee} / \Gamma$ .

Источник систематической ошибки	Ошибка
Измерение энергии	
Энергетический разброс	0.2 %
Измерение энергии в точке (10–30 кэВ)	0.3 %
Эффективность	
Эффективность трековой системы	0.7 %
Эффективность LKг калориметра	0.2 %
Измерение светимости (относительное)	0.8 %
Триггер	
Антисовпадение в первичном триггере	0.4 %
Отбраковка событий при записи	0.2 %
Эффективность сцинтилляционных счётчиков	0.3 %
Определение угла $\theta$	0.2 %
Расчёт интерференции (теория)	0.2 %
Сечение Баба-рассеяния (моделирование)	0.4 %
Учёт радиоправок с помощью PHOTOS	0.4 %
Фон от распадов $J/\psi$	0.2 %
Процедура подгонки	0.2 %
<i>Квадратичная сумма</i>	<i>1.4 %</i>

Таблица 2. Источники систематической неопределённости  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu} / \Gamma$ .

Источник систематической ошибки	Ошибка
Измерение энергии	
Энергетический разброс	0.4 %
Измерение энергии в точке (10–30 кэВ)	0.5 %
Разность эффективностей для $e^+e^-$ и $\mu^+\mu^-$	0.8 %
Определение светимости	
Абсолютная калибровка светимости	0.7 %
Измерение светимости (относительное)	0.8 %
Триггер	
Антисовпадение в первичном триггере	0.4 %
Отбраковка событий при записи	0.2 %
Эффективность сцинтилляционных счётчиков	0.3 %
Определение угла $\theta$	0.2 %
Сечение Баба-рассеяния (моделирование)	0.6 %
Учёт радиоправок с помощью PHOTOS	0.5 %
Нерезонансный фон	0.1 %
Фон от $J/\psi \rightarrow$ адроны	0.6 %
<i>Квадратичная сумма</i>	<i>1.9 %</i>

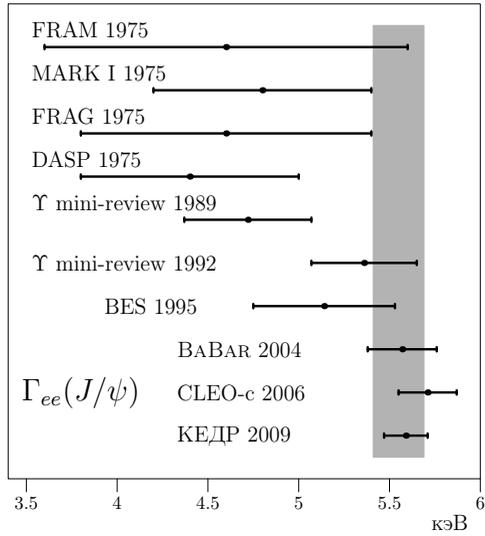


Рис. 6. Сравнение лептонной ширины  $J/\psi$ -мезона полученной в разных экспериментах.

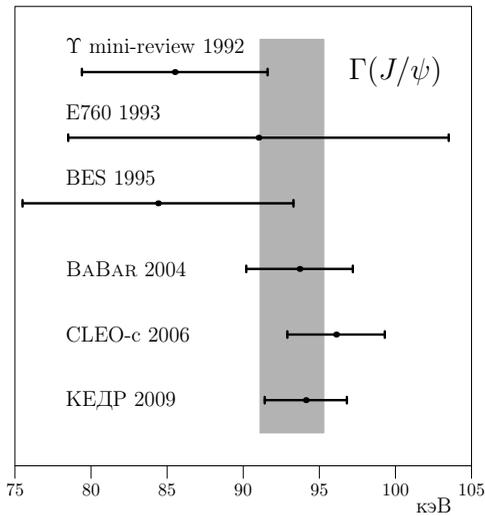


Рис. 7. Сравнение полной ширины  $J/\psi$ -мезона полученной в разных экспериментах.

Полученные в данной работе значения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$  согласуются между собой и со среднемировым значением  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ . Эти значения, а также значения полной и лептонной ширины  $J/\psi$ -мезона, полученных с использованием результатов с детектора КЕДР, являются наиболее точными.

**В Заключение** сформулированы основные результаты работы, которые выносятся на защиту:

- Создана база данных детектора КЕДР и организована визуализация медленного контроля для обеспечения проведения экспериментов на комплексе ВЭПП-4М и последующего анализа экспериментальных данных;
- Предложен и реализован новый метод определения  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$   $J/\psi$ -мезона путём совместной обработки зависимостей сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  от энергии и от угла рассеяния электрона

$$\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma = 0.3323 \pm 0.0064 \text{ (стат.)} \pm 0.0048 \text{ (сист.) кэВ};$$

- Измерена величина  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$   $J/\psi$ -мезона

$$\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma = 0.3318 \pm 0.0052 \text{ (стат.)} \pm 0.0063 \text{ (сист.) кэВ}.$$

Результаты измерений  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{ee}/\Gamma$  и  $\Gamma_{ee} \times \Gamma_{\mu\mu}/\Gamma$ , полученные в данной работе, являются в данный момент наиболее точными.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- 1) Baldin, E. M. “Results on  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\psi(3770)$  from KEDR.” / E. M. Baldin et al. // Nuclear Physics B (Proceedings Supplement). — 2008 — Vol. 181-182. — Pp. 353–357.
- 2) Балдин, Е. М. «Изучение процесса  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  на детекторе КЕДР» / Е. М. Балдин // Ядерная физика. — 2009. — Т. 72. № 3 — С. 531–536.
- 3) В. В. Анашин, В. М. Аульченко, Е. М. Балдин и др. «Изучение процессов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  и  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  на детекторе КЕДР». Препринт ИЯФ 2009-9, Новосибирск, 2009.
- 4) V. V. Anashin, V. M. Aulchenko, E. M. Baldin et al. “Measurement of  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \times \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$  and  $\Gamma_{ee}(J/\psi) \times \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$ ” // Physics Letters B. — 2010. — Vol. 685. — Pp. 134–140.

*БАЛДИН Евгений Михайлович*

**Измерение произведения  
электронной ширины  $J/\psi$ -мезона  
на вероятность распада в лептоны**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 30.03.2010 г.

Подписано в печать 31.03.2010 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 8

---

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

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