

На правах рукописи

БЛИНОВ Владимир Евгеньевич

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ТАУ-ЛЕПТОНА

01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2011

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

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЗАЙЦЕВ – доктор физико-математических наук,
Александр Михайлович профессор, ГНЦ РФ "Институт физики высоких энергий", г. Протвино Московской обл.

ПАХЛОВ – доктор физико-математических наук,
Павел Николаевич ГНЦ РФ "Институт теоретической и экспериментальной физики", г. Москва.

СОЛОДОВ – доктор физико-математических наук,
Евгений Петрович Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ – Учреждение Российской академии наук,
ОРГАНИЗАЦИЯ: Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, г. Гатчина Ленинградской обл.

Защита диссертации состоится “_____” “_____” 2011 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 Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что в настоящее время подавляющее большинство экспериментальной информации по физике элементарных частиц поступает с установок со встречными пучками. Поэтому создание детекторов и совершенствование методов проведения экспериментов на установках со встречными пучками крайне важно для развития этого направления исследований.

Дрейфовые камеры (ДК) широко применяются при создании координатных систем современных детекторов. Пространственное разрешение больших ДК достигло 100 мкм и процесс улучшения их параметров продолжается. Поэтому обладание технологией изготовления больших ДК важно для создания детекторов для экспериментов по физике элементарных частиц.

Стоимость современных ДК доходит до нескольких миллионов долларов, а время изготовления превышает несколько лет. В процессе набора статистики, который длится 8 – 10 лет ДК подвергаются интенсивному облучению, которое приводит к радиационной деградации и выходу их из строя. Светимость ускорителей непрерывно растет и в настоящее время превышает 10^{34} см⁻²сек⁻¹, поэтому исследование радиационного старения проволочных камер, направленное на повышение их срока службы, является крайне актуальным.

В экспериментах по прецизионному измерению масс элементарных частиц ключевое значение имеет точность измерения энергии пучка в ускорителе. Наиболее точным является метод резонансной деполяризации (РД), который был предложен и впервые реализован в ИЯФ СО РАН в 1970-х годах. Развитие метода РД в сторону повышения точности калибровки энергии пучка и точности интерполяции между калибровками, устранения наиболее опасных источников систематической ошибки при измерении энергии и автоматизации процедуры калибровки актуально для повышения точности измерения масс элементарных частиц.

Кроме метода РД на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М в эксперименте по измерению массы τ -лептона был впервые в мире применен метод измерения энергии и энергетического разброса в пучке с использованием обратного комптоновского рассеяния (ОКР) монохроматического лазерного

излучения на релятивистском пучке ускорителя с регистрацией спектра обратнорассеянных гамма квантов криогенным германиевым детектором высокого разрешения. Сейчас методика, освоенная на ВЭПП-4М для эксперимента по прецизионному измерению массы τ -лептона, применяется на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН и $c - \tau$ -фабрике ВЕРСИ в Китае.

Одним из основных положений современной теории электрослабых взаимодействий является принцип лептонной универсальности. Точное измерение массы τ -лептона при известных значениях его времени жизни и вероятности распада на электрон, нейтрино и антинейтрино позволяет провести проверку принципа $\mu - \tau$ -универсальности, что является актуальным.

Цель диссертационной работы

Проведение цикла экспериментов по физике элементарных частиц с детектором КЕДР на ВЭПП-4М позволило с лучшей в мире точностью измерить массы J/ψ -, ψ' -, $\psi(3770)$ -, D^\pm -мезонов и τ -лептона, получить лучшие по точности результаты при измерении произведения $\Gamma_{ee}(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow ee)$ и $\Gamma_{ee}(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)$ и измерить с высокой точностью некоторые другие величины.

Создание дрейфовой камеры детектора КЕДР, работающей на диметилловом эфире, с пространственным разрешением 100 мкм и разрешением $\sigma_{\frac{dE}{dx}} = 8.5\%$. Изучение процессов радиационного старения проволочных газовых камер, измерение влияния десорбции конструкторных материалов на радиационную стойкость ДК, обнаружение и исследование эффекта нулевого старения имеет несомненный научный и практический интерес при создании подобных систем для экспериментов на ускорителях с высокой светимостью.

Создана система прецизионного измерения энергии пучка ускорителя ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации (РД). Точность измерения и восстановления энергии между калибровками была повышена в десять раз. Что позволило выйти на уровень точности измерения масс узких резонансов $3.5 \cdot 10^{-6}$ и установить новый стандарт точности измерения масс узких резонансов.

Прецизионное измерение массы τ -лептона с детектором КЕДР с лучшей в мире точностью используется для проверки принципа $\mu - \tau$ -универсальности, одного из важных аксиоматических допущений, заложенных в Стандартную модель.

Все это позволило сохранить полный цикл детекторных технологий и знаний, необходимых для проведения исследований в этой области физики, воспитать команду молодых ученых и инженеров и создать базу для самостоятельной реализации более амбициозных задач, таких как проект Супер $c - \tau$ -фабрики в Новосибирске на энергию $2E = 2 - 5$ ГэВ со светимостью $10^{35} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$.

Таким образом, основными целями диссертационной работы являются:

- ввод в эксплуатацию и проведение цикла экспериментов по физике элементарных частиц в области рождения очарованных частиц и τ -лептона с универсальным магнитный детектором КЕДР на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М;
- создание дрейфовая камера детектора КЕДР;
- исследование радиационного старения газовых проволочных камер;
- создание системы для прецизионного измерения энергии пучка ускорителя ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации;
- измерение массы τ -лептона с лучшей в мире точностью.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие во всех работах по проектированию, созданию и запуску в работу дрейфовой камеры детектора КЕДР. Активно участвовал в запуске детектора в эксплуатацию, проведении экспериментов и является ответственным за проведение экспериментов с детектором КЕДР на ВЭПП-4М. Непосредственно проводил практически все исследования по радиационному старению дрейфовых камер. Был инициатором и непосредственным участником создания системы прецизионного измерения энергии ускорителя ВЭПП-4М методом РД. Принимал участие в освоении на ВЭПП-4М метода ОКР для непрерывного измерения энергии и энергетического разброса в пучке. Автором была проведена работа по планированию, подготовке и проведению эксперимента по измерению массы τ -лептона.

Научная новизна

Впервые в мире создана дрейфовая камера детектора КЕДР, работающая на диметилловом эфире (ДМЭ). В ДК получено среднее по ячейке пространственное разрешение равное 100 мкм при длине дрейфа 30 мм.

Исследованы амплитудные поправки при проведении ионизационных измерений в ДК и достигнуто проектное разрешение $\sigma \frac{dE}{dx} = 8.5\%$.

Установлено, что используемые при измерении анодного старения процедуры некорректны и систематически занижают скорость старения. Предложена новая более корректная процедура измерения скорости старения свободная от вышеуказанных недостатков.

Проведено исследование влияния материалов на радиационную стойкость ДК с ДМЭ. Отбор материалов, используемых в ДК и газовой системе, позволил увеличить время жизни камеры более чем в десять раз.

Обнаружен и исследован ранее не наблюдавшийся эффект отсутствия старения проволочных камер и установлено влияние на его величину качества поверхности анодной проволоки.

В десять раз повышена точность измерения и восстановления энергии между калибровками методом РД. Освоена методика двухкратных калибровок энергии на одних пучках с использованием частичной деполяризации. Впервые в мире процесс калибровки энергии был полностью автоматизирован. За время экспериментов проведено более 3500 калибровок энергии, что превышает суммарное число измерений энергии этим методом, проведенных в мире ранее.

Впервые в мире на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М в эксперименте по измерению массы τ -лептона применен метод ОКР для измерения энергии и энергетического разброса в пучке.

В результате эксперимента, проведенного с детектором КЕДР на ВЭПП-4М, с лучшей в мире точностью измерена масса τ -лептона.

Научная и практическая ценность

Научная и практическая полезность диссертационной работы заключается в том, что полученный при проведении экспериментов с детектором КЕДР опыт может быть применен при реализации других крупных научных проектов.

Методические наработки и технологии, освоенные при создании ДК детектора КЕДР, могут быть использованы при сооружении координатных систем новых детекторов.

Результаты исследования радиационного старения проволочных газовых камер найдут применение при создании ДК детекторов для ускорителей со сверхвысокой светимостью — Супер B - и $s - \tau$ -фабрик.

Достигнутая точность измерения энергии методом РД и восстановления энергии между калибровками повышена почти в десять раз. Впервые в экспериментах на встречных пучках реализован метод непрерывного измерения энергии и энергетического разброса в пучке, основанный на обратном комптоновском рассеянии. В результате был достигнут более высокий уровень точности измерения энергии пучка в ускорителе и установлен новый стандарт точности измерения масс.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Введен в эксплуатацию универсальный магнитный детектор КЕДР. С детектором на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М проведена серия прецизионных экспериментов по измерению масс и лептонных ширины очарованных частиц.
2. Впервые в мире создана дрейфовая камера детектора КЕДР, работающая на диметиловом эфире. В камере получено среднее по ячейке пространственное разрешение 100 мкм при длине дрейфа 30 мм. Точность измерения ионизационных потерь в камере равна $\sigma \frac{dE}{dx} = 8.5\%$, что характерно для дрейфовых камер, имеющих в два раза большую измерительную базу.
3. Обнаружено, что используемые процедуры измерения радиационной стойкости проволочных камер систематически занижают скорость старения. Предложена корректная процедура и впервые в мире проведено исследование влияния десорбции материалов на радиационную стойкость дрейфовой камеры с диметиловым эфиром. Отбор материалов, используемых в дрейфовой камере и газовой системе, увеличил время жизни на порядок. За восемь лет набора статистики не обнаружено признаков радиационного старения камеры.
4. Открыт и исследован эффект влияния качества поверхности анодной проволоки на старение и предложена модель образования и роста полимерного покрытия на поверхности проволоочки, объясняющая обнаруженный эффект.
5. Создана рекордная по точности система прецизионного измерения энергии пучка коллайдера ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации. Относительная точность измерения энергии превышает 10^{-6} . За время экспериментов проведено более 3500 калибровок энергии.

6. Впервые в мире на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М в эксперименте по измерению массы τ -лептона применен метод измерения энергии и энергетического разброса в пучке с использованием обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на пучке ускорителя с регистрацией спектра обратнорассеянных гамма-квантов криогенным германиевым детектором высокого разрешения.
7. В эксперименте с детектором КЕДР с лучшей в мире точностью измерена масса τ -лептона. Получено значение массы

$$M_\tau = 1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15 .$$

Апробация работы

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в отечественных и зарубежных научных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), Институт экспериментальной и теоретической физики ИТЭФ (г. Москва), Стэнфордский центр линейного ускорителя SLAC (США), лаборатория DESY (Германия).

Доклады о работах по теме диссертации были представлены на следующих российских и международных конференциях: Международный симпозиум по координатным детекторам в физике высоких энергий (Дубна, 1987); Instrumentation For Colliding Beam Physics (Новосибирск, 1990, 1996, 2002, 2008); Vienna Conference On Instrumentation (Вена, 1992, 1998, 2010); Frontier Detectors For Frontier Physics (о.Эльба, 1997); на Рабочем совещании по старению проволочных камер (Гамбург, 2001); IXth International Workshop on Tau Lepton Physics (Tau06) (Пиза, 2006); X International Workshop on Tau Lepton Physics (Tau08) (Новосибирск, 2008); XI International Workshop on Tau Lepton Physics (Манчестер, 2010); Europhysics Conference on High Energy Physics (EPC2009) (Краков, 2009); Sixth International Workshop on e^+e^- collisions from ϕ to ψ (PHPSI09) (Пекин, 2009); на Научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН Физика фундаментальных взаимодействий (г. Москва, 2005, 2009); на III Всероссийской конференции по фундаментальным константам (Санкт-Петербург, 2010); Charm2010, 4th Int. Workshop on Charm Physics (Пекин, 2010).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 33-х печатных работах, включая статьи в российских и зарубежных журналах, и в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи основных глав и заключения. Материал работы, изложенный на 226 страницах, включает 96 рисунков и список литературы, содержащий 199 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткая история развития ускорителей на встречных пучках и отмечена пионерская роль ИЯФ СО РАН в проведении этих исследований.

В настоящее время в ИЯФ СО РАН продолжается набор статистики на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М с универсальным магнитным детектором КЕДР в диапазоне энергий $2E = 2 - 11$ ГэВ. Несмотря на то, что ВЭПП-4М проигрывает существующим машинам (ВЕРСИ, РЕР-II и КЕКВ) в сотни раз, тем не менее, то обстоятельство, что ВЭПП-4М имеет уникальный для действующих коллайдеров рабочий диапазон энергий, оборудован двумя системами для прецизионного измерения энергии пучка методом РД и методом ОКР, дает возможность проводить эксперименты по прецизионному измерению масс элементарных частиц и лептонных ширин узких резонансов с рекордной точностью. Детектор КЕДР оборудован системой регистрации рассеянных электронов (и позитронов) с разрешением по инвариантной массе рожденного двухфотонного состояния лучше 10^{-2} , что делает КЕДР уникальным местом для измерения полного сечения $\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$ и других двухфотонных процессов.

В главе 1 дан обзор экспериментов по измерению массы τ -лептона. τ -лептон был открыт в 1975 году в эксперименте с детектором Mark-I на e^+e^- -коллайдере SPEAR.

Отмечено, что самые точные измерения массы τ -лептона в экспериментах DELCO и BES получены с помощью метода, основанного на измерении зависимости сечения $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ от энергии вблизи порога рождения.

В этом подходе основную систематическую ошибку в массе дает неопределенность шкалы энергии накопителя. Поэтому именно способ измерения энергии и его точность определяют систематическую ошибку измерения массы. В экспериментах с детекторами DELCO и BES калибровка энергетической шкалы коллайдера проводилась по измеренным в ИЯФ СО РАН с высокой точностью значениям масс J/ψ - и ψ' -мезонов.

Эксперимент с детектором КЕДР по измерению массы τ -лептона основан на измерении зависимости сечения $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ от энергии. В отличие от экспериментов DELCO и BES коллайдер ВЭПП-4М оборудован двумя системами измерения энергии методом РД и ОКР. В отличие от РД метод ОКР позволяет проводить измерения в процессе набора статистики. Это очень важно при измерении массы τ -лептона, так как позволяет исключить неконтролируемые уходы энергии, которые могут радикально понижать точность измерения массы. Все это в целом качественно отличает эксперимент с детектором КЕДР от предыдущих измерений массы τ -лептона.

В главе 2 дано описание ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4, который включает в себя: коллайдер ВЭПП-4М, с энергией в пучке 1.0 – 5.5 ГэВ, бустер-накопитель ВЭПП-3, импульсный инжектор "Позитрон".

Кольцо ВЭПП-4М имеет периметр 366 м и состоит из двух полуколец и двух прямолинейных промежутков: один промежуток используется для размещения ускоряющей структуры, в другом расположен детектор КЕДР.

Установка работает в режиме 2×2 сгустка. При работе ВЭПП-4М на энергии 2.0 ГэВ пиковая светимость равна $3 \cdot 10^{30} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$, а на энергии 5.0 ГэВ – возрастает до $8 \cdot 10^{31} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$.

Накопитель ВЭПП-3 представляет собой кольцо периметром 75 м и служит бустером-накопителем для ВЭПП-4М. Требуемый для получения необходимой светимости на ВЭПП-4М ток накапливается в ВЭПП-3 и затем ускоряется до энергии инжекции в коллайдер ВЭПП-4М, но не более чем до 2 ГэВ.

На коллайдере ВЭПП-4М применяется два метода измерения энергии пучка. Для прецизионного измерения энергии с точностью 10^{-6} используется метод РД, а мониторингирование средней энергии и энергетического разброса в пучке с несколько худшей точностью осуществляется методом ОКР.

Глава 3 посвящена описанию универсального магнитного детектора КЕДР. Детектор КЕДР (рис. 1) состоит из следующих систем: вершинный детектор, дрейфовая камера, пороговые аэрогелевые черенковские счетчики, времяпролетные сцинтилляционные счетчики, барельный электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона, торцевой электромагнитный калориметр на основе кристаллов CsI, сверхпроводящая магнитная катушка, мюонная система, система регистрации рассеянных электронов и монитор светимости.

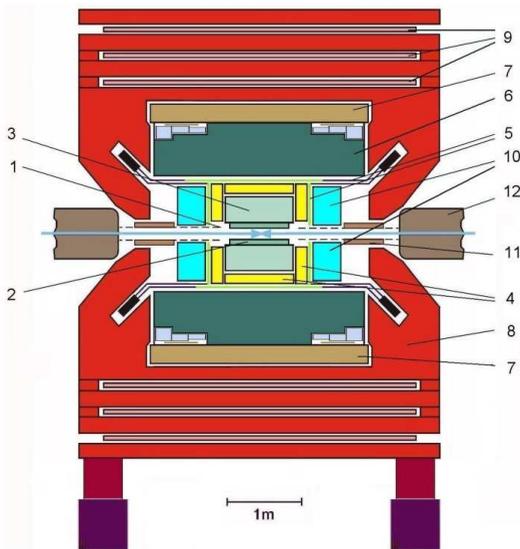


Рис. 1. Детектор КЕДР. 1 – вакуумная камера ускорителя, 2 – вершинный детектор, 3 – дрейфовая камера, 4 – аэрогелевые пороговые черенковские счетчики, 5 – времяпролетные счетчики, 6 – барельный жидкокриптоновый калориметр, 7 – сверхпроводящая катушка, 8 – ядро, 9 – мюонные камеры, 10 – торцевой CsI калориметр, 11 – компенсирующая катушка, 12 – квадруоль.

Вершинная камера (ВК) детектора КЕДР расположена между дрейфовой камерой и вакуумной трубой накопителя и увеличивает перекрываемый координатной системой телесный угол до 98%. ВК состоит из 312 цилиндрических дрейфовых трубок длиной 670 мм и диаметром 10 мм, образующих шесть концентрических слоев вокруг вакуумной камеры. Пространственное разрешение, полученное на ВК, равно 180 мкм.

Дрейфовая камера предназначена для измерения импульса заряженных частиц и идентификации частиц по измерению ионизационных потерь в рабочей газе камеры. ДК имеет цилиндрическую форму, ее длина равна 1100 мм, внутренний радиус – 125 мм, внешний радиус – 535 мм. В ДК получено среднее пространственное разрешение около 100 мкм при максимальной длине дрейфа электронов 30 мм.

Камера содержит около 32000 проволочек из них 1512 анодных, объединенных в 252 ячейки. Длина проволочек 970 мм. Проволочки образуют семь суперслоев ячеек – четыре аксиальных с проволочками параллельными оси пучков и три стерео с углом наклона проволочек к оси камеры ± 100 мрад для измерения координаты вдоль проволочки. Для частицы, пересекающей всю камеру, производится 42 измерения координаты и ионизационных потерь. Телесный угол, перекрываемый камерой, для частиц, проходящих через три суперслоя, составляет 87% и уменьшается до 70% при пересечении всех семи суперслоев.

Полученное в ДК импульсное разрешение при значении магнитного поля 0.6 Тл, 42 измерений координаты с точностью 100 мкм и измерительной базе 370 мм равно:

$$(\sigma_{p_{\perp}}/p_{\perp})^2 = (0.007)^2 + (0.017 \times p_{\perp})^2,$$

где p_{\perp} – импульс частицы в ГэВ/с.

В ДК достигнуто проектное разрешение по dE/dx равное 8.5%, что обеспечивает π/K разделение до 700 МэВ/с и K/p разделение до 1200 МэВ/с на уровне 2σ .

Пороговые черенковские счетчики детектора КЕДР используют в качестве радиатора аэрогель с показателем преломления 1.05. Сбор черенковского света происходит на пластины с переизлучателями спектра, где переизлученный свет захватывается в угол полного внутреннего отражения и транспортируется до фотоумножителя. Для регистрации света применяются ФЭУ с микроканальными пластинами. Система состоит из 160 счетчиков, расположенных в двух слоях, и позволяет разделять π - и K -мезоны в диапазоне импульсов от 600 до 1500 МэВ/с.

Времяпролетная система детектора состоит из 32 продольных и 64 торцевых сцинтилляционных счетчиков, и покрывает 95% полного телесного угла. Система имеет временное разрешение 350 пкс, что обеспечивает π/K разделение до импульсов 680 МэВ/с.

Барельный жидкокриптоновый калориметр представляет собой набор цилиндрических ионизационных камер с жидким криптоном в качестве рабочего вещества. Внутренний радиус калориметра 75 см, толщина 68 см или 14.8 радиационных длин. Масса жидкого криптона равна 27 тоннам. Общее число каналов регистрирующей электроники калориметра равно 9600. Энергетическое разрешение калориметра на высокой энергии равно $3.0 \pm 0.1\%$, а разрешение по инвариантной массе π^0 -мезона составляет 8.15 ± 0.25 МэВ.

Мюонная система состоит из 88 блоков стриммерных трубок, объединенных в три слоя и расположенных внутри магнитного ядра детектора. Мюонная система имеет 544 канала электроники и позволяют надежно регистрировать и идентифицировать частицы, выходящие из места встречи, по пробегу.

Система Регистрации Рассеянных Электронов состоит из двух комплектов по четыре блока регистрации в каждом, расположенных по обе стороны от места встречи на расстоянии от 4 до 16 метров. Каждый блок содержит шесть двойных плоскостей из дрейфовых трубок диаметром 6 мм. Энергия рассеянных частиц определяется по измерению их отклонения от равновесной орбиты пучка в поперечных полях магнитной структуры коллайдера ВЭПП-4М.

Оперативное измерение светимости на детекторе КЕДР производится по частоте однократного тормозного излучения, которое регистрируются при помощи двух сэндвичей (свинец-сцинтиллятор, $18 X_0$).

Сверхпроводящая магнитная система детектора КЕДР состоит из основного и двух компенсирующих соленоидов, расположенных внутри железного ядра. Продольное магнитное поле величиной 0.6 Тл в детекторе создаёт основной сверхпроводящий соленоид длиной 3.2 м и диаметром около 3.5 м.

Железное ядро весом около 700 тонн замыкает магнитный поток. Оно состоит из восьми продольных секций, составленных из параллельных прямоугольных плит, разделённых воздушными зазорами, и двух торцевых полюсов.

Криогенная система детектора КЕДР обеспечивает работу основного и двух компенсирующих сверхпроводящих соленоидов детектора и жидкокриптонового калориметра, заполненного 27 тоннами жидкого криптона, находящегося при температуре 120 К, сверхпроводящей гелиевой магнит-

ной системы — 4.3 К. В качестве вспомогательного хладагента используется жидкий азот.

В главе 4 описана дрейфовая камера (ДК) детектора КЕДР. ДК имеет цилиндрическую форму и занимает пространство, ограниченное двумя цилиндрическими обечайками длиной 1100 мм и двумя торцевыми пластинами. Проволочки натянуты между двумя торцевыми пластинами из стеклотекстолита толщиной 20 мм. Суммарное натяжение проволочек, приложенное к торцевым пластинам, создаёт усилие в 3.4 тонны.

Ячейка (рис. 2) содержит восемь анодных проволочек, шесть из которых – чувствительные. Крайние – нерабочие анодные проволочки – служат для выравнивания полей в ячейке. Радиальное расстояние между анодными проволочками равно 4.5 мм. Анодные проволочки изготовлены из позолоченного вольфрама диаметром 28 мкм и имеют натяжение 100 г. Справа и слева от плоскости с анодными проволочками на расстоянии ± 3.5 мм расположены два ряда фокусирующих проволочек. Значение потенциала на фокусирующих проволочках определяет коэффициент газового усиления. Распределение потенциалов на полевых проволочках формирует однородное поле в дрейфовом промежутке равное 1.8 кВ/см.

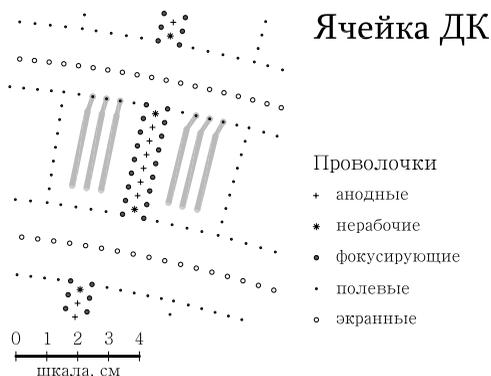


Рис. 2. Ячейка дрейфовой камеры.

Фокусирующие, полевые и нерабочие анодные проволочки изготовлены из позолоченной титановой проволоки диаметром 150 мкм и имеют натяжение 250 г.

Дрейфовая камера содержит семь концентрических цилиндрических суперслоёв ячеек, описанных выше. Четыре нечетных аксиальных суперслоя имеют проволочки параллельные оси цилиндра, три чётные стереослоя с проволочками, наклоненными под углом ± 100 мрад к оси камеры. Стереослои необходимы для измерения координаты пролёта частицы вдоль оси ДК.

Камера содержит около 32000 проволочек длиной 970 мм, из них 1512 анодных, объединенных в 252 ячейки и производит 42 измерения координаты и ионизационных потерь для частицы, пересекающей всю камеру.

Проволочная структура ДК была выбрана после тщательного компьютерного моделирования. Были созданы программы расчёта электростатических полей и расчёта электростатических и гравитационных смещений проволочек в ячейке ДК. С использованием этих программ была проведена оптимизация проволочной структуры ДК и выбраны величины натяжений проволочек.

В качестве рабочего газа ДК впервые в мире был применен диметиловый эфир (ДМЭ) – газ с предельно малым коэффициентом электронной диффузии, который позволил получить среднее пространственное разрешение 100 мкм в ячейке с расстоянием дрейфа 30 мм.

В результате проведенных исследований удалось решить целый ряд проблем, связанных с применением этого газа, к которым относятся: его токсичность, взрывоопасность, влияние примесей в газе на уровне 10^{-6} – 10^{-8} на радиационную стойкость и агрессивность к некоторым материалам, применяемым при создании дрейфовых камер и газовых систем (пластики, резина и т.д.), находящимися с ним в контакте.

Было исследовано влияние ДМЭ в газовой и жидкой фазе на механические свойства конструкционных материалов и их геометрические размеры, изучена радиационная стойкость дрейфовых камер с ДМЭ. В результате проведенных исследований и тщательного отбора материалов, используемых к конструкции ДК и газовой системы, был достигнут необходимый уровень радиационной стойкости и сделано заключение о возможности использования ДМЭ в качестве рабочего газа для дрейфовой камеры детектора КЕДР.

В реальном эксперименте было получено проектное среднее по ячейке пространственное разрешение, которое составило 95 мкм и 110 мкм для аксиальных и стерео слоев соответственно.

Измеренное импульсное разрешение ДК

$$(\sigma_{p\perp}/p\perp)^2 = (0.009)^2 + (0.017p)^2. \quad (1)$$

в три раза хуже проектного, что полностью обусловлено в три раза меньшим, по сравнению с проектным, значением магнитного поля.

Кроме восстановления импульсов заряженных частиц в ДК производится идентификация частиц по измерению ионизационных потерь в рабочем газе камеры.

В результате проведенного моделирования потерь энергии в тонких слоях вещества было получено значение разрешения по dE/dx в ДК, равное 8.2%. Для получения проектного разрешения в эксперименте был исследован ряд поправок к измеряемым амплитудам с анодных проволочек. Проводилась коррекция отличия коэффициентов газового усиления и усиления каналов электроники для различных анодных проволочек, делались поправки на зависимость амплитуды сигнала: от расстояния и времени дрейфа ионизации, от угла наклона трека к линии дрейфа, от угла трека с анодной проволочкой и координаты вдоль проволочки. В результате внесенных поправок энергетическое разрешение уменьшилось с $\sigma_{\frac{dE}{dx}} = 26.9\%$ до 8.5% и достигло проектного значения. При этом степень $\pi - K$ разделения превышает 2σ до импульса 670 МэВ/с, а $K - p$ разделения до 1200 МэВ/с.

Глава 5 посвящена изучению радиационного старения проволочных камер. Проблемы, связанные с радиационным старением сопровождают проволочные камеры с момента их появления, начиная с выхода из строя счётчиков Гейгера после регистрации определенного числа частиц и до недавних проблем с радиационным старением ДК детектора ВаВаг.

Старение связано с процессом полимеризации молекул рабочего газа, примесей в нем или примесей, поступающих в рабочий газ от десорбции конструкционных материалов и неконтролируемых загрязнений газовой системы и камеры. Полимеризация идет в плазме лавины, развивающейся вблизи анодной проволочки в процессе газового усиления. Полимеры, образующиеся в лавине, в зависимости от знака заряда и наличия дипольного момента, дрейфуют в направлении анода или катода, где с некоторой вероятностью остаются на поверхности проволочки. В результате этого на электродах камеры образуются полимерные покрытия. Покрытие на аноде приводит к увеличению диаметра проволочки, напряженность поля на

поверхности проволочки понижается, и, как следствие этого, уменьшается коэффициент газового усиления. Неоднородность покрытия вдоль проволочки приводит к ухудшению амплитудного разрешения камеры. При этом камера остается в работоспособном состоянии. Полимерная пленка на катоде приводит к образованию двойного заряженного слоя, понижению работы выхода электронов и возникновению в камере самоподдерживающегося темнового тока даже после прекращения внешнего облучения.

В результате проведенных исследований было установлено, что используемые процедуры измерения скорости анодного старения проволочных камер некорректны и систематически занижают измеряемую скорость старения. Предложена корректная процедура измерения скорости старения свободная от вышеуказанных недостатков.

Было проведено измерение скорости старения для чистого ДМЭ. Полученное значение скорости старения позволило сделать вывод о том, что газ ДМЭ, производимый в Институте катализа, пригоден для использования в ДК детектора КЕДР.

Проведено исследование влияния десорбции материалов на радиационную стойкость ДК с газом ДМЭ. Из конструкции ДК и газовой системы были исключены материалы, сильно ухудшающие радиационную стойкость, что увеличило время жизни ДК КЕДР более чем в десять раз.

Найдена добавка к рабочему газу дрейфовых камер – альфа-нафтиламин, предназначенная для прямой лазерной калибровки, практически не ухудшающая радиационную стойкость дрейфовой камеры с газом ДМЭ.

В результате проведенных исследований за восемь лет работы в эксперименте не обнаружено видимых проявлений радиационного старения ДК.

Был обнаружен ранее неизвестный эффект влияния качества поверхности анодной проволоки на старение. Предложена модель образования и роста полимерного покрытия на поверхности анодной проволочки, объясняющая обнаруженный эффект.

В главе 6 дано описание двух методов измерения энергии пучка коллайдера ВЭПП-4М.

Прецизионное измерение энергии с точностью 10^{-6} (1 кэВ) производится методом резонансной деполяризации. Метод РД основан на измерении частоты прецессии спина частиц, движущихся в магнитном поле накопителя. Для измерения частоты прецессии спина выбран процесс внутрисгуст-

кового рассеяния (ВР) сечение которого зависит от поляризации. Выполнены расчеты процесса ВР, величины эффекта при деполяризации пучка и создана система измерения энергии методом РД.

Электронный сгусток поляризуется в бустерном накопителе ВЭПП-3, а затем инжектируется в ВЭПП-4М. С помощью ВЧ-сигнала специального устройства – деполяризатора – в пучке возбуждаются колебания частота которых изменяется с заданным шагом в области измеряемой частоты прецессии спина. Для регистрации частиц, вылетающих из пучка в результате ВР, используется распределенная по периметру кольца коллайдера ВЭПП-4М система подвижных сцинтилляционных счётчиков. Перед измерением энергии счётчики вводятся внутрь динамической апертуры накопителя. При этом эффективность регистрации частиц ВР возрастает в сотни раз, что резко сокращает время измерения энергии и повышает ее достоверность. Измерение энергии методом РД проводится в специальных заходах с двумя электронными сгустками. Один из них поляризованный, а второй – неполяризованный – используется для нормировки скорости счёта частиц ВР от поляризованного сгустка. Набор статистики с детектором КЕДР проводится между заходами по измерению энергии методом РД. Энергия пучка во время набора статистики вычисляется с помощью интерполяции между калибровками с использованием измеряемых параметров ускорителя, таких как: поля в магнитных элементах ВЭПП-4М, измеряемые методом ЯМР; температур магнитов; дистиллята и стенок тоннеля ВЭПП-4М и т.д.

Созданная система измерения энергии методом РД позволила измерять энергию пучка в области рождения J/ψ -, ψ' -, $\psi(3770)$ -, D -мезонов и τ -лептона. Точность однократной калибровки энергии составляет 1 кэВ ($5 \cdot 10^{-7}$), а точность интерполяции энергии между калибровками в зависимости от режима работы ускорителя составила $8 \div 30$ кэВ ($(8 \div 15) \cdot 10^{-6}$). За время экспериментов с детектором КЕДР было проведено более 3500 калибровок энергии.

Освоена методика двух и трехкратных калибровок энергии на одних пучках с использованием частичной деполяризации, что исключило потенциально опасный источник систематической ошибки в измерении энергии, связанный с деполяризацией пучка на боковых резонансах. Из которых наиболее опасна сетевая гармоника с частотой 50 Гц, приводящая к ошибке в измерении энергии равной 25 кэВ.

Все это позволило поднять точность измерения и восстановления энергии между калибровками почти в десять раз и выйти на уровень точности измерения масс узких резонансов равный $3.5 \cdot 10^{-6}$.

Кроме метода РД на коллайдере ВЭПП-4М в экспериментах на встречных пучках впервые в мире реализован метод непрерывного мониторинга средней энергии и энергетического разброса в пучке, основанный на обратном комптоновском рассеянии. Метод ОКР основан на измерении энергетического спектра обратно рассеянных комптоновских гамма-квантов, образующихся при рассеянии монохроматического лазерного излучения на электронном пучке. Регистрация комптоновских гамма-квантов осуществляется с помощью криогенного германиевого детектора промышленного производства с высоким энергетическим разрешением. Калибровка энергетической шкалы детектора производится с помощью стандартных гамма-изотопов, энергии излучения которых известны с точностью $(3 \div 5) \cdot 10^{-6}$. Измеренное положение края комптоновского спектра позволяет вычислить среднюю энергию пучка с точностью $60 \div 70$ кэВ ($(3 \div 4) \cdot 10^{-5}$), а значение ширины края комптоновского спектра – энергетический разброс в пучке с точностью около 7%.

В отличие от РД метод ОКР позволяет проводить измерения непосредственно в процессе набора статистики, что очень важно, например, для эксперимента по прецизионному измерению массы τ -лептона. В этом измерении набор в основном ведется в узком интервале энергий (± 0.5 МэВ) на порога рождения τ -лептона. Поэтому неконтролируемые скачки энергии такого масштаба, которые мы наблюдали в некоторые моменты в эксперименте по измерению масс J/ψ -, ψ' -мезонов, радикально понижают точность измерения массы τ -лептона. Применение метода ОКР позволило оперативно реагировать на уходы энергии подобного рода.

Глава 7 посвящена эксперименту с детектором КЕДР на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М по прецизионному измерению массы τ -лептона.

Масса является одной из основных характеристик любой элементарной частицы. В случае τ -лептона точное знание массы при известных значениях его времени жизни и вероятности распада на электрон, нейтрино и антинейтрино позволяет провести проверку $\mu - \tau$ -универсальности теории электрослабых взаимодействий. В эксперименте с детектором КЕДР масса была получена из измеренной зависимости сечения $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ от энер-

гии в диапазоне $2E = 3.54 - 3.78$ ГэВ вблизи порога рождения τ -лептона.

В 2004 году, когда планировался эксперимент с детектором КЕДР по измерению массы τ -лептона, PDG значение массы вычислялось на основе пяти измерений и было равно $M_\tau = 1776.99_{-0.26}^{+0.29}$ МэВ. При этом измерение с детектором BES ($M_\tau = 1776.9_{-0.21}^{+0.18} \text{ }_{-0.17}^{+0.25}$ МэВ) существенно превосходило другие по точности и практически полностью определяло среднее значение. Здесь необходимо заметить, что в процессе подготовки эксперимента по измерению массы τ -лептона с детектором КЕДР возник ряд серьезных вопросов к тому, как был получен этот результат. Анализ опубликованных данных детектора BES показал, что заявленная в этом эксперименте ошибка измерения массы должна быть увеличена в 1.5–2.0 раза при корректной статистической обработке экспериментальных данных.

В этих условиях необходимо было провести независимое измерение массы τ -лептона со сравнимой или лучшей, чем декларируемая в измерении с детектором BES, точностью, которое и было сделано на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР.

Эксперимент по измерению массы τ -лептона состоял из двух сканированных пороговой области с набором интеграла светимости 15.2 пб^{-1} в девяти точках по энергии в диапазоне энергии пучка $1772 - 1889$ МэВ. В первом сканировании был набран интеграл светимости 6.7 пб^{-1} , а во втором – 8.5 пб^{-1} .

Для успешного проведения эксперимента по измерению массы τ -лептона принципиальное значение имеет точное знание энергии и энергетического разброса в течение всего времени набора статистики. Особенно жесткие требования на стабильность этих параметров предъявлялись при наборе статистики в пороговых точках, так как в этой постановке эксперимента значение массы определяется статистикой, набранной в узком интервале энергии (± 0.5 МэВ) на пороге рождения τ -лептона.

В эксперименте с детектором КЕДР использовалось два метода измерения энергии пучка. Для прецизионного измерения энергии пучка применялся метод РД, одновременно велось мониторингирование энергии и энергетического разброса в пучке методом ОКР.

Для вычисления сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ необходимо знать разброс энергии в системе центра масс σ_W . Для измерения σ_W на пороге рождения τ -лептона в течение 2004–2006 годов было проведено три сканирования ψ' -мезона и одно сканирование J/ψ -мезона. Исходя из квадратич-

ной зависимости разброса энергии, от энергии было вычислено значение $\sigma_W(2M_\tau) = 1.07 \pm 0.02 \pm 0.04$ МэВ.

Для уменьшения систематической ошибки при выделении событий процесса $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ условия отбора были выбраны максимально мягкими, но при этом требовалось, чтобы уровень фона находился на пренебрежимом уровне. Отбирались двухтрековые события от процессов

$$e^+e^- \rightarrow (\tau \rightarrow e\nu_\tau\bar{\nu}_e, \mu\nu_\tau\bar{\nu}_\mu, \pi\nu_\tau, K\nu_\tau, \rho\nu_\tau) \\ (\tau \rightarrow e\nu_\tau\bar{\nu}_e)^* \\ +c.c.$$

Были использованы следующие условия отбора событий:

- один трек в событии должен быть электронным. Для идентификации электронов использовался жидко-криптоновый электромагнитный калориметр и измеренный импульс электрона в координатной системе. Так как $\mu/\pi/K$ -идентификация не уменьшает систематическую ошибку, поэтому она не использовалась;
- отсутствие в событии фотонов с энергией $E_\gamma > 30$ МэВ;
- суммарная энергия зарегистрированных в событии частиц была меньше 2200 МэВ;
- поперечный импульс $p_t > 200$ МэВ и $p_t/(W - E) > 0.06$, где $W = 2E$.

Монте-карловское моделирование эксперимента было проведено с использованием пакета GEANT 3.21. Эффективность регистрации в области порога рождения τ -лептона была определена с использованием генератора KORAL-B и составила 2.5%. При повышении энергии до $W = 3777$ МэВ она понижается на 10%.

Из моделирования следовало, что при наложении выбранных условий отбора оставшийся фон, который в основном обусловлен двухфотонными событиями, монотонно зависит от энергии.

Зависимость измеренного сечения $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ от энергии показана на рис. 3.

Масса τ -лептона была получена в результате фитирования измеренного числа событий $N_{\tau^+\tau^-}$ в девяти точках по энергии и равнялась

$$M_\tau = 1776.69_{-0.19}^{+0.17} .$$

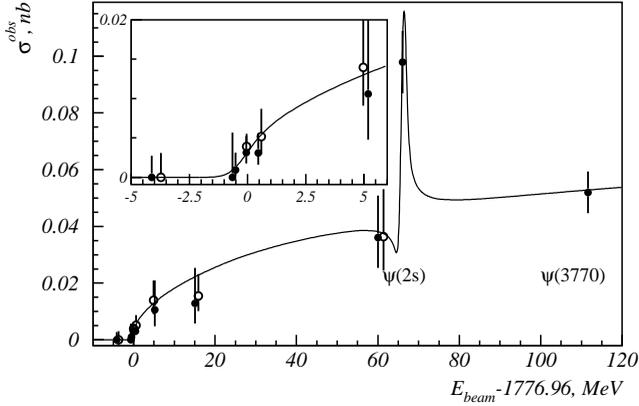


Рис. 3. Наблюдаемое сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ в зависимости от энергии.

Величины систематических ошибок в массе τ -лептона от различных источников приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения систематических ошибок в массе τ -лептона от различных источников.

Источник систематической ошибки	Величина
Измерение энергии пучка	35 кэВ
Изменение эффективности регистрации	120 кэВ
Измерение энергетического разброса	20 кэВ
Зависимость фона от энергии	20 кэВ
Стабильность измерения светимости	80 кэВ
Нестабильность энергетического разброса	10 кэВ
Вычисление сечения (радиационные поправки, учет интерференции ψ')	30 кэВ
Суммарная ошибка	150 кэВ

Суммарная систематическая ошибка, полученная суммированием квадратов ошибок от различных источников, равна 150 кэВ.

В результате проведенного эксперимента с детектором КЕДР с наилучшей в мире точностью измерена масса τ -лептона. Полученное значение

массы

$$M_\tau = 1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15$$

хорошо согласуется с PDG значением того времени

$$M_\tau = 1776.99^{+0.29}_{-0.26}$$

и практически совпадает с ним по точности. При этом наше измерение находится в хорошем согласии с результатом, полученным позднее детектором Belle и BaBar с использованием метода псевдомасс.

Значения предыдущих измерений массы τ -лептона, используемые группой PDG, и измерения массы τ -лептона с детектором КЕДР, полученные на половине статистике (KEDR 2007) и полной статистике (KEDR), приведены на рис. 4.

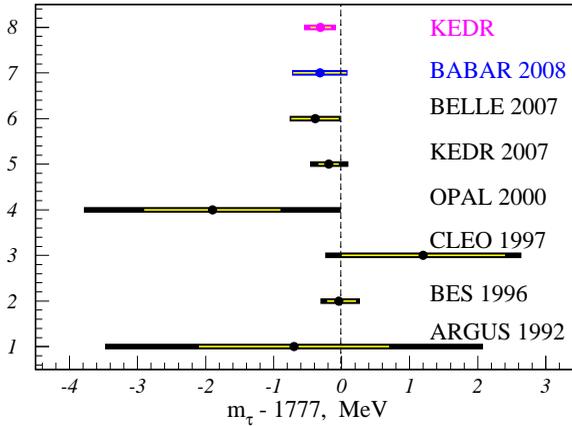


Рис. 4. Значения массы τ -лептона, включенные в таблицу свойств частиц.

В 1992 году наблюдалось отклонение от μ - τ -универсальности на уровне 2.4 стандартных отклонения. После того, как в конце 1992 года появились более точные измерения времени жизни τ -лептона и вероятности распада $B_{\tau \rightarrow e\nu_\tau \bar{\nu}_e}$ ситуация с величиной отклонения от μ - τ -универсальности осталась на прежнем уровне. При этом стало ясно, что разрешение проблемы или открытие нарушения μ - τ -универсальности надо искать в уточнении значения массы τ -лептона. Именно этим обстоятельством было мотивировано измерение массы τ -лептона с детектором ARGUS и с более высокой

точностью с детектором BES. После публикации в 1992 году предварительного результата детектора BES отклонение от $\mu - \tau$ -универсальности уменьшилось до 1.5σ , а финальный результат измерения массы в эксперименте BES полностью снял остроту вопроса о возможном нарушении $\mu - \tau$ -универсальности. После этого PDG значение массы τ -лептона стало полностью определяться измерением BES.

В настоящее время PDG значение массы τ -лептона определяют четыре независимых, хорошо согласующихся между собой измерения с детекторов BES, КЕДР, Belle и BaBar и ситуация с $\mu - \tau$ -универсальностью полностью нормализовалась. Для дальнейшего повышения точности проверки $\mu - \tau$ -универсальности необходимо прежде всего повышать точность измерения времени жизни τ -лептона и вероятности распада $B_{\tau \rightarrow e\nu\tau\bar{\nu}_e}$, которые имеют в три раза худшую относительную ошибку измерения.

В заключении перечислены основные результаты работы:

1. Введен в эксплуатацию универсальный магнитный детектор КЕДР. С детектором на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М проведена серия прецизионных экспериментов по измерению масс и лептонных ширин очарованных частиц.
2. Впервые в мире создана дрейфовая камера детектора КЕДР, работающая на диметилловом эфире. В камере получено среднее по ячейке пространственное разрешение 100 мкм при длине дрейфа 30 мм. Точность измерения ионизационных потерь в камере равна $\sigma \frac{dE}{dx} = 8.5\%$, что характерно для дрейфовых камер, имеющих в два раза большую измерительную базу.
3. Обнаружено, что используемые процедуры измерения радиационной стойкости проволочных камер систематически занижают скорость старения. Предложена корректная процедура и впервые в мире проведено исследование влияния десорбции материалов на радиационную стойкость дрейфовой камеры с диметилловым эфиром. Отбор материалов, используемых в дрейфовой камере и газовой системе, увеличил время жизни на порядок. За восемь лет набора статистики не обнаружено признаков радиационного старения камеры.
4. Открыт и исследован эффект влияния качества поверхности анодной проволоки на старение и предложена модель образования и роста по-

лимерного покрытия на поверхности проволоочки, объясняющая обнаруженный эффект.

5. Создана рекордная по точности система прецизионного измерения энергии пучка коллайдера ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации. Относительная точность измерения энергии превышает 10^{-6} . За время экспериментов проведено более 3500 калибровок энергии.
6. Впервые в мире на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М в эксперименте по измерению массы τ -лептона применен метод измерения энергии и энергетического разброса в пучке с использованием обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на пучке ускорителя с регистрацией спектра обратнорассеянных гамма-квантов криогенным германиевым детектором высокого разрешения.
7. В эксперименте с детектором КЕДР с лучшей в мире точностью измерена масса τ -лептона. Получено значение массы

$$M_{\tau} = 1776.69^{+0.17}_{-0.19} \pm 0.15 .$$

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. S.E. Baru, V.E. Blinov, et al. The KEDR drift chamber. // Nucl. Instr. and Meth., A323 (1992) 151.
2. S.E. Baru, V.E. Blinov, et al. Status of the KEDR drift chamber. // Nucl. Instr. and Meth., A379 (1996) 417.
3. V.E. Blinov, V.R. Groshev. Aging in wire chamber filled with dimethyl ether. // Nucl. Instr. and Meth., A385 (1997) 419.
4. S.E. Baru et al. The KEDR drift chamber based on dimethyl ether. // Nucl. Instr. and Meth., A409 (1998) 23.
5. V.E. Blinov. Procedure dependence of the ageing rate measurements. // Nucl. Instr. and Meth., A419 (1998) 676.
6. V.V. Anashin, V.E. Blinov et al. Status of the KEDR detector. // Nucl. Instr. and Meth., A478 (2002) 420.

7. S.E. Baru, A.E. Blinov, V.E. Blinov et al. Status of the KEDR drift chamber. // Nucl. Instr. and Meth., A494 (2002) 251.
8. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Absolute Calibration of Particle Energy at VEPP-4M. // Nucl. Instr. and Meth., A494 (2002) 81.
9. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Analysis of Errors and Estimation of Accuracy in the Experiment on Precise Mass Measurement of J/PSI and PSI' Mesons and TAU-lepton on the VEPP-4M Collider. // Nucl. Instr. and Meth., A494 (2002) 68.
10. V.E. Blinov, I.N. Popkov, A.N. Yushkov. Aging measurements in wire chambers. // Nucl. Instr. and Meth., A515 (2003) 95.
11. V.V. Anashin, ..., V.E. Blinov, ..., A.G. Shamov et al. The threshold experiments: status and expectations. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 144 (2005) 113.
12. V.V. Anashin ..., V.E. Blinov, et al. [KEDR Collaboration]. Measurement of the tau lepton mass at the KEDR detector. // JETP Lett. 85 (2007) 347; Письма в ЖЭТФ, 85 (2007) 429.
13. V.V. Anashin et al. [KEDR Collaboration]. New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector. // Nucl. Phys. Proc. Suppl., 169 (2007) 125.
14. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., V.E. Blinov, et al. Tau mass measurement at KEDR. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 181-182 (2008) 311.
15. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., V.E. Blinov, et al. Tau mass measurement at KEDR. - Prepared for 10th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU08), Novosibirsk, Russia, 22-25 Sep 2008; Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 189 (2009) 21.
16. О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, и др. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. // ЖЭТФ, т. 136, вып. 4 (2009) 690.
17. O.V. Anchugov, V.E. Blinov, et al. Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron-Positron Collider. // Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 109, No. 4 (2009), 590.

18. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Beam energy measurements at VEPP-4M collider by resonant depolarization technique. // ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 48 (2009) 181.
19. V.E. Blinov, V.V. Kaminsky, et al. Beam Energy and Energy Spread Measurement by Compton Backscattering of Laser Radiation at the VEPP-4M Collider. // ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 48 (2009) 195.
20. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Study of the possibility of increasing the accuracy of CPT Invariance Test at electron-positron storage rings. // ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 48 (2009) 207.
21. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider: KEDR/VEPP-4M. // Nucl. Instrum. and Meth., A598 (2009) 23.
22. В.В. Анашин, ..., В.Е. Блинов, и др. Проект детектора КЕДР. - Труды международного симпозиума по координатным детекторам в физике высоких энергий, Дубна 1988, Д1-13-88-172, 58.
23. S.E. Baru, V.E. Blinov, et al. The KEDR drift chamber. - Proc. of Fifth Intern. Conf. on instrumentation for colliding beam physics, Novosibirsk, (1990) 41.
24. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. High-efficiency Polarimeter Based on Intra-beam Scattering. - Proceedings of EPAC 2002, 1954, 2002.
25. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. New Experiments with Polarized Beams at VEPP-4M. - Proceedings of EPAC 2002, 422, 2002.
26. В.Е.Блинов, А.В.Богомягков, et al. Начало эксперимента по абсолютной калибровке энергии частиц на ВЭПП-4М вблизи порога рождения тау-лептона. - XVIII совещание по ускорителям заряженных частиц, Обнинск, 2002.
27. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Precise Energy Measurements in Experiments on VEPP-4M Collider. - Proc. of PAC05, Knoxville, Tennessee, USA, 2005.
28. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Status of VEPP-4M collider: current activity and plans. - Proceedings of the XIX International Workshop on Charged Particle Accelerators, September 13-18, 2005, Alushta, Crimea.

29. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Beam Energy Calibration in Experiment on Precise Tau Lepton Mass Measurement at VEPP-4M with KEDR Detector. - Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, UK, 2006.
30. V.V. Anashin ..., V.E. Blinov, et al. [KEDR Collaboration]. New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector. - "Tau lepton physics Pisa 2006 125.
31. О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, и др. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. // ЖЭТФ, т. 136, вып. 4 (2009) 690.
32. O.V. Anchugov, V.E. Blinov, et al. Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron-Positron Collider. // Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 109, No. 4 (2009), 590.
33. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, et al. Accelerator physics activity at the VEPP-4M collider. - Proc. of PAC09, Vancouver, Canada, 2009.

БЛИНОВ Владимир Евгеньевич

Измерение массы тау-лептона

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 9.09.2011 г.

Подписано в печать 12.09.2011 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1.8 печ.л., 1.4 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 26

Обработано на РС и отпечатано на
ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.