

На правах рукописи

НИКИТИН Сергей Алексеевич

**ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ПУЧКИ
В ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ
НА КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-4М
С ДЕТЕКТОРОМ КЕДР**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

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:

ТУМАЙКИН – доктор физико-математических наук,
Герман Михайлович профессор, Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПАРХОМЧУК – доктор физико-математических наук,
Василий Васильевич член-корреспондент РАН,
Учреждение Российской академии наук Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

СТИБУНОВ – доктор физико-математических наук,
Виктор Николаевич НИИ ядерной физики Томского политехнического университета, г. Томск.

СЫРЕСИН – доктор физико-математических наук,
Евгений Михайлович профессор, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской обл.

ВЕДУЩАЯ – Российский научный центр "Курчатовский
ОРГАНИЗАЦИЯ: институт", г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” “_____” 2011 г. в “_____” часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 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

В начале 2000-х годов с выходом детектора КЕДР в рабочий режим на модернизированном коллайдере ВЭПП-4М было решено провести серию новых экспериментов по уточнению масс очарованных мезонов и тау лептона. Значение таких экспериментов состоит в создании прецизионных реперов на фундаментальной шкале масс в области рождения указанных частиц. Точное знание масс J/ψ и $\psi(2s)$ востребовано для абсолютной калибровки импульсного разрешения координатных систем детекторов. По положению их пиков, между которыми находится порог рождения тау, производится калибровка энергетической шкалы коллайдера. Наиболее точное измерение массы тау-лептона можно осуществлять, изучая именно пороговое поведение его сечения и применяя метод РД в данной области энергий. Экспериментальное уточнение массы тау-лептона важно для проверки основополагающего принципа лептонной универсальности в теории Вайнберга-Салама.

Для проведения экспериментов по измерению масс на новом качественном уровне требовалось повысить, примерно, на порядок точность абсолютной калибровки энергии пучка методом РД относительно среднемировой, которая к тому времени не превосходила 10^{-5} . Повышение точности метода РД влекло за собой множество вопросов, связанных с оценкой соответствующих, но еще неизученных источников систематической ошибки. Требующей решения являлась проблема получения и использования поляризованных пучков на энергиях в области порога рождения тау-лептона (1777 МэВ), наиболее важной для минимизации погрешности измерения массы этой частицы. Из-за близости тау-порога к целому спиновому резонансу (1763 МэВ) практически невозможно использовать при значениях энергии около порога эффект радиационной самополяризации частиц.

Цель диссертационной работы

Для выполнения намеченной физической программы необходимо было решить следующие задачи, относящиеся к вопросам применения метода РД, а также к способам наблюдения и сохранения поляризации частиц:

- реализовать и изучить методы измерения поляризации, обеспечивающие в одном случае эффективную регистрацию быстрого процесса деполяризации, а в другом - определение ее абсолютной величины;
- измерить степень поляризации пучков в рабочей области энергий;

- рассчитать эффективность деполяризатора и оптимизировать режимы его работы;
- теоретически и экспериментально изучить влияние различных возмущений на точность метода РД при определении средней энергии частиц в пучке и средней инвариантной массы в коллизиях на встречных пучках;
- предложить и осуществить сценарий эксперимента по измерению массы тау-лептона, основанный на применении РД на энергиях пучка вблизи порога рождения частицы;
- теоретически и экспериментально изучить роль различных деполяризующих факторов в кольце ВЭПП-4М на тау-пороге и по возможности устранить их.

Соответствующие исследования и их результаты легли в основу настоящей диссертации. В ходе решения перечисленных задач точность абсолютной калибровки методом РД на коллайдере ВЭПП-4М была поднята до рекордного уровня 10^{-6} , что послужило стимулом к дополнительному исследованию, также вошедшему в диссертацию. Речь идет об изучении возможности повышения точности проверки фундаментальной СРТ теоремы в эксперименте на накопителе путем сравнения частот деполяризации электронов и позитронов.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, вынесенных на защиту, является определяющим. Автор был одним из ведущих участников эксперимента по наблюдению спиновой зависимости СИ, предложил и осуществил эксперимент по изучению резонансной спиновой диффузии. Участвовал в разработке тушековского поляриметра, вычислил скорость регистрации тушековских электронов, проанализировал свойства метода "двух банчей". Теоретически объяснил эффект зависимости поляризационного вклада в интенсивность тушековского рассеяния от связи колебаний. Рассчитал деполяризатор на ТЕМ-волне и выбрал оптимальные варианты его размещения и параметры сканирования. Предложил теоретическую модель для описания процесса деполяризации при "тонком" сканировании, идею автоматической подстройки положения рабочей точки ВЭПП-3 на сетке спиновых резонансов с целью повысить надежность и воспроизводимость результатов по степени поляризации. Разрабатывал и осуществлял программы всех основных поляризационных экспериментов на модернизированном комплексе ВЭПП-4. Совместно с В.Н. Жиличем им предложено использовать возможности установки Дейтрон для измерения степени

поляризации в бустере ВЭПП-3. Разработал и реализовал сценарии калибровок энергии в измерениях масс с детектором КЕДР, включая тот, что позволил применять поляризованный пучок на энергии тау-порога - вблизи целого спинового резонанса. Выполнил численное моделирование и оценки деполяризующего влияния различных возмущений поля по методике, развитой в своих ранних работах. Внес теоретический вклад в анализ погрешностей экспериментов с резонансной деполяризацией. Рассмотрел требования к накопителю с точки зрения повышения точности сравнения частот прецессии спинов электрона и позитрона для проверки СРТ теоремы.

Научная новизна

1. Достигнута точность 10^{-6} абсолютной калибровки энергии пучка в накопителе методом РД в экспериментах по измерению масс.
2. Проведен эксперимент с применением поляриметра на "спиновом свете" , в котором измерена значительно меняющаяся по азимуту в накопителе с жесткой фокусировкой величина функции спинового отклика, известной до этого только в теории.
3. Развита методика расчёта интенсивности тушековских электронов в борновском приближении с учетом двумерности столкновений, релятивизма в системе центра масс и поляризационного вклада. Дано теоретическое объяснение зависимости величины поляризационного вклада в интенсивность рассеяния от коэффициента бегатронной связи.
4. Экспериментально изучены в сравнении с теоретическими оценками особенности наблюдения поляризации по тушековскому рассеянию в области энергий $1.5 \div 4$ ГэВ.
5. Применена внутренняя поляризованная мишень для измерения степени поляризации пучка в электронном накопителе.
6. Применена поляризация пучков в методе РД при малой отстройке от целого спинового резонанса. Экспериментально и теоретически изучено время жизни поляризации в этих условиях.
7. В сравнении с расчётом экспериментально изучено влияние ошибки компенсации продольного поля детектора на сдвиг спиновой частоты.
8. Получена теоретическая оценка сдвига спиновой частоты из-за вертикальных искажений орбиты с учетом корреляционного вклада - по заданному среднеквадратичному отклонению орбиты, которым определяется величина гармоник в спектре угловых возмущений.

9. Для анализа точности при определении инвариантной массы по измеренной спиновой частоте, а также при сравнении спиновых частот электрона и позитрона предложена классификация азимутального распределения потерь энергии. Сделаны оценки зависимости средней частоты спиновой прецессии в сгустке от его тока.
10. Экспериментально и теоретически исследован процесс тонкого сканирования, в котором линия частоты деполяризатора намного тоньше линии частоты спиновой прецессии в пучке. Достигнуто разрешение по частоте резонансной деполяризации лучше 10^{-8} .
11. При использовании системы стабилизации поля в поворотных магнитах по сигналу ЯМР достигнута точность 10^{-6} сравнения измеренных уровней стабильности поля и энергии.

Научная и практическая ценность работы

1. Уменьшение в 3–4 раза ошибки в значениях масс J/ψ и ψ' , достигнутое с применением результатов диссертационной работы, будет востребовано для абсолютной калибровки импульсного разрешения координатных систем детекторов и энергетической шкалы коллайдеров по положению пиков этих резонансов. Уточнение массы тау-лептона необходимо для проверки гипотезы лептонной универсальности.
2. Метод РД как наиболее точный применен для отладки и калибровки ОКР монитора энергии пучка, который таким образом получил важное подтверждение своих возможностей.
3. По изменению частоты прецессии спина найдено оптимальное соотношение тока в обмотках анти-соленоидов и измеренного поля КЕДР (другим способом сделать это так же точно технически не предусмотрено). Тем самым минимизированы вклады ошибки компенсации поля детектора в бетатронную связь (с точностью $\sim 1\%$ по току анти-соленоидов), в систематическую ошибку РД калибровки энергии (с точностью ~ 1 кэВ), а также в скорость деполяризующих процессов.
4. Мёллеровский поляриметр с внутренней поляризованной мишенью может быть особенно эффективен при большом числе сгустков, как в случае накопительных колец с сильным затуханием из проектов линейного супер-коллайдера, а также супер $c - \tau$ и супер- B фабрик.
5. На основе подхода к расчёту интенсивности тушековских электронов в двумерной модели рассеяния с учетом релятивизма в системе центра масс возможно рассмотрение поправок в расчёты размеров и времени жизни пучка, использующие нерелятивистское одномерное приближение.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Выбраны и изучены условия для получения поляризованных электронного и позитронного пучков на ВЭПП-4М и их применения для абсолютной калибровки энергии по частоте прецессии спина с точностью 10^{-6} в экспериментах с детектором КЕДР по измерению масс частиц пси-семейства и тау лептона.
2. Развита методика расчёта интенсивности регистрации тушековских электронов в борновском приближении для одномерной и двумерной моделей столкновений частиц внутри сгустка с учетом релятивизма в системе центра масс и спиновой зависимости. Экспериментально изучены в сравнении с теоретическими оценками особенности метода наблюдения поляризации по тушековскому рассеянию.
3. Выполнен расчёт эффективности деполяризатора с поперечным полем в различных условиях, включая режим "тонкого" сканирования, для описания которого предложена теоретическая модель. Вычислена функция спинового отклика деполяризатора, модифицированная для применения в области малых значениях параметра спиновой частоты. Сделан выбор параметров сканирования частоты и оптимальных вариантов расположения деполяризатора в кольце накопителя в экспериментах по измерению масс.
4. С помощью созданного с участием автора принципиально нового поляриметра, основанного на наблюдении спиновой зависимости интенсивности синхротронного излучения, изучен процесс резонансной спиновой диффузии под влиянием деполяризатора с поперечным полем. Впервые измерена сильно меняющаяся с азимутом в накопителе с жесткой фокусировкой величина функции спинового отклика.
5. Измерена степень радиационной поляризации электронов в бустер-накопителе ВЭПП-3 как функция его энергии. Поляризация в накопителе впервые наблюдается по асимметрии мёллеровского рассеяния на внутренней поляризованной мишени, для чего по предложению автора использованы возможности установки Дейтрон.
6. Предложен и реализован сценарий применения поляризованных пучков для измерения массы тау в области энергии пучка на пороге рождения этой частицы – в условиях, резко ограничивающих возможности получения и сохранения радиационной поляризации из-за близости целого спинового резонанса.
7. С использованием развитой автором методики проведены расчёты деполяризующего влияния различных возмущений поля ВЭПП-4М,

включая погрешность компенсации продольного магнитного поля детектора КЕДР. Измерено время жизни поляризации инжектированного в коллайдер поляризованного пучка в зависимости от его энергии вблизи тау-порога и предложены меры по его увеличению.

8. Метод резонансной деполяризации, как наиболее точный, применен для отладки нового метода мониторинга энергии пучка по положению края спектра обратного комптоновского рассеяния (ОКР) лазерных фотонов.
9. Экспериментально и теоретически изучены вопросы точности метода резонансной деполяризации при определении энергии пучка, энергии в системе центра масс сталкивающихся пучков, а также при сравнении частот прецессии спина электронов и позитронов.
10. В методических экспериментах на электронных пучках и с помощью теоретических оценок показана возможность повышения точности проверки СРТ теоремы при сравнении частот прецессии спина электронов и позитронов в накопителе методом резонансной деполяризации.
11. Проведен новый цикл измерений масс на комплексе ВЭПП-4 с достигнутой лучшей в мире точностью по массам J/ψ -, ψ' -мезонов и тау-лептона, в которых применены основные результаты диссертационной работы.

Апробация работы

Работы, составляющие материал диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах и рабочих совещаниях ВЭПП-4-КЕДР в ИЯФ СО РАН; на семинаре профессора И.М. Тернова в Московском университете им. Ломоносова, на семинаре ускорительной лаборатории в Корнелльском университете (США). Доклады о работах по теме диссертации были представлены на следующих международных и российских конференциях и совещаниях: 12th International Conference on High Energy Accelerators (Батавия, Иллинойс, США, 1983); Particle Accelerator Conference PAC 2001 (Чикаго, 2001); 8th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics (Новосибирск, 2002); Quarkonium Working Group School (Пекин, 2004); European Particle Accelerator Conference EPAC 2002 (Париж, 2002); 10th Workshop on Polarized Sources and Targets PST 2003 (Новосибирск, 2003); EPAC 2004 (Люцерн, 2004); EPAC 2006 (Эдинбург, 2006); IBS Mini Workshop (Кокрофтовский институт, Дарсбери, 2007); XX Российская конференция по ускорителям заряженных частиц, RUPAC 2006 (Новосибирск, 2006), RUPAC 2010 (Протвино, 2010); PAC 2007 (США, 2007) и др.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в более чем 30 печатных работах, включая статьи в российских и зарубежных журналах, в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и трех приложений. Включает 85 рисунков, 7 таблиц и список литературы, содержащий около 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована направленность работы; дается краткий обзор истории экспериментов по измерению масс частиц с применением метода РД в областях энергии, доступных на комплексе ВЭПП-4М; приводятся положения, выносимые на защиту.

В главе 1 дается краткая характеристика ускорительного комплекса ВЭПП-4 и магнитного детектора КЕДР. На схеме рис. 1 показано размещение основных элементов систем измерения поляризации и принудительной резонансной деполяризации, а также установки мониторинга энергии по краю спектра ОКР (обратного комптоновского рассеяния). Описан способ получения поляризованных электрон-позитронных пучков в коллайдере ВЭПП-4М с энергией < 2 ГэВ за счет использования эффекта радиационной самополяризации Соколова-Тернова в бустерном накопителе ВЭПП-3. Оценены в сравнении несколько деполяризирующих механизмов на ВЭПП-4М: квантовые флуктуации, внутривидовое (тушековское) рассеяние с переворотом и без переворота спина, а также многократное рассеяние на остаточном газе. Описана система автоматической подстройки рабочей точки по бетатронным частотам ВЭПП-3 для избежания деполяризирующего влияния опасных спиновых резонансов в процессе радиационной поляризации. Численно рассмотрен способ увеличения степени поляризации позитронов в коллайдере с помощью специального соленоида, установленного в канале инжекции ВЭПП-3-ВЭПП-4М.

В главе 2 приведен расчёт характеристик деполяризатора с поперечным полем для резонансной деполяризации пучка. Обсуждены требования на физические параметры процесса резонансной деполяризации применительно к условиям ВЭПП-4М. Сравняются два известных способа сканирования частоты деполяризатора. Предложена теоретическая модель для

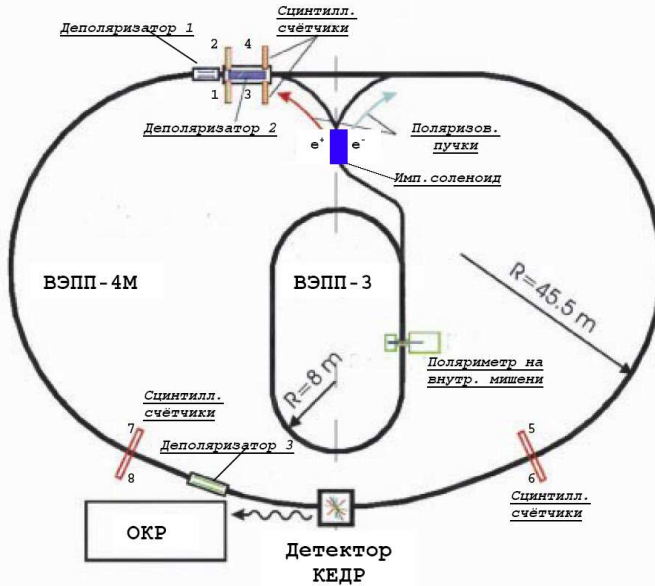


Рис. 1. Схема размещения элементов систем управления поляризацией и ее измерения.

описания эксперимента по "тонкому" сканированию, в котором достигается наилучшее разрешение по частоте деполяризации. Рассчитана функция спинового отклика (ФСО), определяющая эффективность деполяризатора с поперечным полем и зависящая от азимута его размещения, а также от энергии пучка и от вертикальной бетатронной частоты (рис. 2). Для повышения точности формула для ФСО обобщена на случай малых значений параметра спиновой частоты. Обобщенная ФСО H^ν связана с ФСО традиционного вида F^ν соотношением: $H^\nu = \frac{1+a}{\nu} \cdot G^\nu - i \cdot \left(1 - \frac{1}{\nu^2}\right) \cdot F^\nu$, $\nu = \gamma a$ – параметр спиновой частоты, $a = (g - 2)/2$, γ – релятивистский фактор, функция G^ν – дополнение при малых ν .

Рассчитана скорость преднамеренной деполяризации в трех реализованных вариантах размещения деполяризатора в кольце ВЭПП-4М для энергий экспериментов в пиках J/ψ и ψ' а также на пороге рождения тау-лептона. На этой основе выбран оптимальный вариант по размещению деполяризатора для каждой из указанных областей энергий. Проведены расчёты времени деполяризации на внешнем спиновом резонансе с учётом модуляции спиновой частоты синхротронными колебаниями и пульсациями магнитного поля. Представлены параметры сканирования в характерных режимах работы деполяризатора.

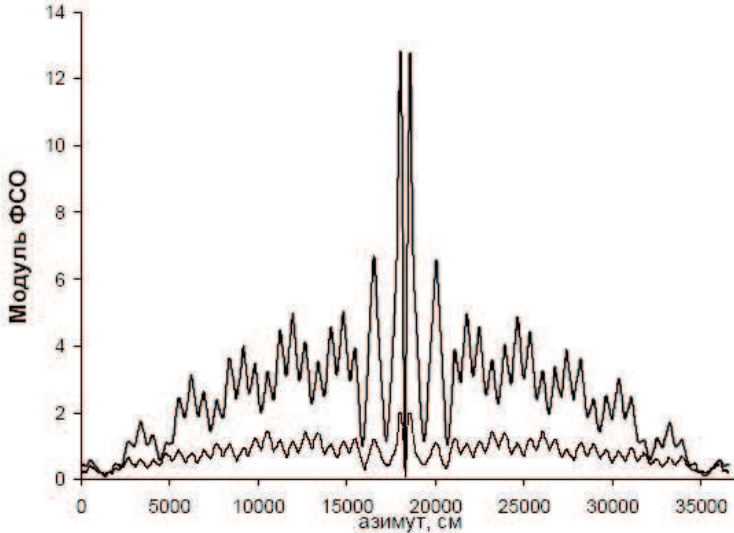


Рис. 2. Распределение модуля функции спигового отклика по кольцу ВЭПП-4М на энергии 1785 МэВ: толстая линия — $H\nu$, тонкая — $G\nu$. Зависимость симметрична относительно места встречи. Из-за очень малых значений ФСО в техническом промежутке эффективность деполаризатора на этом участке неприемлемо низка. Для указанной энергии выбран деполаризатор в экспериментальном промежутке.

В главе 3 описан эксперимент по изучению резонансной спиновой диффузии, поставленный на накопителе ВЭПП-4 в 1983г. Его результаты имели важное значение для всего цикла измерений масс с применением метода РД на модернизированном коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР, в которых значительно была повышена точность абсолютной калибровки энергии пучка. В данном опыте сравниваются расчётные и измеренные характеристики резонансной деполаризации в поле встречной ТЕМ волны. По измеренной скорости резонансной деполаризации $\propto |F\nu|^2$ впервые выявлен и количественно определен известный из теории фактор спигового отклика, который связан с вынужденными отклонениями траектории частиц от равновесной орбиты и может в десятки и даже в $\sim 10^2$ раз усиливать прямое действие поперечных возмущений ведущего поля на спин (рис. 3). Использован новый метод измерения поляризации, с помощью которого впервые наблюдается спиновая зависимость интенсивности синхротронного излучения ("спиновый свет").

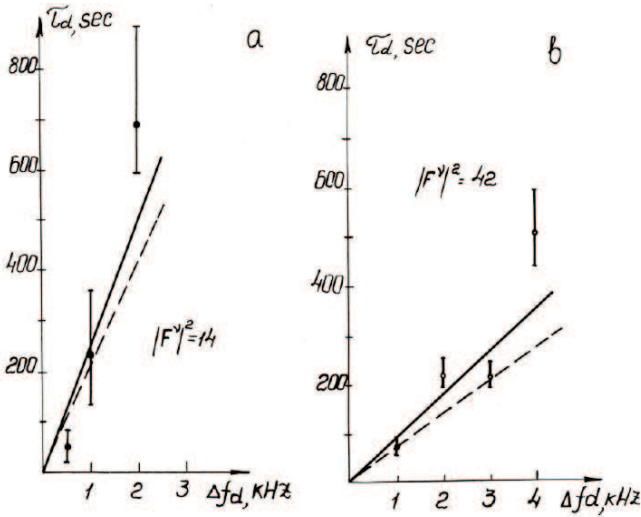


Рис. 3. Время преднамеренной деполаризации пучка как функция амплитуды девиации частоты деполаризатора: а) $|F\nu|^2 = 14$, $E = 4930$ МэВ; б) $|F\nu|^2 = 42$, $E = 4980$ МэВ. Сплошной линией и точками показаны данные эксперимента, пунктиром – расчёт.

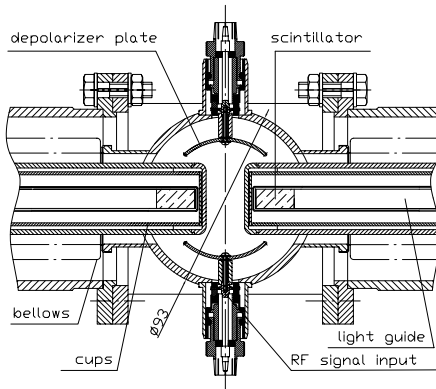


Рис. 4. Поперечное сечение вакуумной камеры в месте расположения тушековских счетчиков и пластин деполаризатора. *Scintillator* – сцинтиллятор; *light guide* – световод; *depolarizer plate* – пластина деполаризатора; *cups* – внутренний (медный) и внешний (нержавеющая сталь) "стаканы"; *bellows* – сильфонное соединение; *RF signal input* – вакуумный ввод ВЧ сигнала на пластины.

Глава 4 посвящена тушековскому поляриметру ВЭПП-4М, работающему на эффекте внутрисгусткового рассеяния (IBS). Описана система регистрации рассеянных электронов на ВЭПП-4М (рис. 1, рис. 4). Получены формулы для расчёта интенсивности тушековских частиц в борновском приближении с учётом релятивизма в системе центра масс для одномерной и двумерной моделей столкновений. Расчёт выполняется в физически обусловленных пределах на возмущение импульса регистрируемых электронов/позитронов.

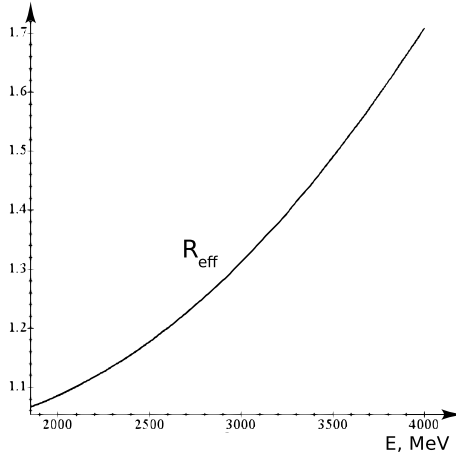


Рис. 5. Зависимость релятивистской поправки в интенсивности тушековских электронов – фактора R_{eff} – от энергии пучка для ВЭПП-4М.

Дается сравнение результатов нерелятивистского и релятивистского расчётов интенсивности в зависимости от энергии ВЭПП-4М (рис. 5). Представлены данные измерения загрузки счетчика как функции расстояния до орбиты в сравнении с расчётом в однооборотном и многооборотном приближениях для описания движения частиц после рассеяния (рис. 6). Для уменьшения систематической ошибки наблюдаемая величина определяется через скорость счёта частиц, рассеянных из поляризованного сгустка, нормированную на интенсивность частиц из неполяризованного (метод "двух банчей"). Предложена модель описания этих наблюдений, учитывающая влияние поляризации на тушековское время жизни пучка. Модельные зависимости сравниваются с экспериментальными при разном соотношении токов сгустков. Рассчитаны зависимости нормализованной скорости регистрации тушековских электронов и величины поляризационного эффекта (деполяризационного скачка) от энергии (рис. 7). Для срав-

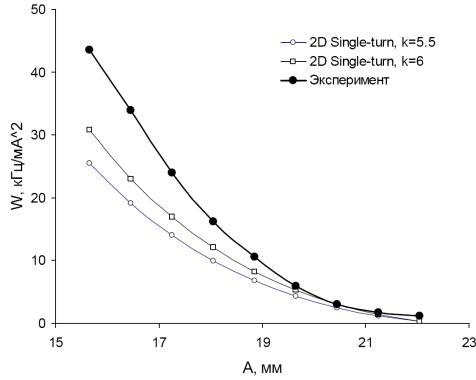


Рис. 6. Сравнение измеренной и рассчитанной по двумерной модели в однооборотном приближении для двух значений коэффициента связи k (отношение радиального углового разброса к вертикальному) зависимостей удельной (нормированной на квадрат тока в сгустке) загрузки сцинтиляционного счётчика от расстояния (A) до орбиты пучка на энергии 1.55 ГэВ. Ток сгустка во время измерения падал в пределах от 3 мА до 2.8 мА.

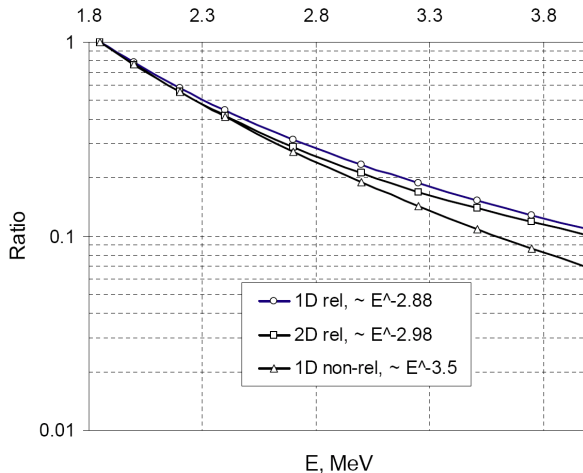


Рис. 7. Расчётная скорость регистрации тушековских частиц в зависимости от энергии с нормировкой на объем и квадрат тока электронного сгустка, делённая на значение этой величины на энергии 1.85 ГэВ, в 1D нерелятивистском, 1D релятивистском и 2D релятивистском приближениях с типичным значением параметра связи на ВЭПП-4М $k = 5$. Указан степенной показатель кривых.

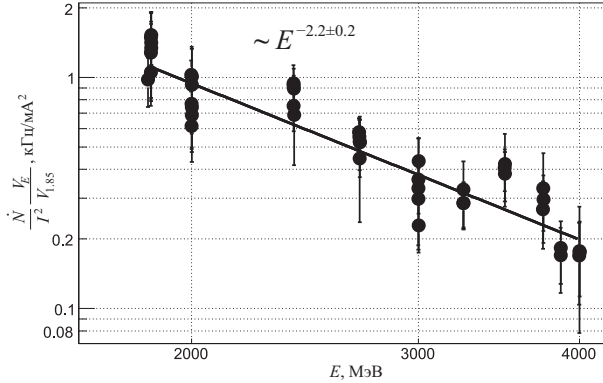


Рис. 8. Измеренная нормированная скорость регистрации рассеянных электронов с выделением коррелированных совпадений в зависимости от энергии пучка.

нения представлены результаты измерения на ВЭПП-4М скорости регистрации частиц в интервале энергии 1.8 ÷ 4 ГэВ (рис. 8). Отличие в степенных показателях теоретической ($n \approx -3$) и экспериментальной кривых ($n = 2.2 \pm 0.2$) может объясняться фоновыми условиями и особенностями режимов накопителя. Теоретически и экспериментально исследована зависимость величины деполаризационного скачка от вертикального эмиттанта пучка (коэффициента связи бетатронных колебаний) в области 1.5 – 1.85 ГэВ (рис. 9,10,11). Впервые дано объяснение этому эффекту с

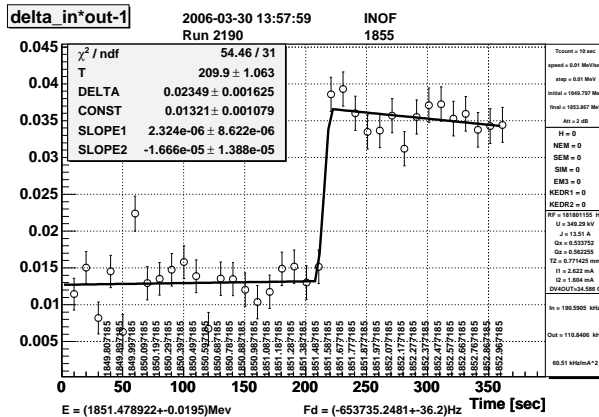


Рис. 9. Типичный деполаризационный скачок в частоте коррелированных совпадений сигналов от двух счетчиков на 1.85 ГэВ.

указанием на особенность функции распределения по импульсу в системе центра масс в двумерной модели столкновений.

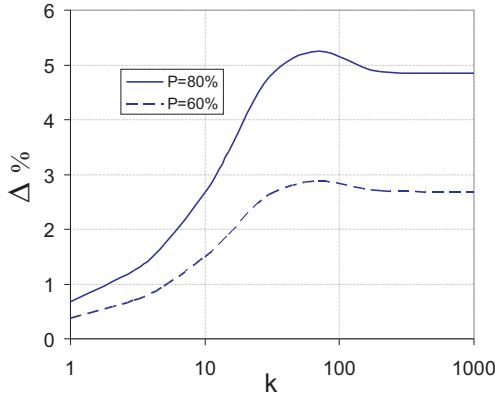


Рис. 10. Расчетная величина скачка в зависимости от параметра связи (k) для двух значений степени поляризации при $E = 1840$ МэВ, $A = 1$ см.

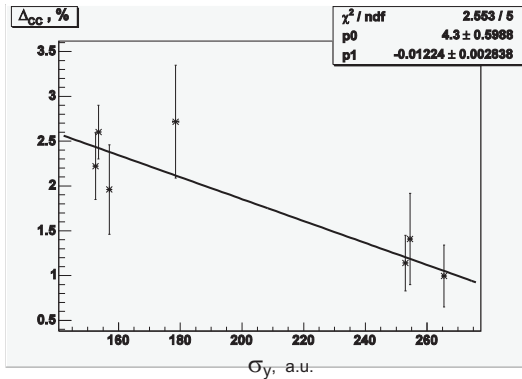


Рис. 11. Измеренная зависимость скачка в скорости счета тушековских частиц от вертикального размера пучка.

В главе 5 описан мёллеровский поляриметр, который измеряет асимметрию рассеяния поляризованных электронов циркулирующего пучка на струе поляризованных атомов дейтерия из источника атомарного пучка установки Дейтрон на накопителе ВЭПП-3 (рис. 12). Поляризационные измерения, выполненные с помощью этого поляриметра в 2003 г., стали первым применением внутренней поляризованной мишени для измерения поляризации пучка в электронном накопителе. Измеренная зависимость

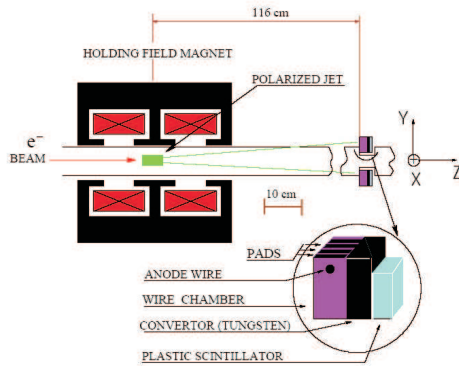


Рис. 12. Схема мёллеровского поляриметра с внутренней мишенью. *Anode wire* – анодная проволока; *holding field magnet* – магнит для удержания поляризации атомов струи; *polarized jet* – поляризованная газовая струя; *pads* – полосковые подложки; *wire chamber* – проволочная камера; *converter* – вольфрамовый конвертор; *plastic scintillator* – пластмассовый сцинтиллятор.

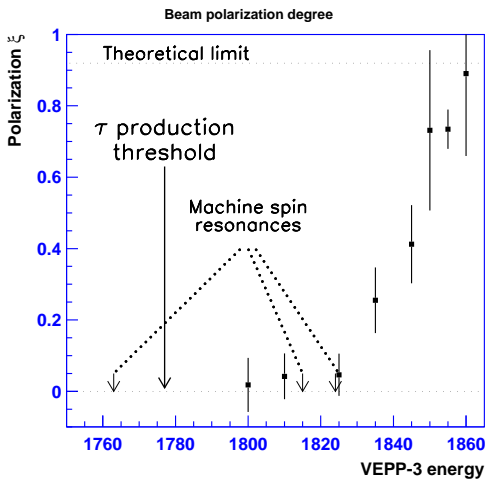


Рис. 13. Измеренная степень поляризации пучка ВЭПП-3 как функция его энергии.

равновесной степени радиационной поляризации в бустере в диапазоне от 1.8 до 1.85 ГэВ сыграла важную роль при выборе сценария эксперимента на тау-пороге (1.78 ГэВ) с использованием пропускаемых в коллай-

дер поляризованных пучков для РД калибровки энергии. Приведено сечение процесса рассеяния и определение наблюдаемой асимметрии. Описаны устройство мишени и системы регистрации, а также способ анализа данных. Представлены экспериментальные результаты (рис. 13).

Главе 6 посвящена вопросам точности метода РД, относящимся к экспериментам по измерению масс и к обсуждаемой в диссертации проверке СРТ теоремы путем сравнения частот прецессии спина электронов и позитронов. Указана предельная точность метода в идеальном накопителе. При наличии возмущений в зависимости от их вида возможно смещение энергии и спиновой частоты как без нарушения, так и с нарушением линейного соотношения между ними, имеющего место в идеальном случае. Рассмотрена связь энергии/спиновой частоты и радиальных искажений орбиты с приведением результата демонстрационного эксперимента. Оценено влияние секступолей на сдвиг и разброс энергии/спиновых частот из-за флуктуаций траекторий. Сделана оценка влияния магнитных бурь на энергию пучка в ВЭПП-4М. Получена формула для оценки сдвига спиновой частоты по спектру углов случайных поворотов орбиты в вертикальной плоскости с учетом корреляции спиновых возмущений. Расчет по формуле сравнивается с результатом численного моделирования (рис. 14).

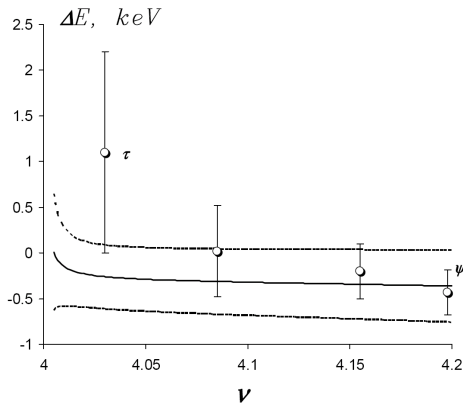


Рис. 14. Систематическая ошибка в энергии как функция параметра невозмущенной спиновой частоты при наличии искажений орбиты пучка ВЭПП-4М по вертикали с разбросом 1 мм: сплошная кривая – вычисленная по формуле, полученной в диссертационной работе (две пунктирных линии – для указания стандартного отклонения); точки с усами – численное моделирование. Символами τ и ψ' указаны точки, отвечающие энергиям порога рождения тау-лептона и ψ' -резонанса.

Рассмотрен в общем виде эффект слабого продольного магнитного поля, которое как и вертикальные искажения орбиты приводит к систематической ошибке в методе РД. Приведен численный пример с влиянием горизонтальной компоненты поля Земли. Оценен вклад вертикальных бампов и гармонического возмущения вертикальной орбиты в сдвиг энергии. Сделан теоретический анализ влияния на точность метода РД азимутальной зависимости радиационных потерь энергии в произвольном накопителе с единой магнитной дорожкой для электронов и позитронов. Предложена классификация распределения потерь из трех случаев: азимутальная однородность или зеркальная симметрия магнитной структуры; анти-симметрия электронной и позитронной функций потерь; асимметрия из-за когерентных потерь при разнице токов электронов и позитронов. Приведен численный результат для модели случайных погрешностей поля ВЭПП-4М (нарушение зеркальной симметрии накопителя). Описаны источники влияния параметров пучка в месте встречи на величину ошибки определения массы рождаемого состояния по результатам РД калибровки энергии одного из встречных пучков. В дополнение к известной поправке на измеряемую массу, связанной с разницей потенциалов пучка на основной части кольца коллайдера и в месте встречи, указано на ошибку, которая может стать заметной в СРТ эксперименте. Ее источник - азимутальные вариации потенциала при имеющейся разнице электронного и позитронного сгустков по числу частиц.

В главе 7 описаны особенности применения метода РД в измерениях масс частиц ψ семейства на ВЭПП-4М с детектором КЕДР. Достигнутая точность абсолютной калибровки энергии пучков является рекордной и составляет по порядку величины 10^{-6} (рис. 15,16). Приведены схема управления деполяризатором и ее параметры. Обсуждается существовавшая на начальном этапе экспериментов проблема сравнительно большой полосы частот, в которой происходила деполяризация. (Проблема была решена путем подавления 50 и 100 Гц пульсаций в системе питания части магнитных элементов кольца.) Представлены результаты измерений величины деполяризационного скачка в зависимости от времени, отведенного на процесс радиационной поляризации в ВЭПП-3, в сравнении с расчётом. Описан сценарий эксперимента по измерению массы J/ψ . Приведены данные по изучению долговременной стабильности энергии по показаниям РД. Расчетное увеличение поляризации позитронов с помощью соленоида в канале инжекции на энергии вблизи ψ' - пика подтверждено специальным экспериментом. Приведены результаты эксперимента по одновременной деполяризации электронного и позитронного пучков, важного для уточнения

систематической погрешности в измерении масс. Представлены итоговые результаты по массам J/ψ , ψ' , ψ'' , D^0 , D^\pm .

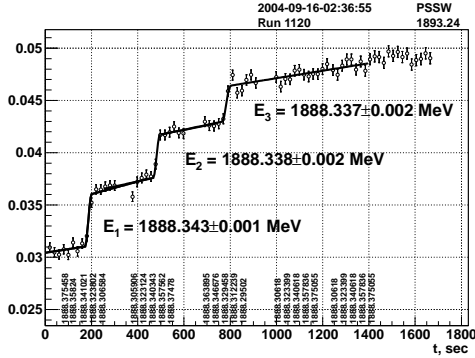


Рис. 15. 3-кратная последовательная РД калибровка энергии с применением техники частичной деполаризации на одном пучке в течение 15 минут с изменением направления сканирования после очередного скачка. Все три измеренных значения энергии лежат в интервале 6 кэВ ($3 \cdot 10^{-6}$), определяемом нестабильностью ведущего поля (система стабилизации поля по сигналу ЯМР выключена).

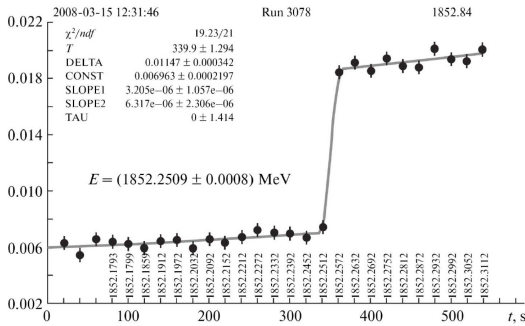


Рис. 16. Типичный процесс сканирования частоты деполаризатора с получением скачка в относительной скорости регистрации тушековских частиц из поляризованного и неполяризованного сгустков без выделения коррелированных событий (совпадений сигналов со счетчиков, расположенных в медианной плоскости симметрично относительно орбиты пучка) на энергии вблизи ψ' -пика. Точность определения "мгновенного" значения энергии примерно 1 кэВ.

Глава 8 посвящена эксперименту по измерению масс тау-лептона, выполненному на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР в 2006–2007 гг. Применение метода резонансной деполяризации на энергии эксперимента вблизи порога рождения тау (энергия пучка на "тау-пороге" 1.78 ГэВ) затруднено из-за близости целого спинового резонанса (1763 МэВ), который делает невозможным получение поляризованных пучков в бустере ВЭПП-3 непосредственно на данной энергии. Описаны два сценария эксперимента, один из которых, основанный на перепуске поляризованного пучка в ВЭПП-4М с энергией выше тау-порога на 80 МэВ с последующим понижением энергии к тау-порогу, был реализован. После понижения энергии может становиться заметным процесс неконтролируемой деполяризации пучка (рис. 17).

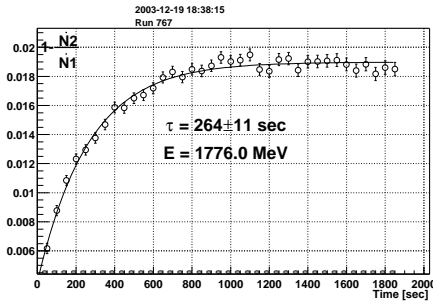


Рис. 17. Процесс деполяризации пучка на энергии вблизи тау-порога под влиянием неконтролируемых возмущений поля накопителя. Характерное время жизни поляризации τ_r равно удвоенному времени изменения относительной скорости счета тушековских частиц: $\tau_r = 2\tau$.

Приведены результаты численного моделирования и оценок влияния на время жизни поляризации (ВЖП) различных возмущений поля с использованием оригинального подхода. Представлены измерения ВЖП в зависимости от энергии (рис. 18), а также при введении коррекции резонансной спиновой гармонике в вертикальных искажениях орбиты. Мощность наблюдаемых спиновых резонансов "тонкой структуры" один из которых является модуляционным резонансом 3-го порядка с частотой синхротронных колебаний, а другой – комбинационным резонансом 2-го порядка по частотам бетатронных колебаний (влияние секступольной коррекции) сравнивается с теоретическими оценками. В результате изучения резонансов "тонкой структуры" автором предложено уменьшить напряжение ВЧ резонаторов на 100 кВ, что привело к сдвигу на 0.5 МэВ положения модуляционного резонанса с синхротронной частотой и к соответствующе-

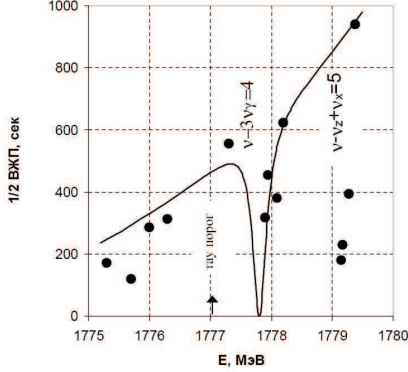


Рис. 18. Измеренное (точки) и расчётное (линия) с учетом синхротронной модуляции половинное время жизни поляризации в зависимости от энергии пучка вблизи тау-порога. Обозначены модуляционные спиновые резонансы 3-его порядка по синхротронной частоте (ν_γ) и второго порядка – по бетатронным частотам (ν_x, ν_z).

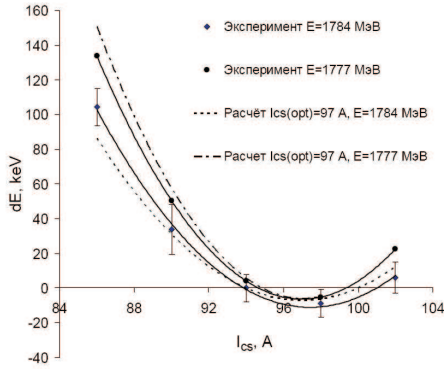


Рис. 19. Измеренные и расчётная систематическая погрешность в определении энергии по частоте спиновой прецессии при отклонении заданного тока в катушках компенсирующих соленоидов детектора КЕДР (I_{cs}) от номинального значения ($H_0 = 0.6$ Тесла).

му росту ВЖП в области энергии эксперимента. Для устранения влияния резонанса второго порядка по бетатронным частотам предложено поддерживать разницу этих частот $|\nu_z - \nu_x| > 0.035 \div 0.041$. Увеличение времени жизни поляризации с $\tau_r < 30$ минут до $\tau_r > 1$ час достигнуто глобальной коррекцией замкнутой орбиты. Это позволило начать эксперимент по

измерению массы тау, требующий по сценарию достаточно большое время задержки (> 2000 сек) перед прецизионной калибровкой энергии, необходимое для релаксации поля коллайдера после "снижения" на 80 МэВ к тау-порогу. Экспериментально и теоретически изучено влияние погрешности компенсации интеграла продольного магнитного поля детектора КЕДР на сдвиг спиновой частоты (рис. 19) и скорость деполяризации пучка. Изучена скорость релаксации энергии после торможения пучка к тау-порогу. Представлены данные (рис. 20) совместного применения в эксперименте на тау-пороге метода РД и нового метода мониторинга энергии – по краю спектра обратного комптоновского рассеяния (ОКР) и предварительные итоги измерения массы тау.

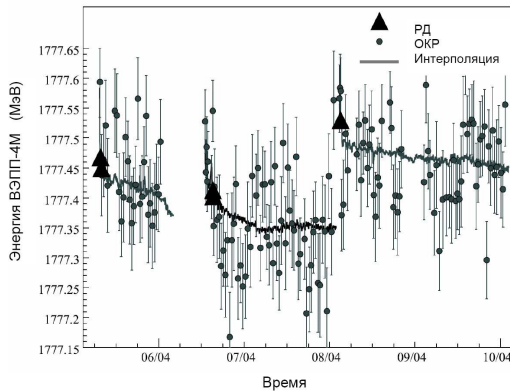


Рис. 20. Пример временной зависимости энергии пучка в эксперименте на тау-пороге. Апрель 2006г. Приписывание энергии заходам по набору статистики производилось на основе интерполяции (восстановления) энергии по данным калибровки энергии по РД, имеющим точность $\sim 10^{-6}$, ЯМР и термоконтроля. Треугольники, отвечающие калибровкам РД, для наглядности сильно увеличены.

В главе 9 обсуждается возможность повышения точности экспериментальной проверки СРТ теоремы путем сравнения спиновых частот электронов и позитронов в накопителе методом РД. Рассмотрены основные источники систематической ошибки, связанные с азимутальным распределением потерь, выбором энергии и размеров накопителя, токовой зависимостью спиновой частоты. Последняя оценивается в моделях полей изображения, когерентных потерь и азимутальной зависимости потенциала пучка. Обсуждается влияние уширения линии спиновой частоты, наклона оси ВЧ резонатора относительно пучка, а также роль эффектов встре-

чи. Представлены результаты методических экспериментов на ВЭПП-4М: сравнение спиновых частот двух электронных сгустков, разведение спиновых частот высокочастотным методом, "тонкое" сканирование с рекордным (лучше 10^{-8}) разрешением по частоте деполяризации (рис. 21). Описана созданная на ВЭПП-4М система стабилизации поля на уровне 10^{-6} с обратной связью по сигналу ЯМР датчика в калибровочном магните. Сделано предположение о возможной точности СРТ эксперимента на ВЭПП-4М.

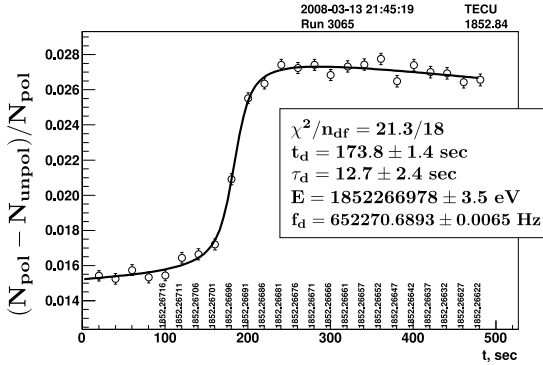


Рис. 21. Тонкое сканирование со скоростью 2.5 эВ/сек. Разрешение по частоте деполяризации составляет $2 \cdot 10^{-9}$.

В приложении 1 дан вывод выражения для функции спинового отклика магнитной структуры накопителя, обобщенной на область малых значений параметра спиновой частоты.

В приложении 2 получен вид функции распределения по импульсу в двумерной модели столкновений частиц в пучке.

В приложении 3 описан оригинальный метод вычисления спин-орбитальной связи, использованный для расчёта деполяризации пучка из-за квантовых флуктуаций в присутствии возмущений ведущего поля.

В заключении перечислены основные результаты работы:

- Достигнутая точность 10^{-6} абсолютной калибровки энергии пучка методом резонансной деполяризации во многом определила успешное проведение цикла измерения масс на комплексе ВЭПП-4 с детектором КЕДР. Важность итогового результата подчеркивается тем фактом, что уменьшение в 3-4 раза ошибки в значениях масс J/ψ и ψ' по

сравнению с мировыми данными позволяет разместить эти частицы вверху иерархической таблицы точности знания фундаментальных масс:

Частица	$\frac{\Delta m}{m}$, ppm
n	0.04
p	0.04
e	0.04
μ	0.09
π^\pm	2.5
J/ψ	3.5
ψ'	3.9
π^0	4.5

- Впервые применены поляриметры нового типа;
- Исследован процесс естественной деполяризации в накопителе при малых отстройках от мощного целого спинового резонанса с наблюдением слабых резонансов тонкой структуры;
- Приобретен уникальный опыт по достижению разрешения по частоте резонансной деполяризации лучше 10^{-8} ;
- На новом уровне изучены особенности наблюдения поляризации по тушековскому рассеянию, а также вопросы точности метода резонансной деполяризации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Анчугов О.В., Блинов В.Е., ..., Никитин С.А. и др. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. // ЖЭТФ, т. 136, вып. 4 (2009) 690-702.
2. S.A. Nikitin, E.L. Saldin, M.V. Yurkov. Calculation of the depolarizing effect of the field imperfections in electron positron storage rings. // Nucl. Instr. and Meth. A, 1983, v.216, N3, p.317-328.
3. S.A. Belomestnykh, A.E. Bondar, M.N. Egorychev, V.N. Zhilich, G.A. Korniyukhin, S.A. Nikitin, E.L. Saldin, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin. An observation of the spin dependence of synchrotron radiation intensity. // Nucl. Instr. And Meth. A, 227(1), (1983) 173-181.

4. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, N.Yu. Muchnoi, S.A. Nikitin, I.B. Nikolaev, A.G. Shamov, V.N. Zhilich. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider KEDR/VEPP-4M. // Nucl. Instr. and Meth., A598 (2009) 23.
5. О.В. Анчугов, В.Е. Блинов, ..., С.А. Никитин и др. Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4 с детектором КЕДР. // Приборы и техника эксперимента, 2010, №1, с. 1-14.
6. M.V. Dyug, A.V. Grigoriev, ..., S.A. Nikitin, et al. Möller polarimeter for VEPP-3 storage ring based on internal polarized gas jet target. // Nucl. Instr. and Meth. A, 536(3), (2005) 338-343.
7. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, ..., S.A. Nikitin, 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. A, 494(1-3), p.68-74, 2002.
8. V.M. Aulchenko, V.Balashov, ..., S. Nikitin, et al. New precision measurement of the J/psi and psi' meson masses. // Physics Letters, B573 (2003) 63-79.
9. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., S. Nikitin, et al. Results on J/psi, psi(2S),psi(3770) from KEDR. // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 181-182 (2008) 353.
10. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., S. Nikitin, et al. Measurement of D^0 and D^+ meson masses with the KEDR detector. // Physics Letters B, 686 (2010) 84-90.
11. В.Е. Блинов, А.В. Богомягков, ..., С.А. Никитин и др. Начало эксперимента по абсолютной калибровке энергии частиц на ВЭПП-4М вблизи порога рождения тау-лептона. // Атомная энергия, т.93, вып.6, 432-437 (2002).
12. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., S.A. Nikitin, et al. New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector. // Nucl. Phys. Proc. Suppl., 169 (2007) 125-131 (e-Print: hep-ex/0611046).
13. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., S.A. Nikitin, et al. Measurements of the tau lepton mass at KEDR detector. // Pis'ma v ZhETF, 85 (2007) 429-434.

14. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., S.A. Nikitin, et al. Tau mass measurement at KEDR. // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 181-182 (2008) 311.
15. V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, ..., S.A. Nikitin, et al. Tau mass measurement at KEDR. // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 189 (2009) 21-23.
16. V. Blinov, A. Bogomyagkov, G. Karpov, V. Kiselev, E. Levichev, S. Nikitin, I. Nikolaev, E. Shubin, G. Tumaikin. Study of the Possibility of Increasing the Accuracy of CPT Invariance Test at Electron-Positron Storage Rings. // ICFA Beam Dynamics Newsletter, No.48, April 2009, 207-217.
17. A.E. Bondar, M.N. Egorychev, ..., S.A. Nikitin, et al. Polarization measurement in storage rings of the Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk). - Proceedings of the 12th International Conference on High-Energy Accelerators. Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, 1983, p.179-182.
18. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, ..., S.A. Nikitin, I.B. Nikolaev. High-efficiency polarimeter based on intra-beam scattering. - Proceedings of EPAC 2002, p.1954-1956, 2002.
19. S.A. Nikitin, I.B. Nikolaev. Dependence of the Electron Beam Polarization Effect in the Intra-beam Scattering Rate on the Vertical Beam Emittance. - Proceedings of the EPAC'06, p.1184-1186
20. A.V. Bogomyagkov, S.A. Nikitin, A.G. Shamov. Influence of the vertical closed orbit distortions on accuracy of the energy calibration done by resonant depolarization technique. - Proc. of RUPAC 2006, p.153.
21. O. Anchugov, V. Blinov, ..., S. Nikitin, et al. Record-high Resolution Experiments on Comparison of Spin Precession Frequencies of Electron Bunches Using the Resonant Depolarization Technique in the Storage Ring. - Proc. of EPAC 2006, p.2787.
22. A.V. Bogomyagkov, S.A. Nikitin, V.I. Telnov, G.M. Tumaikin. Estimation of errors in definition of central mass energy in high precision experiments on colliding beams. - Proceedings of the 3rd Asian Particle Accelerator conference (APAC 2004), TUP-11002.
23. A. Bogomyagkov, S. Nikitin, I. Nikolaev, A. Shamov, A. Skrinsky, G.Tumaikin. Central Mass Energy Determination in High Precision Experiments on VEPP4-M/Proceedings of the 22nd PAC (PAC 2007).

24. A. Bogomyagkov, V. Kiselev, E. Kremyanskaya, E. Levichev, S. Nikitin, I. Nikolaev, E. Simonov, A. Skrinsky. Research of possibility to use beam polarization for absolute energy calibration in high-precision measurement of tau-lepton mass at VEPP-4M. - EPAC 2004 Proceedings, p.737-739.
25. A. Bogomyagkov, V.E. Blinov, ..., S. Nikitin, et al. Beam Energy Calibration in Experiment on Precise Tau Lepton Mass Measurement at VEPP-4M with KEDR Detector. - EPAC 2006 Proceedings, Edinburgh, Scotland, 2006, p.625-627.
26. S.A. Nikitin. Influence of errors in KEDR detector field compensation on the spin tune shift and the beam polarization lifetime in VEPP-4M collider at energy of tau lepton production threshold. - Proc. of RUPAC 2006, p.150-152.
27. N.Yu. Muchnoi, S.A. Nikitin, V.N. Zhilich. Fast and precise beam energy monitor based on the Compton Backscattering at the VEPP-4M collider. - EPAC 2006 Proceedings, Edinburgh, Scotland, 2006, p.1181-1183.
28. V.E. Blinov, A.V. Bogomyagkov, ..., S.A. Nikitin, et al. Development of resonance depolarization method at VEPP-4 for high precision measurement of tau lepton mass. PAC 2001 Proceedings (Chicago, Illinois, USA, 2001), vol.5 of 5, p.p.3317-3319.
29. С.А. Никитин, И.Б. Николаев. Расчет интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М. // Препринт ИЯФ 2010-42, 2010.
30. Д.Ю. Голубенко, С.А. Никитин. Эффект Тушека в приближении двумерных столкновений. // Препринт ИЯФ 99-110 (1999); D.Yu. Golubenko, S.A. Nikitin. Touschek effect in approximation of two dimensional collisions. - Proc. of the PAC 2001 (Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001), vol.4 of 5, p.2845-2847.
31. S.A. Nikitin, A.B. Temnykh. Study of intra-beam scattering effect at CESR and VEPP-4M storage rings at 1.8 GeV energy. // Preprint Budker INP 2004-56. Novosibirsk, 2004.
32. S.A. Nikitin. Quantum lower limit on scattering angle in the calculation of multiple Touschek-effect. // Preprint INP 2007-36.
33. С.А. Никитин, Е.Л. Салдин, М.В. Юрков. О возможности получения продольно поляризованных встречных пучков на накопителе ВЭПП-4 в области энергий ипсилон-резонансов. // Препринт ИЯФ СО АН СССР 81-116, 1981.

НИКИТИН Сергей Алексеевич

**Поляризованные пучки
в прецизионных экспериментах
на коллайдере ВЭПП-4М
с детектором КЕДР**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 28.09.2011 г.

Подписано в печать 29.09.2011 г.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 28

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринге «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.