

*На правах рукописи*

**БОГОМЯГКОВ Антон Викторович**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ  
В СИСТЕМЕ ЦЕНТРА МАСС  
В ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ  
НА ВЭПП-4М**

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

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

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

**НОВОСИБИРСК – 2007**

Работа выполнена в Институте ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН.

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:**

Тумайкин — доктор физико-математических наук,  
Герман Михайлович профессор, Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН,  
г. Новосибирск.

**ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:**

Эйдельман — доктор физико-математических наук,  
Юрий Исаакович Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН,  
г. Новосибирск.

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

ВЕДУЩАЯ — ГНЦ РФ "Институт физики высоких  
ОРГАНИЗАЦИЯ: энергий г. Протвино,  
Московская область.

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2007 г.  
в “\_\_\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01  
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ  
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В 2002 году в ИЯФ СО РАН на коллайдере ВЭПП-4М с детектором КЕДР были завершены эксперименты по высокоточному измерению масс  $J/\Psi$ - и  $\Psi'$ - мезонов. По сравнению с мировыми данными значения масс были измерены примерно в три раза точнее, и в десять раз точнее по сравнению с предыдущими измерениями на ВЭПП-4 с детектором ОЛЯ (новые значения масс:  $M_{J/\Psi} = 3096.917 \pm 0.010 \pm 0.007$  МэВ,  $M_{\Psi'} = 3686.111 \pm 0.025 \pm 0.009$  МэВ).

Первое прецизионное измерение масс  $J/\Psi$ - и  $\Psi(2S)$ - мезонов установило шкалу масс в области 3 ГэВ, что явилось основой для точного определения положения состояний чармония. В настоящее время значения масс  $J/\Psi$ - и  $\Psi(2S)$ - мезонов являются реперами на энергетической шкале, и используются для калибровки ускорителей и определения масс других частиц, например,  $\tau$  лептона как было сделано в эксперименте на Пекинском электрон-позитронном коллайдере. Дальнейшее уточнение значений масс мезонов позволяет проверить предсказания решеточных расчетов в КХД и кварковых потенциальных моделей.

Успешное проведение прецизионных экспериментов на встречных пучках требует знания средней энергии взаимодействия частиц в системе центра масс с высокой точностью. Для этого проводится абсолютная калибровка энергии пучка в ускорителе, затем по кинематическим соотношениям рассчитывается средняя энергия взаимодействия частиц в системе центра масс. В результате, точность определения энергии взаимодействия определяется ошибками абсолютной калибровки энергии и погрешностями расчета средней энергии взаимодействия.

Наиболее точным способом абсолютной калибровки энергии является метод резонансной деполяризации (МРД), основанный на одновременном измерении частоты прецессии спина и частоты обращения частиц в накопителе. Теоретическая возможность определения энергии частиц таким способом была осознана в конце 60-х годов. В середине 70-х и начале 80-х в ИЯФ СО АН СССР на накопителе ВЭПП-2М этот метод был впервые реализован и применен в эксперименте по прецизионному измерению масс  $\Phi$ -мезона и  $K^\pm$ -мезонов. Затем подобные эксперименты были

проведены на ускорителе ВЭПП-4 в отношении масс  $J/\Psi$ -,  $\Psi'$ -,  $\Upsilon$ -,  $\Upsilon'$ - и  $\Upsilon''$ -мезонов и в 1993 году была измерена масса  $Z$ -бозона на ускорителе LEP.

В экспериментах на ВЭПП-4М, проведенных с 2001 по 2005 год, достигнутая точность измерения энергии частиц составила  $\sim 10^{-6}$ , что почти на порядок точнее, чем в предыдущих экспериментах, и примерно в сто раз меньше по величине, чем энергетический разброс в пучке.

**Целью настоящей работы** являлось:

- изучение всех возможных ошибок и поправок в определении энергии в системе центра масс в прецизионных экспериментах на ВЭПП-4М, в том числе и неточностей связанных с применением метода резонансной деполяризации для абсолютной калибровки энергии пучка;
- изучение влияния различных элементов ускорителя на энергию пучка;
- определение требований на стабильность элементов и параметров ускорителя.

Также рассмотрены и решены задачи связанные с контролем, записью, анализом параметров ускорителя.

**Научная новизна**

1. Впервые наиболее полно рассмотрены ошибки и поправки определения энергии в системе центра масс в прецизионных экспериментах на ВЭПП-4М по определению масс  $J/\Psi$ -,  $\Psi'$ - мезонов, выполненных с точностью, примерно, в три раза более высокой, чем для средних мировых данных.
2. Уточнено влияние вертикальных искажений орбиты на точность определения энергии методом резонансной деполяризации.
3. Рассчитаны вклады в ошибку определения энергии в системе центра масс от следующих эффектов: хроматизм оптических функций в месте встречи, дисперсия разного знака для электронов и позитронов в месте встречи, зависимость сведения пучков в месте встречи от тока пучков.
4. Составлены требования на стабильность магнитов ВЭПП-4М.

## Практическая ценность проведенных исследований

1. Проведенные исследования позволили уменьшить систематические ошибки в экспериментах по измерению массы  $J/\Psi$ - и  $\Psi'$ - мезонов, выполненных примерно в три раза точнее, чем среднемировые данные, и в десять раз точнее по сравнению с предыдущими измерениями на ВЭПП-4 с детектором ОЛЯ.
2. Уточнение влияния вертикальных искажений орбиты на точность определения энергии методом резонансной деполяризации, а также и других факторов, позволили установить предел точности в 1.5 кэВ ( $\sim 10^{-6}$ ) на соответствие измеренной частоты деполяризации — значению энергии пучка.
3. Предложены и реализованы меры по уменьшению систематической ошибки определения энергии взаимодействия пучков в системе центра масс, связанной с хроматизмом оптических функций в месте встречи, дисперсии разного знака для электронов и позитронов в месте встречи и зависимости сведения пучков в месте встречи от токов пучков.
4. Приведенные таблицы требований на стабильность токов, магнитных полей и геометрического положения магнитных элементов ускорителя для обеспечения стабильности энергии на уровне  $10^{-6}$  позволяют выбрать модель интерполяции поведения энергии пучка в период времени между калибровками.
5. Приведенные таблицы поправок и ошибок абсолютной калибровки энергии МРД и определения средней энергии взаимодействия пучков в системе центра масс позволяют оценивать точность планируемых экспериментов на встречных пучках.
6. Написанное программное обеспечение позволяет наблюдать и анализировать состояние различных параметров коллайдера, измерять пульсации ведущего поля ускорителя, что важно для обеспечения высокой точности калибровки энергии пучков, управлять положением счетчиков поляриметра относительно пучка, что позволяет оптимизировать скорость счета рассеянных электронов и уменьшить статистическую ошибку калибровки энергии.

Результаты исследований являются важной частью выполненных экспериментов по измерению масс  $J/\Psi$ - и  $\Psi'$ - мезонов на коллайдере ВЭПП-

4М, могут быть использованы при планировании прецизионных экспериментов на встречных пучках в ИЯФ СО РАН, а также в других ускорительных центрах России и за рубежом на установках со встречными пучками.

### **Апробация диссертационной работы**

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Кроме того, результаты работ докладывались на Азиатской конференции по ускорителям заряженных частиц (Пекин, Китай, 2001), конференции по ускорителям заряженных частиц (Чикаго, США, 2001), VIII Международной конференции по ускорителям и системам управления большими физическими установками (Сан-Хосе, США, 2001), Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Париж, Франция, 2002), XVIII конференции по ускорителям заряженных частиц (Обнинск, Россия, 2002), IV Международном совещании по персональным компьютерам и системам контроля ускорителей частиц (Фраскати, Италия, 2002), совещании по системам управления ускорителями (Япония, 2003), III Азиатской конференции по ускорителям заряженных частиц (Генжу, Корея, 2004), Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Люцерн, Швейцария, 2004), конференции по ускорителям заряженных частиц (Кноксвил, США, 2005), XIX Международном совещании по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Россия, 2005), VII Европейском совещании по диагностике пучков в ускорителях заряженных частиц (Лион, Франция, 2005), Европейской конференции по физике высоких энергий (Лиссабон, Португалия, 2005), X Международной конференции по ускорителям и системам управления большими физическими установками (Женева, Швейцария, 2005), Европейской конференции по ускорителям заряженных частиц (Эдинбург, Шотландия, 2006), Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (Новосибирск, Россия, 2006).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано более 20 работ.

### **Структура работы**

Текст диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Текст содержит 127 страниц машинописного текста, включая 34 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 44 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована цель диссертационной работы — определение энергии пучков в системе центра масс в прецизионных экспериментах на ускорителе ВЭПП-4М. Дано краткое описание исследуемых вопросов и проведено сравнение с предыдущими экспериментами, где использовался метод резонансной деполяризации для абсолютной калибровки энергии пучков.

**В первой главе** приводится описание установок на которых были проведены эксперименты: в §1.1 коллайдера ВЭПП-4М и его магнитной структуры, в §1.2 универсального магнитного детектора КЕДР.

**Вторая глава** посвящена описанию метода резонансной деполяризации для определения средней энергии пучка.

В §2.1 кратко рассмотрена прецессия спина во внешних электромагнитных полях и сформулировано условие для резонансной деполяризации пучка.

В §2.2 приведено описание метода регистрации поляризации пучка с помощью эффекта внутрисгусткового рассеяния частиц. Суть этого эффекта состоит в том, что поперечные импульсы частиц пучка, совершающих поперечные бетатронные колебания вокруг замкнутой орбиты, при рассеянии друг на друге могут перейти в продольные. Если же новые продольные импульсы частиц не принадлежат продольному импульсному акцептансу, то частицы выбывают из пучка. Выражение для скорости счета рассеянных частиц зависит от степени поляризации пучка. Регистрация изменения скорости счета, в момент деполяризации, затруднена временными нестабильностями пучка, влияние которых примерно совпадает по величине с эффектом, составляющим по величине  $1 \div 2$  %. Поэтому, на ВЭПП-4М регистрируются рассеянные частицы от двух сгустков, отстоящих друг от друга на полпериода обращения, один из сгустков поляризованный, а другой нет. С помощью введенных в вакуумную камеру сцинтилляционных счетчиков измеряются скорости счета рассеянных электронов от поляризованного и неполяризованного сгустков соответственно, и вычисляется их отношение. В момент деполяризации происходит скачок в наблюдаемом отношении. Деполяризация осуществляется внешней ТЕМ волной, частота которой линейно изменяется в диапазоне, заведомо перекрывающем значение ожидаемой частоты прецессии спина. По моменту времени, в который произошел скачок в отношении скоростей счета, находится частота деполяризатора, знание которой, позволяет вычислить энергию пучка.

В §2.3 приведены формулы, позволяющие вычислить энергию пучка по измеренной частоте спиновой прецессии для идеального случая плоской орбиты. В этом случае частота прецессии спина и энергия определяются только интегралом ведущего поля ускорителя.

Реальные частицы совершают синхротронные колебания, испытывают флуктуации излучения, что приводит к возникновению бетатронных колебаний и, из-за наличия секступольного градиента, вызывает отличие среднего по пучку интеграла ведущего поля от соответствующего интеграла равновесной частицы. Наличие локальных вертикальных и горизонтальных искажений орбиты, сдвигает энергию частиц, из-за эффекта искажения орбиты, относительно энергии на орбите без искажений. Таким образом, средняя энергия пучка не совпадает с равновесной энергией, а равновесная энергия отличается от энергии на плоской орбите, что необходимо учитывать при проведении калибровки энергии в экспериментах.

Зависимость частоты прецессии спина и частоты обращения частицы от энергии приводит к зависимости средней частоты прецессии спина от коэффициента уплотнения орбиты и его хроматизма (не нулевой хроматизм приводит к нарушению симметрии распределения частиц по энергии и по частоте прецессии спина). Локальные искажения вертикальной орбиты могут приводить к сдвигу средней частоты прецессии спина относительно определяемой на плоской орбите, из-за влияния комбинаций вертикальных и горизонтальных полей. Нескомпенсированное продольное поле детектора приводит к аналогичному эффекту. Ошибки выставки магнитов по вертикали и вертикальные бетатронные колебания нарушают условие плоскостности орбиты, что вместе с выше перечисленными причинами, нарушает пропорциональность между средней частотой прецессии спина и средней энергией пучка.

Таким образом, измеренная средняя частота прецессии спина не пропорциональна ни средней энергии частиц, ни равновесной, следовательно, требуется вносить поправки, учитывающие эти эффекты.

Приведены расчеты эффектов влияющих на точность определения средней энергии пучка по измеренной частоте прецессии спина, а именно: влияния коэффициента уплотнения орбиты и его хроматизма, влияния вертикальных искажений орбиты и продольного поля детектора.

В §2.4 проанализированы факторы, влияющие на точность определения частоты прецессии спина, такие как ширина спинового распределения, боковые резонансы, влияние величины поля деполяризатора и точности измерения частоты обращения и частоты деполяризатора.

**В третьей главе** рассмотрена зависимость средней энергии от параметров накопительного кольца.

Время, потраченное на калибровку энергии, уменьшает время на набор статистики, поэтому существует стремление проводить калибровки как можно реже. При этом в период времени между калибровками меняются температуры магнитов, тоннеля ускорителя, температуры источников питания и так далее, что приводит к дрейфу орбиты, изменению магнитного поля в элементах ускорителя, изменению геометрии коллайдера и, в конечном итоге, энергии пучка. Поэтому необходимо изучение зависимости средней энергии пучка от параметров накопительного кольца. Это в свою очередь требует постоянного контроля, записи, анализа существенных параметров ускорителя. Режим работы ускорителя для калибровки энергии может отличаться от режима для набора статистики, например локальными искажениями орбиты, что может привести к ошибке в определении средней энергии взаимодействия. Дрейф орбиты в течении захода по набору статистики требуется корректировать, что тоже может изменить значение средней энергии, поэтому требуется изучение зависимости средней энергии пучка от отдельных элементов ускорителя.

В §3.1 приведен расчет влияния дрейфа частоты обращения на стабильность энергии ускорителя.

В §3.2 приведен расчет влияния отдельного корректора горизонтальной орбиты в первом порядке, среднеквадратичных искажений орбиты, локальных искажений орбиты с учетом второго порядка, приведены таблицы влияния различных элементов, и требования на стабильность горизонтального положения квадрупольных линз. Также приведено описание системы мониторинга параметров ускорителя.

В §3.3 показаны результаты экспериментальных исследований установления магнитного поля после магнитного цикла. Во время проведения прецизионных экспериментов энергия ускорителя поддерживается постоянной длительное время, но иногда по различным причинам происходит значительное изменение магнитного поля (сбой в системе питания, человеческий фактор, техническое обслуживание), после которого, из-за гистерезиса, необходимо проводить магнитные циклы, для восстановления величины магнитного поля в элементах ускорителя. По результатам измерений показано, что трех магнитных циклов достаточно, для того чтобы через 4-5 часа поле восстановилось с относительной точностью  $2 \cdot 10^{-6}$ , что учитывалось при проведении экспериментов.

**Четвертая глава** посвящена определению энергии в системе центра масс встречных пучков.

В экспериментах со встречными пучками необходимо знание средней энергии взаимодействия частиц в системе центра масс, которая зависит как от средних энергий пучков, так и от величин углового и энергетического разбросов. Для этой задачи калибровки энергии одного пучка недостаточно, необходимо знать энергию встречного пучка, распределения частиц в пучках по энергии, по пространственным координатам, чтобы на основе кинематических и статистических соображений вычислить средневзвешенную по светимости энергию в месте встречи.

Калибровку энергии на ВЭПП-4М проводят на электронных пучках, что связано с меньшим временем накопления электронов и особенностями перепуска поляризованного пучка в ВЭПП-4М. При этом предполагается, что средняя энергия позитронного пучка отличается слабо от средней энергии электронного из-за симметрии кольца ВЭПП-4М относительно диаметрально-противоположных мест встречи в экспериментальном и техническом промежутках. Однако для прецизионных экспериментов это предположение требует изучения. Энергии электронов и позитронов могут отличаться, например, из-за не одинаковых потерь энергии в полукольцах ВЭПП-4М (из-за ошибок выставки и изготовления магнитов, различающихся импедансов), из-за зависимости потерь от тока. В режиме эксперимента пучки разводятся по вертикали в трех паразитных местах встречи, что тоже может приводить к отличию энергий электронов и позитронов. Независимо от неравенства или равенства энергий позитронов и электронов, хроматизмы бета и дисперсионной функции будут нарушать пространственные распределения частиц с отклоненной энергией, что сдвинет среднюю энергию взаимодействия относительно кинематической суммы средних энергий пучков.

Методом резонансной деполяризации измеряется средняя энергия вдоль замкнутой орбиты. Для эксперимента же важно знание энергии пучка в месте встречи, которая может отличаться от измеренной. Для прецизионных экспериментов необходима оценка величины этого отличия энергий.

Таким образом, задача состоит в определении поправок и ошибок энергии в системе центра масс встречных пучков.

В §4.1 приведена формула расчета средней по импульсам инвариантной массы с учетом угловых и энергетических разбросов в пучках, а также разницы энергий электронного и позитронного пучков.

В §4.2 рассмотрена азимутальная зависимость энергии пучка как фактор, вызывающий отличие энергий электронов и позитронов. Источника-

ми зависимости энергии от азимута являются ошибки магнитных полей в поворотных магнитах, импеданс вакуумной камеры и коллективное поле пучка.

В §4.3 приведен анализ отличия энергий электронов и позитронов в режимах калибровки и светимости из-за: электростатического разведения пучков по вертикали в паразитных местах встречи, скульо-секступоля в месте разведения, наклона резонатора ускоряющего поля.

В §4.4 вычислена средняя по светимости энергия взаимодействия пучков с учетом хроматизма оптических функций и вертикальной дисперсии разного знака для электронов и позитронов. Небольшое разведение пучков в месте встречи при наличии дисперсии разного знака для электронов и позитронов приводит к пропорциональному смещению средней энергии взаимодействия. Источником паразитного разведения являются искажения орбиты разного знака для электронов и позитронов, вызванные влиянием встречного пучка во всех местах встречи. В процессе настройки ускорителя на максимум светимости, остаточное разведение определяется точностью измерения светимости. Если в начальный момент времени пучки встречались без разведения в месте встречи, то с уменьшением тока влияние встречного пучка изменяется, что приводит к зависимости сведения пучков в месте встречи от числа частиц в пучках. В результате требуется постоянная подстройка сведения пучков, для уменьшения ошибки из-за этого эффекта. Также, показано, что возможно уменьшить величину вертикальной дисперсии разного знака для электронов и позитронов в месте встречи, если разведение в трех паразитных местах встречи осуществляется в одном и том же направлении для частиц одного знака.

**В пятой главе** описано проведение экспериментов по прецизионному измерению масс на ВЭПП-4М.

В §5.1 и §5.2 приведены описания поляриметра и деполаризатора, системы измерения пульсаций ведущего поля.

В §5.3 и §5.4 описаны процессы получения поляризованных пучков на ВЭПП-4М и калибровки энергии в эксперименте.

В §5.5 описание сканирования кривой возбуждения  $J/\Psi$ - и  $\Psi'$ -мезонов.

В §5.6 приведены таблицы с численными значениями поправок и ошибок в калибровке энергии и в определении энергии взаимодействия в системе центра масс во время экспериментов по измерению масс  $J/\Psi$ - и  $\Psi'$ -мезонов.

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

1. Уточнены величины систематических ошибок и поправок в экспериментах по измерению масс  $J/\Psi$ - и  $\Psi'$ - мезонов. Проведенные исследования позволили определить массы этих частиц примерно в три раза точнее по сравнению с мировыми данными.
2. Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния различных факторов на точность определения МРД средней энергии, а именно:
  - (а) зависимости коэффициента уплотнения орбиты от энергии;
  - (б) вертикальных искажений орбиты;
  - (в) локальных вертикальных и горизонтальных искажений орбиты;
  - (д) продольного поля детектора;
  - (е) ширины распределения спиновых частот;
3. Рассчитаны вклады в ошибку определения энергии в системе центра масс от следующих эффектов: хроматизм оптических функций в месте встречи, дисперсия разного знака в месте встречи для электронов и позитронов, зависимость сведения пучков в месте встречи от тока пучков, азимутальная зависимость энергии пучка;
4. Сформулированы требования на стабильность магнитов ВЭПП-4М и проведено изучение зависимости энергии пучка от параметров ускорителя.

**В приложении** приведены громоздкие расчеты влияния вертикальных искажений орбиты, таблица коэффициентов эффективности корректоров, оценка влияния встречного пучка на разведение в месте встречи.

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

1. V. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "Polarization measurement system on the VEPP-4 collider at low energy range", proceedings of APAC 2001, Beijing, China, p.212-214.
2. V. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "Development of resonance depolarization method at VEPP-4 for high precision measurement of tau-lepton mass", proceedings of PAC 2001, Chicago, USA, p.3317-3319.

3. V. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "Linux-based toolkit on the vepp-4 control system", proceedings of 8th ICALEPCS, San Jose, USA, 2001, p.334.
4. V. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "High-efficiency polarimeter based on intra-beam scattering", proceedings of EPAC 2002, Paris, France, p.1954-1956.
5. A. Bogomyagkov et al., "Study of the energy stability in the VEPP-4M storage ring", proceedings of EPAC 2002, Paris, France, p.386-388.
6. V. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "New experiments with polarized beams at VEPP-4M", proceedings of EPAC 2002, Paris, France, p.422-424.
7. В. Блинов, А. Богомягков и др., "Начало эксперимента по абсолютной калибровке энергии частиц на ВЭПП-4М вблизи порога рождения тау-лептона", Атомная энергия, т.93, вып. 6 (2002), 432-437.
8. V.E. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M", NIM A 494 (2002) 81-85.
9. V.E. Blinov, A. Bogomyagkov et al., "Analysis of errors and estimation of accuracy in the experiment on precise mass measurement of J/psi, psi' mesons and tau lepton on the VEPP-4M collider", NIM A 494 (2002) 68-74.
10. V.M. Aulchenko, A. Bogomyagkov et al., "New precision measurement of the J/psi and psi-prime meson masses", Phys. Lett. B 573 (2003) 63-79.
11. A. Bogomyagkov et al., "Estimation of errors in definition of central mass energy in high precision experiments on colliding beams", proceedings of APAC 2004, Gyeongju, Korea, p.276-278.
12. A. Bogomyagkov et al., "Research of possibility to use beam polarization for absolute energy calibration in high-precision measurement of tau-lepton mass at VEPP-4M", proceedings of EPAC 2004, Luzern, Switzerland, p.737-739.
13. A. Bogomyagkov et al., "Precise Energy Measurements in Experiments on VEPP-4M Collider", proceedings of PAC05, Knoxville USA, p.1138-1140.

14. V. Anashin, A. Bogomyagkov et al., "Precision measurements of masses of charmonium states", proceedings of HEP 2005, p.115.
15. A. Bogomyagkov et al., "Automation of operations on the VEPP-4 Control System", proceedings of ICALEPCS 2005, Geneva, Switzerland, P01.072-7.
16. A. Bogomyagkov et al., "Beam Energy Calibration in Experiment on Precise Tau Lepton Mass Measurement at VEPP-4M with KEDR Detector", proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, p.625-627.
17. O. Anchugov, A. Bogomyagkov et al., "Record-high Resolution Experiments on Comparison of Spin Precession Frequencies of Electron Bunches Using the Resonant Depolarization Technique in the Storage Ring", proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, p.2787-2789.
18. 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", proceedings of RUPAC 2006, Novosibirsk, MOAP02, p.153-155.
19. A. Bogomyagkov et al., "Status of VEPP-4M collider: current activity and plans", ВАНТ, сер.: ядер. физ. исслед., 2006, N3(47), 6-8.
20. V. Anashin, A. Bogomyagkov et al., "New precise determination of the tau lepton mass at KEDR detector", proceedings of 9th International Workshop On Tau Lepton Physics (Tau 06), 2006, Pisa, Italy, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements 169, July 2007, p.125-131.
21. A. Bogomyagkov et al., "Central Mass Energy Determination in High Precision Experiments on VEPP4-M", proceedings of PAC 2007, Albuquerque, p.63.

*Богомяжков Антон Викторович*

**Определение энергии  
в системе центра масс  
в прецизионных экспериментах  
на ВЭПП-4М**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 22.10.2007 г.

Подписано к печати 23.10.2007 г.

Формат 100×90 1/16 Объем 0,7 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 28

---

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте "ИЯФ им. Г.И. Будкера" СО РАН

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