

М-294

*На правах рукописи*

*Мартыненко Алексей Петрович*

Релятивистская теория спектров и магнитных  
моментов водородоподобных атомов в квантовой  
электродинамике

*01.04.02 — теоретическая физика*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва-2003

*На правах рукописи*

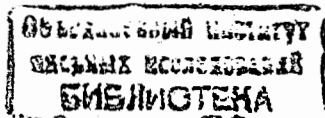
*Мартыненко Алексей Петрович*

Релятивистская теория спектров и магнитных  
моментов водородоподобных атомов в квантовой  
электродинамике

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва-2003



Работа выполнена на кафедре общей и теоретической физики Самарского государственного университета

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук, профессор

*Б.А.Арбузов (НИИЯФ МГУ)*

Доктор физико-математических наук

*А.Л.Катаев (ИЯИ РАН)*

Доктор физико-математических наук

*В.Г.Пальчиков*

*(ИМВП ГП ВНИИФТРИ)*

**Ведущая организация:**

Лаборатория теоретической физики имени Н.Н.Боголюбова

Объединенного института ядерных исследований (Дубна)

Защита состоится « *9* » *октября* 2003 г. в *15* час.  
на заседании Диссертационного совета Д002.119.01 Института ядерных  
исследований РАН (117312, Москва, просп. 60-летия Октября, д. 7а)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института ядерных  
исследований РАН

Автореферат разослан «*29*» *августа* 2003 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

*Б.А.Тулупов*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Исследование свойств связанных состояний представляет собой одну из центральных проблем в квантовой теории поля в настоящее время. Несмотря на то, что изучение релятивистских уровней энергии составных систем, электромагнитных свойств связанных состояний, их ширин распада продолжается уже более 50 лет эти проблемы не потеряли своей актуальности. Простейшие связанные состояния - водородоподобные атомы (атом водорода, позитроний  $e^+e^-$ , мюоний  $\mu^+e^-$ ) сыграли в свое время важную роль в возникновении и развитии квантовой механики и квантовой электродинамики. Можно без преувеличения сказать, что крупнейшие открытия в физике 20 века связаны с атомом водорода. Каждый шаг в развитии квантовой теории приводил к лучшему пониманию физики связанных систем, начиная от теории Н. Бора, квантовой механики В. Гейзенберга и Э. Шредингера, релятивистской теории Дирака и кончая квантовой электродинамикой Р. Фейнмана, Ю. Швингера, Ф. Дайсона, С. Томонаги и созданием стандартной модели С. Вайнбергом, А. Саламом, Ш. Глэшоу. Новое значение простейшие атомы приобрели после создания квантовой хромодинамики - теории сильного взаимодействия и открытия тяжелых кварков. Тяжелые адроны, содержащие  $b$  и  $c$  кварки, представляют собой связанные системы кварков с цветовым взаимодействием подобные простейшим атомным системам. С современной точки зрения атомные связанные состояния являются своеобразной лабораторией для исследования составных систем в квантовой теории поля. Так можно утверждать, что благодаря именно связанным состояниям квантовая электродинамика и квантовая хромодинамика развиваются в последние годы в тесном взаимодействии.

Другой важный фактор в развитии квантовополевой теории водородоподобных (в дальнейшем ВП) атомов связан с существенным прогрессом в экспериментальном исследовании уровней энергии электронного и мюонного водорода, позитрония, мюония. Так, в частности, сверхтонкое расщепление основного состояния атомов водорода и дейтерия, а также частота двухфотонного бездоплеровского перехода  $1S \div 2S$  в атомах водорода или дейтерия входят в число величин, измеряемых наиболее точно. За последние десять лет относительная погрешность в

измерении частоты перехода  $1S \div 2S$  в водороде была уменьшена на три порядка. Относительная погрешность измерения сверхтонкой структуры мюония была снижена в три раза. Успехи эксперимента делают актуальным и необходимым соответствующее развитие теории. В некоторых случаях теория и эксперимент соревнуются на равных ( $1S \div 2S$  переход в водороде). В других случаях успехи оказываются несопоставимыми и тогда ищутся новые системы для исследования. Так сверхтонкое расщепление в водороде и дейтерии может быть измерено на несколько порядков лучше, чем рассчитано (ввиду структуры протона). Сверхтонкое расщепление в мюонии измеряется не со столь высокой точностью, зато теоретические расчеты могут быть проведены более успешно и эксперимент в целом не уступает теории. Возникающее время от времени расхождение между теорией и экспериментом в дальнейшем удавалось преодолеть как в результате новых более точных экспериментальных исследований (так было с измерением ширины распада ортопозитрония), так и проведением новых теоретических расчетов (последний пример такой ситуации связан с расчетом адронного вклада рассеяния света на свете в аномальном магнитном моменте мюона). Необходимо отметить, что водородоподобные атомы важны также как инструмент для исследования других явлений. Приложениями являются уточнение значений фундаментальных физических констант (постоянная Ридберга, постоянная тонкой структуры, отношение масс электрона и мюона, зарядовый радиус протона и другие), используемых для создания эталонов единиц, прецизионная проверка квантовой электродинамики, поиски нарушений различных симметрий и проявления экзотических взаимодействий и частиц. Можно утверждать, что альтернативой созданию больших ускорителей для проникновения вглубь частиц и поиску новых взаимодействий является наблюдение тонких эффектов связанных состояний. Из них можно получить такие подробности поведения взаимодействия на малых расстояниях, которые удается обнаружить лишь при очень больших энергиях.

В отличие от теории рассеяния проблема связанных состояний всегда представляла собой более сложную задачу, поскольку она является не теоретико-возмущенческой с самого начала. В самом деле, энергия двухчастичного связанного состояния естественно определяется положением полюса в двухчастичной функции Грина, но ни индивидуаль-

ные диаграммы для нее, ни какая либо их конечная сумма такого полуса не содержат. Для решения задачи о связанном состоянии необходимо поэтому осуществлять суммирование бесконечной последовательности диаграмм. Последовательный подход к задаче релятивистского взаимодействия частиц, образующих связанную систему, который бы учитывал близкое действие и возможность рождения новых частиц, должен основываться на локальной квантовой теории поля. Во всяком случае до сих пор только на этом пути удалось добиться значительных успехов в вычислении спектра масс, магнитных моментов связанных состояний лептонов и кварков, ширин распада резонансов. Сама постановка задачи об определении состояния и уровней энергии двух частиц, взаимодействующих через квантованное поле, менялась по мере того как развивалась квантовая теория поля в целом. Так до появления и широкого использования инвариантной формулировки теории поля релятивистская проблема двух частиц исследовалась в рамках трехмерного подхода Фока-Тамма-Данкова. Важной особенностью трехмерного описания было сохранение вероятностной интерпретации волновой функции и возможность в простом виде сформулировать для нее граничные условия. В тоже время из-за нековариантности исходных уравнений перенормировка теории вызывала большие затруднения. В рамках четырехмерного формализма в теории поля для изучения двухчастичных систем было предложено полностью ковариантное уравнение Бете-Солпитера. В данном подходе перенормировка не встречает препятствий, так как в нем используется та же инвариантная теория возмущений, что и в формализме матрицы рассеяния. Кроме того уравнение Бете-Солпитера удобно при суммировании высокоэнергетических вкладов лестничных диаграмм. Однако это уравнение имеет один существенный недостаток: волновая функция Бете-Солпитера зависит от добавочной переменной - относительного времени (энергий связанных частиц) и не допускает обычного вероятностного толкования в духе квантовой механики. С ним связано появление лишних (нефизических) решений уравнения Бете-Солпитера, которые возникают например, в точно решаемой модели Вика-Кутковского. Для преодоления этой трудности А.А. Логунов и А.Н. Тавхелидзе предложили квазипотенциальный подход к релятивистской проблеме двух тел. В их подходе волновая функция системы зависит от одной временной переменной, в силу чего она имеет ясный физичес-

кий смысл и обычную квантовомеханическую вероятностную трактовку. Квазипотенциальный подход в квантовой теории поля был задуман как прямое обобщение потенциальной теории двухчастичного взаимодействия на релятивистский случай. Этот метод будучи трехмерным и допуская вероятностную интерпретацию волновой функции, обладает в тоже время главными преимуществами (перенормируемость, аналитичность) полностью ковариантного метода. Этот метод не противоречит и релятивистской инвариантности, так как система центра инерции определяется импульсами рассматриваемых частиц. В тоже время трехмерный подход оставляет большой произвол в формулировке проблемы связанных состояний. Многообразие трехмерных квазипотенциальных уравнений обусловлено как различными выборами переменной, по которой можно выйти за массовую или энергетическую оболочку, так и неоднозначностью экстраполяции амплитуды рассеяния вне массовой (энергетической) оболочки. Различные варианты квазипотенциальных уравнений были предложены Р.Н. Фаустовым, В.Г. Кадышевским, В.А. Матвеевым, П.Н. Боголюбовым, Ж.П. Лепажем, Д.Р. Йенни, Г. Гротчем, В.И. Савриным, О.А. Хрустальевым, Ф. Гроссом, И.Т. Тодоровым и другими.

Следует также отметить, что исследования связанных состояний в квантовой теории поля привели к созданию и совершенствованию компьютерных методов расчета фейнмановских диаграмм. Расчет поправок высокого порядка по теории возмущений в спектрах энергии связанных состояний, необходимый для прецизионного сравнения с экспериментом, связан с построением оператора взаимодействия частиц, который определяется многопетлевыми фейнмановскими амплитудами. Рост числа петель с одной стороны и увеличение количества диаграмм с другой привели к разработке систем аналитических вычислений Form, Reduce, Mathematica для расчета фейнмановских амплитуд, а также различных прикладных пакетов для них, предназначенных для решения конкретных задач. Следует отметить, что энергетические спектры простейших атомов, гиромангнитные факторы связанных частиц представляются в виде разложения в ряд по нескольким малым параметрам. Параметр  $\alpha$  соответствует количеству квантовоэлектродинамических петель, параметр  $Z\alpha$  описывает порядок релятивистских поправок и эффектов связанности. Отношение масс легкой и тяжелой частицы в

связанном состоянии определяет эффекты отдачи. Коэффициенты упомянутых разложений могут содержать также логарифмы перечисленных малых параметров.

Существенным элементом физики электромагнитных двухчастичных связанных состояний является возможность исследования вкладов сильных и слабых взаимодействий. Так, например, сравнение экспериментальных данных по лэмбовскому сдвигу в атоме водорода с расчетами в квантовой электродинамике позволяет нам получить более точную информацию о структуре протона. Необходимость более точных расчетов вклада адронной поляризации вакуума (в дальнейшем АПВ) прежде всего в сверхтонкую структуру и лэмбовский сдвиг ВП атомов, которая связана с сечением аннигиляции  $e^+e^-$  в адроны, стимулирует проведение более точных экспериментальных измерений этого сечения для различных интервалов энергии. В данной работе рассматриваются различные водородоподобные системы (атом водорода, мюонный водород, мюоний, позитроний, пионий). Некоторая часть результатов получена для водородоподобных ионов с произвольным спином ядра.

Актуальность темы диссертации определяется ее ориентацией на конкретные задачи описания спектров энергии атома водорода, мюонного водорода, мюония, позитрония и пиония, а также гиромангнитных факторов водородоподобных ионов, решение которых необходимо для успешного сравнения теории и эксперимента. В качестве наиболее актуальных результатов выделим вычисление эффектов сильного взаимодействия (поляризуемости протона и адронной поляризации вакуума) в сверхтонкой структуре мюония, электронного и мюонного водорода, а также в лэмбовском сдвиге мюонного водорода. С этими вкладами связана в настоящее время главная теоретическая неопределенность. В случае мюонного водорода вычисленные вклады имеют принципиальное значение для правильного определения зарядового радиуса протона из эксперимента по лэмбовскому сдвигу, который осуществляется в настоящее время. Вычисление пертурбативных поправок высокого порядка к тонкой структуре мюония позволило осуществить более точное сравнение теории и эксперимента для интервалов большой тонкой структуры. Использование релятивистского квазипотенциального подхода позволило правильно учесть все релятивистские эффекты второго порядка в ширине распада позитрония, исследовать эффекты связан-

ности частиц при расчете гироманнитных факторов электрона и ядра в ВП системе.

### **Цель диссертационной работы.**

Основная цель диссертационной работы состоит в формулировке новых подходов к исследованию релятивистских и радиационных эффектов, эффектов адронной поляризации вакуума и поляризуемости протона в спектрах энергии и магнитных моментах ВП атомов в квантовой электродинамике, в решении наиболее актуальных задач для проверки квантовой электродинамики и теории связанных состояний.

### **Научная новизна.**

Научная новизна также связана с исследованием таких эффектов в спектрах энергии ВП атомов, роль которых стала в последние годы определяющей. Основные результаты диссертации являются оригинальными и получены впервые.

В рамках квазипотенциального метода в квантовой теории поля получено релятивистское квазипотенциальное уравнение, которое имеет точные решения для кулоновского потенциала и дает возможность правильно учитывать релятивистские эффекты в спектрах энергии простейших атомов. Вычисление ширины распада позитрония с высокой точностью явилось стимулом для обсуждения реальных экспериментов. При этом была предложена новая эффективная формфакторная модель, позволяющая правильно учитывать эффекты связности в распаде атома позитрония. Нами был предложен способ более точного расчета эффектов поляризуемости ядра, основанный на экспериментальных данных по структурным функциям глубокоэластичного лептон - нуклонного рассеяния. Вычисление вкладов адронной поляризации вакуума и поляризуемости протона в лэмбовском сдвиге мюонного водорода позволило получить новое, более точное теоретическое значение  $2P - 2S$  сдвига, необходимое для успешного проведения соответствующего эксперимента в мюонном водороде. Получение аналитических результатов по тонкой структуре ВП атомов привело к формулировке нового способа расчета спектров энергии - размерной регуляризации в координатном пространстве, который позволяет правильно провести усреднение степенных и логарифмических потенциалов, обладающих высокой степенью сингу-

лярности. Впервые проведен последовательный расчет вклада поляризуемости протона в сверхтонкой структуре атома водорода и мюонного водорода, основанный как на экспериментальных данных по поляризационным структурным функциям протона, так и теоретических расчетах сечений фотопоглощения барионных резонансов и поляризационных кварковых распределений. Получены новые аналитические выражения для вкладов поляризуемости протона в случае мюонного водорода, в которых точно учитывается зависимость от массы мюона. Мы предложили также альтернативный способ расчета вкладов отдельных резонансов в поправку на поляризуемость протона в СТС водорода, основанный на использовании формфакторов перехода нуклона в нуклонный резонанс, и вычислили вклад  $\Delta$  изобары. Новый расчет эффектов адронной поляризации вакуума с точностью до сотых долей КГц в сверхтонкой структуре мюония был необходим для успешного сравнения с экспериментом, а также для более точного определения из него отношения масс лептонов. Формулировка нами квазипотенциального метода расчета гироманнитных факторов связанных частиц произвольного спина и вычисление новых спин-зависящих поправок в  $g$ -факторах частиц ВП атома активизирует экспериментальные исследования ВП ионов с ядрами, обладающими высоким значением спина.

### **Научная и практическая значимость.**

В диссертационной работе развита теория вычисления релятивистских и радиационных поправок, а также поправок сильного взаимодействия к уровням энергии водородоподобных атомов и гироманнитным факторам связанных частиц, решены крупные научные проблемы, имеющие важное значение для проверки Стандартной модели, для определения значений фундаментальных физических констант. Исследования были направлены на нахождение различных вкладов в лэмбовский сдвиг атомов электронного и мюонного водорода, тонкую и сверхтонкую структуру спектров мюония, позитрония, мюонного и электронного водорода. Мы также рассмотрели ряд вопросов связанных с распадом атомов позитрония и пиония.

Исследования по тонкой и сверхтонкой структуре спектра энергии атома водорода, мюония и позитрония имели своей целью с одной стороны опробовать предложенное квазипотенциальное уравнение для рас-



чета уровней энергии, а с другой - выполнить вычисление вкладов порядка  $(Z\alpha)^6$ ,  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  приобретающих важное значение для проверки предсказаний квантовой электродинамики в связи с ростом экспериментальной точности измерения уровней энергии водородоподобных атомов. Проведенные расчеты для сверхтонкой структуры мюония находятся в согласии с вычислениями, выполненными разными авторами в рамках других подходов. Диаграммный способ построения квазипотенциала простейших атомов, который использовался в наших работах, привел к вычислению поправок данного порядка для триплетных уровней энергии мюония и атома водорода. Полученные результаты дополняют расчеты других авторов эффектов отдачи порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  в лэмбовском сдвиге ВП атомов. С эффектами порядка  $(Z\alpha)^7$  в спектре позитрония связана в настоящее время главная неопределенность теоретического результата для интервалов тонкой структуры спектра. Были найдены однопетлевые поправки данного порядка для S- и P- уровней, численное значение которых пока находится в пределах экспериментальной ошибки. Исследования вклада слабых взаимодействий в спектр энергии двухчастичного связанного состояния имели своей целью выполнить построение квазипотенциала при произвольных энергиях связи. Необходимость такого построения была вызвана поиском узких резонансов в электрон-позитронной системе. В случае ВП атомов построенный оператор взаимодействия давал вклад в сверхтонкую структуру и лэмбовский сдвиг, совпадающий с расчетами других групп.

Работы по исследованию эффектов поляризуемости ядра в лэмбовском сдвиге и сверхтонкой структуре ВП атомов имели мотивировку тесно связанную с экспериментом. Расширение области экспериментального изучения спектров энергии ВП атомов, включение в исследования новых простейших атомных систем способно привести к существенному прогрессу как в изучении самих уровней энергии, так и в определении фундаментальных физических констант. Так, на порядок более точное определение зарядового радиуса протона можно достичь при постановке эксперимента по измерению 2P-2S лэмбовского сдвига в атоме мюонного водорода. Существенную помощь в проведение такого эксперимента с необходимой точностью может оказать новый теоретический анализ всех возможных вкладов в лэмбовский сдвиг порядка

10 мкэВ. Был проведен независимый расчет эффектов, связанных со структурой ядра, порядка  $(Z\alpha)^5$  в лэмбовском сдвиге мюонного водорода на основе квазипотенциального метода, приведший к численным результатам согласующимся с вычислениями других авторов. Вычисленный на основе современных экспериментальных данных по структурным функциям глубокоэупругого лептон - нуклонного рассеяния вклад поляризуемости протона в лэмбовский сдвиг мюонного водорода порядка  $(Z\alpha)^5$ , а также поправки порядка  $\alpha(Z\alpha)^5$ , равен 16 мкэВ и имеет поэтому важное значение для проводимого эксперимента. Работы, направленные на исследование вклада поляризуемости протона в лэмбовском сдвиге атома мюонного водорода цитируются как теоретиками, так и экспериментаторами. Предложенный метод расчета использовался также в другой задаче, связанной с измерением водород-дейтронного изотопического смещения в атоме водорода. Был получен вклад внутренней поляризуемости ядра в изотопическом сдвиге, численное значение которого находится в пределах экспериментальной ошибки и имеет значение для будущих экспериментов. Исследования вклада поляризуемости протона в сверхтонкую структуру атома водорода представляют особый интерес, так как уже более 30 лет теоретическая погрешность, связанная с этим вкладом, является определяющей. После того как во второй половине 90-х годов были выполнены эксперименты в CERN, SLAC, DESY по поляризованному глубокоэупругому рассеянию лептонов на нуклонах, появилась необходимость проведения расчетов этого вклада в СТС водорода. Впервые были выполнены детальные вычисления вклада поляризуемости протона как для электронного, так и для мюонного водорода, которые привели к уменьшению расхождения теории и эксперимента.

Мы также провели исследования другого эффекта сильного взаимодействия - адронной поляризации вакуума в спектрах энергии ВП атомов. Мотивом для этих работ явилось с одной стороны уже упоминавшееся выше предложение по измерению лэмбовского сдвига в мюонном водороде. Вычисленные вклады порядка  $m\alpha(Z\alpha)^4$ ,  $m\alpha(Z\alpha)^5$ ,  $m\alpha^2(Z\alpha)^4$  составляют в сумме величину 10.8 мкэВ, и как обосновано ранее, имеют важное значение с учетом заявленной точности проведения эксперимента. Наши расчеты вклада порядка  $m\alpha(Z\alpha)^4$  согласуются с независимыми вычислениями, проведенными сразу несколькими авторами. Другим

стимулом для этих работ явилась попытка получить более точные данные о поправках, связанных со структурой протона и его поляризуемостью в случае атома водорода, используя экспериментальные данные по сверхтонкому расщеплению основного состояния атома мюонного водорода. Был найден вклад поляризуемости протона в СТС мюонного водорода, который не учитывался другими авторами. Вычисление вклада АПВ в СТС мюония с точностью несколько Гц было продиктовано с одной стороны появлением новых экспериментальных данных с детекторов КМД-2 и СНД (Новосибирск), а с другой измерением СТС мюония с точностью до сотых долей КГц. Работы, направленные на исследование вклада АПВ в спектрах энергии простейших атомов, цитируются как теоретиками, так и экспериментаторами и использованы при так называемом согласовании значений фундаментальных физических констант - процедуре, проводимой рабочей группой по фундаментальным постоянным при Комитете данных для науки и техники (CODATA) Международного совета научных организаций (ICSU) для совокупной обработки всех прецизионных данных<sup>1</sup>. Работы по АПВ нашли новое применение при исследовании экзотической атомной системы - пиония. Пионий уже наблюдался на эксперименте, и несколько групп продолжают его исследование с целью измерения пионных длин рассеяния, через которые выражается амплитуда распада пиония. Имеется некоторое количество работ по вычислению радиационных поправок к ширине его распада, и выше найден один из вкладов, не рассмотренных ранее.

Исследования ширины распада позитрония имели в последние годы особое значение в связи с наблюдавшимся расхождением теории и эксперимента по ширине распада ортопозитрония. Были вычислены релятивистские  $\alpha^2$  поправки в рамках предложенной формфакторной петлевой модели распада ортопозитрония. Было обнаружено, что ряд релятивистских поправок данного порядка не учитывался в расчетах, выполненных другими авторами. Полученный вклад порядка  $\alpha^2$  приводит к хорошему согласию с новыми экспериментальными данными. Данные исследования получили продолжение в расчете собственно энергетических вкладов указанного порядка в ширинах распада орто- и парапозитрония, выполненных в калибровке Фрида - Йенни, а также

<sup>1</sup>P.J.Mohr, B.N.Taylor CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998, *Reviews of Modern Physics* 72 (2000) 351-495; <http://physics.nist.gov/constants>.

процессах рождения позитрония в результате распада легких мезонов. С одной стороны стимулом для последней работы стала возросшая экспериментальная точность измерения вероятности распада нейтрального пиона с образованием атома позитрония. С другой - наличие ряда неизвестных поправок порядка  $O(\alpha)$  и релятивистских вкладов порядка  $O(\alpha^2)$  в указанной вероятности. Вычисленные поправки представляют интерес для более точных экспериментов по измерению вероятности рождения позитрония. Работы по ширине распада ортопозитрония также цитируются как теоретиками, так и экспериментаторами.

Исследования по гиромангнитным факторам свободных и связанных частиц в стандартной модели приобрели в последние годы особый статус. Он обусловлен с одной стороны расширением области исследований водородоподобных атомов и ионов, когда все новые системы включаются в экспериментальные работы. С другой - ростом экспериментальной точности измерения g- факторов частиц. Так новое измерение g- фактора мюона в Брукхейвенской национальной лаборатории инициировало серию теоретических работ, направленных на проверку Стандартной модели. Эксперименты с дейтерием, водородоподобными ионами, ядра которых имеют различные спины, вызывают необходимость формулировки методов расчета g- факторов в этом случае. В диссертации получены дополнительные  $O(\alpha^2)$  поправки в g- факторы связанных частиц для ядер произвольного спина, которые могут быть проверены на эксперименте уже в ближайшее время. Результаты работ, которые также цитируются другими авторами, согласуются с независимыми вычислениями гиромангнитных факторов для частиц спина 1/2.

#### Апробация диссертации.

Содержание различных разделов диссертации докладывалось на сессиях ОЯФ АН СССР, РФ в 1983-2002 годах, Международной конференции по физике высоких энергии и квантовой теории поля НИИЯФ МГУ (QFTHEP) в 1985, 1997-2001 годах, на XIV-XVIII Международных семинарах по проблемам физики высоких энергий и теории поля в ИФВЭ (Протвино), на Всероссийских конференциях "Университеты России - Фундаментальные исследования" в 2001-2002 годах (МИФИ), на Международной конференции "Адронные атомы и позитроний в стандартной модели" в г. Дубна в 1998 году, на Международной конференции

"Квантовая электродинамика и физика вакуума" в г. Триест (Италия) в 2000 году, на международной конференции "Физика простых атомных систем" в г. Санкт - Петербург в 2002 году, на научных семинарах и конференциях Самарского государственного университета. Исследования по теме диссертации проводились в рамках государственной научно-технической программы "Физика высоких энергий", были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (грант 93-02-3545, грант 96-02-17309, грант 98-02-16185, грант 00-02-17771) в 1993-2001 годах, Минобразования РФ (грант 94-6.7-2015, грант ЕОО-3.3-45) в 1994-1996 годах, 2001-2002 годах, федеральной программой "Университеты России - Фундаментальные исследования" (грант 2759, грант 990192, 01.02.016) в 1998-2003 годах.

#### Публикации.

Диссертационная работа основана на исследованиях, проведенных в 1982 - 2002 годах, а ее основные результаты опубликованы в работах [1]-[47], в том числе: статьи в реферируемых журналах - 33, сборники трудов Всероссийских научных конференций - 3, сборники трудов международных конференций - 11. Личный вклад диссертанта в работы, выполненные в соавторстве, является определяющим.

#### Структура о объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав основного текста, содержащих 33 раздела, заключения и четырех приложений. Полный объем диссертации - 221 стр., рисунков - 58, таблиц - 21, список литературы включает 360 ссылок.

### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа посвящена развитию теории релятивистских спектров энергии и магнитных моментов водородоподобных атомов в квантовой электродинамике. Значительное место в диссертации отводится эффектам сильного взаимодействия (адронная поляризация вакуума, поляризуемость протона) в спектрах энергии простейших атомов,

а также исследованию релятивистских эффектов в тонкой, сверхтонкой структуре ВП атомов и в ширинах распада позитрония.

Во введении дается краткий обзор современного состояния в области физики простейших атомных систем, содержится обоснование актуальности, целей и задач диссертации и проводится краткое изложение ее содержания, определен круг основных вопросов, рассматриваемых в диссертации. Здесь приведены также основные положения диссертации выносимые на защиту.

Глава 1 "Квазипотенциальный метод в квантовой теории поля" посвящена формулировке метода расчета релятивистских спектров энергии водородоподобных атомов в квантовой теории поля. В разделе 1.1 получено квазипотенциальное уравнение Шредингера типа для описания двухчастичных связанных состояний:

$$\left(\frac{b^2}{2\mu_R} - \frac{\vec{p}^2}{2\mu_R}\right)\psi_M = \int \frac{d\vec{q}}{(2\pi)^3} V(\vec{p}, \vec{q}, M)\psi_M(\vec{q}), \quad (1)$$

где  $b^2(M)$  - квадрат относительного импульса частиц на энергетической поверхности  $M = \epsilon_1 + \epsilon_2$ :

$$b^2(M) = \frac{[M^2 - (m_1 + m_2)^2][M^2 - (m_1 - m_2)^2]}{4M^2}. \quad (2)$$

Новое определение релятивистской приведенной массы двух частиц

$$\mu_R = \frac{E_1 E_2}{M} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} = \frac{M^4 - (m_1^2 - m_2^2)^2}{4M^3} \quad (3)$$

согласовано с релятивистским выражением для координаты центра масс системы двух частиц. Выведено условие нормировки квазипотенциальной волновой функции. В случае локального квазипотенциала уравнение (1) эквивалентно локальному уравнению Шредингера и имеет точное решение для кулоновского взаимодействия. В разделе 1.2 обсуждаются различные определения релятивистской приведенной массы двух частиц, проводится их сравнительный анализ. В разделе 1.3 построен квазипотенциал связанного состояния двух спинорных частиц и получена формула тонкой структуры спектра атома водорода и позитрония с точностью  $O(\alpha^4)$  на основе предложенного квазипотенциального уравнения. В разделе 1.4 исследуется электромагнитное взаимодействие

двух скалярных частиц, построен оператор взаимодействия и вычислен спектр энергии с точностью  $O(\alpha^4)$  в рамках квазипотенциального уравнения (1). В разделе 1.5 проведен расчет поправок порядка  $(Z\alpha)^6$ ,  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  в сверхтонкой структуре основного состояния мюония.

В главе 2 "Тонкая структура спектра мюония и позитрония" исследуются эффекты электромагнитного и слабого взаимодействия в спектрах энергии атомов мюония, водорода, позитрония. Значительное увеличение экспериментальной точности достигнуто при измерении интервала  $1S \div 2S$  в мюонии на основе бездоплеровской двухфотонной спектроскопии <sup>2</sup>:

$$\Delta\nu_{\text{Mu}}^{\text{exp}}(2^3S_1 \div 1^3S_1) = 2\,455\,528\,941.0(9.8) \text{ МГц}, \quad \delta = 0.4 \times 10^{-8}. \quad (4)$$

Одним же из самых точных экспериментов в спектроскопии простейших атомных систем является измерение частоты  $1S \div 2S$  перехода в атоме водорода <sup>3</sup>:

$$\Delta\nu_{\text{H}}^{\text{exp}}(2S \div 1S) = 2\,466\,061\,413\,187.34(84) \text{ КГц}, \quad \delta = 3.4 \times 10^{-13}. \quad (5)$$

В разделе 2.1 построен квазипотенциал однофотонного и двухфотонного взаимодействия с помощью разложения подынтегральной функции в ряд Тейлора, который приводит к поправкам порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  в спектре энергии. В разделе 2.2 сформулирован способ расчета возникающих матричных элементов квазипотенциала в d- мерном координатном представлении. Выведены рекуррентные соотношения для матричных элементов степенных и логарифмических потенциалов в d- мерном пространстве, которые позволяют правильно учитывать коэффициенты в расходящихся членах. В случае S- состояний рекуррентное соотношение для матричных элементов степенных потенциалов имеет вид:

$$\left\langle \frac{1}{r^{\nu+3}} \right\rangle = - \frac{8E_n \nu}{(\nu+1)[\nu(\nu+2) - (d-1)(d-3)]} \left\langle \frac{1}{r^{\nu+1}} \right\rangle - \frac{4a(2\nu+1)}{(\nu+1)[\nu(\nu+2) - (d-1)(d-3)]} \left\langle \frac{1}{r^{\nu+2}} \right\rangle, \quad (6)$$

<sup>2</sup>V. Meyer, S.N. Bagaev, P.E.G. Baird et al. Measurement of the 1S-2S energy interval in muonium, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 1136-1140.

<sup>3</sup>Th. Udem, A.Huber, B.Gross et al. Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain, Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 2646-2649

где  $E_n = -\frac{a^2}{2(n+(d-3)/2)^2}$  - кулоновские уровни энергии,  $a = \mu Z\alpha$ . В разделе 2.3 проведен расчет поправок на отдачу порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  во втором порядке теории возмущений. При этом используется выражение для редуцированной кулоновской функции Грина, полученное с помощью представления Хостлера для кулоновской функции Грина. В разделе 2.4 с помощью тейлоровского разложения подынтегральной функции по степеням отношения масс легкой и тяжелой частиц  $m_1/m_2$  в трехфотонных обменных диаграммах построен квазипотенциал, приводящий к вкладам порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  в тонкой структуре ВП атома. При этом использовалось следующее разложение пропагатора мюона:

$$\frac{1}{D_\mu(p)} \approx \frac{1}{2m_2(p_0 + i\epsilon)} + \frac{(\vec{p}^2 + W^2)}{4m_2^2(p_0 + i\epsilon)^2}, \quad W^2 = -b^2, \quad (7)$$

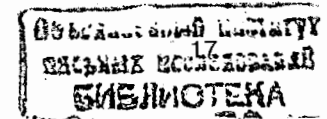
где первое слагаемое в правой части означает, что мы пренебрегаем кинетической энергией мюона в промежуточном состоянии. В разделе 2.5 вычислены однопетлевые поправки порядка  $(Z\alpha)^7$  к S- уровням атома водорода, мюония и позитрония на основе тейлоровского разложения соответствующих амплитуд. Получен полный аналитический вклад порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$  для  $^3S_1$  состояний мюония и атома водорода при произвольном значении главного квантового числа n:

$$\Delta B_n^{\text{tot}} = \left[ \frac{5}{2} \ln 2 - \frac{151}{36} - \frac{3}{n} + \frac{1}{2n^2} + \frac{547}{72n^3} - \frac{7}{2}(-1)^n(C + \Psi(n) - 1) \right] \frac{m_1^2(Z\alpha)^6}{m_2 n^3}, \quad (8)$$

где  $\psi(z) = d \ln \Gamma(z)/dz$ ,  $C=0.5772156649 \dots$  - константа Эйлера. Численное значение вклада (8) в интервал тонкой структуры мюония  $2^3S_1 \div 1^3S_1$  составляет 0.045 МГц, а для атома водорода 5.116 КГц. В случае мюония численное значение полученной поправки лежит в пределах экспериментальной ошибки, а для атома водорода является наблюдаемой величиной. В разделе 2.6 вычислен вклад однопетлевых диаграмм аннигиляционного типа порядка  $(Z\alpha)^7$  в тонкую структуру P- уровней позитрония, который имеет вид:

$$B_{J=0} = m\alpha^7 \frac{(n^2-1)}{8\pi n^5} \left( \frac{8}{9} \ln 2 + \frac{1}{9} \ln \alpha + \frac{5}{18} - \frac{i\pi}{2} \right), \quad (9)$$

$$B_{J=1} = m\alpha^7 \frac{(n^2-1)}{8\pi n^5} \left( \frac{8}{9} \ln 2 - \frac{8}{9} \ln \alpha + \frac{2}{9} \right), \quad (10)$$



$$V_{J=2} = m\alpha^7 \frac{(n^2 - 1)}{30\pi n^5} \left( \frac{10}{3} \ln 2 - \frac{7}{3} \ln \alpha - \frac{1}{12} - \frac{i\pi}{2} \right), \quad (11)$$

где  $m$ -масса электрона,  $n$ -главное квантовое число. Вещественные части энергетических уровней (9) - (11) приводят к следующим численным значениям для уровня  $n=2$ : 0.2 КГц ( ${}^3P_0$ ), 2.6 КГц ( ${}^3P_1$ ), 2.0 КГц ( ${}^3P_2$ ). Наиболее значимой оказывается поправка к уровню  ${}^3P_1$ , составляющая около 10% от вклада порядка  $\alpha^4 R_\infty$ . Раздел 2.7 посвящен анализу вклада слабого взаимодействия в спектрах энергии водородоподобных атомов. Построен квазипотенциал слабого взаимодействия двух частиц при произвольных энергиях связи и получены вклады в сверхтонкую структуру и лэмбовский сдвиг атомов водорода и мюония. Вклад слабого взаимодействия в сверхтонкую структуру мюония (-0.065) кГц имеет в настоящее время важное значение для сравнения теории и эксперимента.

**Глава 3 "Эффекты поляризуемости ядра в лэмбовском сдвиге и сверхтонкой структуре ВП атомов"** посвящена исследованию эффектов поляризуемости ядра в спектрах энергии атомов электронного водорода и мюонного водорода. В разделе 3.1 получены аналитические формулы для поправок, связанных со структурой протона порядка  $(Z\alpha)^5$  и поляризуемостью протона того же порядка в лэмбовском сдвиге атома водорода в терминах электромагнитных формфакторов протона и структурных функций неполяризованного лептон - нуклонного рассеяния. При этом вклад поляризуемости протона в лэмбовский сдвиг представлен в терминах структурной функции  $F_2(x, Q^2)$  и  $R(x, k^2) = \sigma_L/\sigma_T$  - отношения сечений поглощения продольно- и поперечнополяризованных фотонов адронами:

$$\Delta E_{pol}^{LS} = -\frac{16\mu^3(Z\alpha)^5 m_1}{\pi^2 n^3} \int_0^\infty \frac{dk}{k} \int_0^\pi \sin^2 \phi d\phi \int_{\nu_0}^\infty dy \frac{1}{(k^2 + 4m_1^2 \cos^2 \phi)} \times (12)$$

$$\times \frac{1}{(y^2 + k^2 \cos^2 \phi)} \left[ (1 + 2 \cos^2 \phi) \frac{(1 + \frac{k^2}{y^2}) \cos^2 \phi}{1 + R(y, k^2)} + \sin^2 \phi \right] F_2(y, k^2) +$$

$$+ \frac{2\mu^3 \alpha^5}{\pi n^3 m_1 m_2} \int_0^\infty h(k^2) \beta(k^2) k dk,$$

$$h(k^2) = 1 + \left( 1 - \frac{k^2}{2m_1^2} \right) \left( \sqrt{\frac{4m_1^2}{k^2} + 1} - 1 \right), \quad \beta_M(k^2) = \beta_M \frac{\Lambda^8}{(\Lambda^2 + k^2)^4}. \quad (13)$$

С помощью экспериментальных данных получены численные значения этих вкладов в  $S$ - уровни атомов электронного и мюонного водорода. В случае мюонного водорода вклад поляризуемости протона в лэмбовский сдвиг ( $2P - 2S$ ) равен 16 мкэВ. В разделе 3.2 найдены аналитические интегральные соотношения для поправок порядка  $\alpha(Z\alpha)^5$ , определяемых электронной поляризацией вакуума, собственной энергией мюона и поляризуемостью протона в лэмбовском сдвиге мюонного водорода. Экспериментальная величина  $H-D$  изотопического сдвига для интервала  $1S \div 2S$ <sup>4</sup>

$$\Delta\nu_{H-D}(1S \div 2S) = 670\,994\,334.64(15) \text{ КГц}, \quad \delta = 2.2 \times 10^{-10} \quad (14)$$

была получена с высокой точностью, которая требует учета поправок на структуру и поляризуемость ядра при теоретическом расчете данного сдвига. В разделе 3.3 вычислен вклад внутренней поляризуемости ядра в изотопическом сдвиге водород - дейтерий на основе современных экспериментальных данных по структурным функциям электрон - протонного и электрон - дейтронного рассеяния. Численное значение вклада в расщеплении  $1S \div 2S$  имеет вид:

$$\Delta\nu_{H-D}(1S - 2S) = 63 \pm 12 \text{ Гц}. \quad (15)$$

В разделе 3.4 представлены современные данные для зарядового радиуса протона, полученные на основе электрон - протонного рассеяния, эффективных теорий сильного взаимодействия, расчетов лэмбовского сдвига в водороде. В разделе 3.5 предложен способ расчета вклада отдельных барионных резонансов в сверхтонкую структуру атома водорода в терминах формфакторов перехода нуклона в нуклонные резонансы. Получены общие аналитические выражения, определяющие вклад  $\Delta$  изобары, и найдены численные значения этого вклада в сверхтонкую структуру атомов электронного и мюонного водорода, которые соответственно равны:

$$\Delta E_p^{HFS}(\Delta - \text{изобара}) = \begin{cases} -0.12 \times 10^{-6} E^F, & \text{ep} \\ -0.77 \times 10^{-4} E^F, & \text{mp}. \end{cases} \quad (16)$$

<sup>4</sup>A.Huber, Th.Udem, B.Gross et al., Hydrogen - deuterium  $1S \div 2S$  isotope shift and the structure of the deuteron, Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 468.

В разделе 3.6 проведен расчет спектра масс гибридных барионов  $J^P = \frac{1}{2}^+$  в рамках правил сумм КХД с помощью спинорных и спин - векторных кварк - глюонных токов. В разделе 3.7 вычислен вклад поляризуемости протона в сверхтонкую структуру атомов электронного и мюонного водорода. Величина сверхтонкого расщепления основного уровня энергии электронного водорода измерена в настоящее время с очень высокой точностью <sup>5</sup>:

$$\Delta\nu_{\text{exp}}^{\text{HFS}} = 1420405.7517667(9) \text{ КГц}, \quad \delta = 6 \times 10^{-13}. \quad (17)$$

Получены следующие аналитические выражения для вклада поляризуемости протона в сверхтонкую структуру основного состояния, учитывающие зависимость от массы лептона:

$$\Delta E_{\text{HFS}}^P(\mu\text{P}) = \frac{Z\alpha m_1}{2\pi m_2(1+\kappa)} E_F(\Delta_1 + \Delta_2) = (\delta_1^P + \delta_2^P) E_F = \delta^P E_F, \quad (18)$$

$$\Delta_1 = \int_0^\infty \frac{dQ^2}{Q^2} \left\{ \frac{9}{4} F_2^2(Q^2) \beta_0(\sigma) - 4m_2^3 \int_{\nu_{\text{th}}}^\infty \frac{d\nu}{\nu} \beta_1(\sigma, \theta) G_1(\nu, Q^2) \right\}, \quad (19)$$

$$\Delta_2 = -12m_2^2 \int_0^\infty \frac{dQ^2}{Q^2} \int_{\nu_{\text{th}}}^\infty d\nu \beta_2(\sigma, \theta) G_2(\nu, Q^2), \quad (20)$$

где функции  $\beta_{0,1,2}$  имеют вид:

$$\beta_0(\sigma) = 2 \frac{\sqrt{1+\sigma}-1}{\sigma}, \quad \sigma = \frac{4m_1^2}{Q^2}, \quad (21)$$

$$\beta_1(\sigma, \theta) = \frac{\theta}{\sigma(-1+\sigma\theta)} \left[ \frac{-2\sqrt{1+\sigma}+2-4\sigma^2-2\sigma}{\sqrt{1+\sigma}} + \frac{2\sigma(-\theta^2+\theta^{3/2}\sqrt{1+\theta}+\theta+2)}{\sqrt{\theta(1+\theta)}} \right], \quad \theta = \frac{\nu^2}{Q^2} \quad (22)$$

$$\beta_2(\sigma, \theta) = \frac{2}{\sigma(-1+\sigma\theta)} \left[ 1 - \sqrt{1+\sigma} + \sigma(-\theta + \sqrt{\theta(1+\theta)}) \right], \quad (23)$$

где  $m_1$  -масса лептона,  $m_2$  -масса протона. Для проведения численных расчетов на основе соотношений (18) - (20) в глубоконеупругой области

<sup>5</sup>H.Hellwig, R.Vessot, M.Levine et al. Measurement of the unperturbed transition frequency, IEEE Trans. IM-19 (1970) 200-209.

использовались новые экспериментальные данные по поляризационным структурным функциям нуклона, полученные в SLAC, DESY и CERN, а также результаты численного решения эволюционных уравнений для поляризованных распределений кварков и глюонов. Для расчета вклада в резонансной области использовалась Брейт - Вигнеровская параметризация для сечений виртуального фотопоглощения на нуклоне. Относительный вклад эффектов поляризуемости протона в сверхтонкое расщепление основного состояния атомов электронного и мюонного водорода равен соответственно

$$\delta^P = \begin{cases} 1.4 \pm 0.6 \times 10^{-6}, & \text{ep} \\ 4.6 \pm 0.8 \times 10^{-4}, & \mu\text{P}. \end{cases} \quad (24)$$

Полученное значение поправки  $\delta^P(\text{ep})$  для атома электронного водорода имеет правильный знак и уменьшает расхождение теории и эксперимента, а в случае мюонного водорода величину поправки  $\delta^P(\mu\text{P})$  необходимо учитывать при достижении экспериментальной точности  $10^{-5}$ .

В Главе 4 "Эффекты АПВ в спектрах энергии ВП атомов" изучены эффекты адронной поляризации вакуума в лэмбовском сдвиге и сверхтонкой структуре ВП атомов и в ширине распада пиония. В разделе 4.1 проведен расчет вклада адронной поляризации вакуума порядка  $m\alpha(Z\alpha)^4$  в лэмбовском сдвиге мюонного водорода на основе современных экспериментальных данных по сечению аннигиляции  $e^+e^-$  в адроны, полученных на детекторах КМД-2 и СНД (Новосибирск). В разделе 4.2 получены аналитические выражения для вкладов АПВ в лэмбовский сдвиг мюонного водорода порядка  $m\alpha(Z\alpha)^5$  и  $m\alpha^2(Z\alpha)^4$ . Представлены численные значения адронных вкладов для различных интервалов энергии. Суммарный вклад АПВ в лэмбовский сдвиг  $2P \div 2S$  атома мюонного водорода равен:

$$\Delta E_{\text{LS}}^{\text{HVP}}(\mu\text{P}) = 10.772 \pm 0.377 \text{ мкэВ}. \quad (25)$$

Получен также следующий аналитический вклад АПВ в наклон зарядового формфактора лептона в нуле:

$$F'_{1 \text{ HVP}}(0) = \frac{1}{12} \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \frac{1}{m_1^2} \int_{s_{\text{th}}}^\infty \frac{R(s) ds}{s} \int_0^1 y dy \times \left[ \frac{1}{30} \frac{y^2(36y - y^2 - 40)}{D^2(y, s)} - \frac{1}{6} \frac{(22 - 14y - y^2)}{D(y, s)} + \frac{m_1^2}{s} \ln \left( \frac{y^2}{D(y, s)} \right) \right], \quad (26)$$

$$D(y, s) = y^2 + \frac{s}{m_1^2}(1 - y). \quad (27)$$

В разделе 4.3 вычислен вклад АПВ в сверхтонкую структуру основного состояния атома мюонного водорода. При этом точно учитывалась структура протона с помощью электромагнитных формфакторов. Численное значение вклада равно 0.004 мэВ. В разделе 4.4 исследовались вклады АПВ различного порядка в сверхтонкой структуре мюония. Новое измерение сверхтонкого расщепления основного состояния мюония было выполнено в 1999 году с точностью, которая в три раза превышает предыдущий экспериментальный результат <sup>6</sup>:

$$\Delta\nu_{\text{HFS}}^{\text{exp}}(\text{Mu}) = 4\,463\,302\,765\,(53)\text{ Гц}, \quad \delta = 1.1 \times 10^{-8}. \quad (28)$$

С точностью до сотых долей килогерца проведен расчет вклада АПВ порядка  $\alpha^2 E_F$  в сверхтонкой структуре мюония для различных интервалов энергии. Вычислены также поправки к этому результату порядка  $O(\alpha)$ , связанные с электронной и мюонной поляризацией вакуума. Проведен также расчет адронного вклада рассеяния света на свете в сверхтонкой структуре мюония в приближении полюсных членов псевдоскалярных мезонов. Для численной оценки полученных вкладов использовалось выражение формфактора перехода псевдоскалярного мезона в два фотона, полученное в модели векторной доминантности. Полный адронный вклад в сверхтонкое расщепление основного состояния мюония равен:

$$\Delta\nu_{\text{HFS}}^{\text{HVP}}(\mu e) = 0.2445 \pm 0.0070 \text{ КГц}. \quad (29)$$

В разделе 4.5 вычислен вклад поляризации вакуума, включая адронную поляризацию вакуума, в ширину распада пиония.

Глава 5 "Распад и рождение позитрония" посвящена вычислению релятивистских эффектов порядка  $\alpha^2$  в ширине распада позитрония. В разделе 5.1 определен статус экспериментальных данных по ширине распада парапозитрония и ортопозитрония. В разделе 5.2 сформулирована полностью релятивистская петлевая модель для вычисления ширины распада, в которой электрон и позитрон находятся только вне

<sup>6</sup>W.Liu, M.G.Boshier, S.Dhawan et al. High precision measurements of the ground state hyperfine structure interval of muonium and of the muon magnetic moment, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 711-714.

массовой поверхности. Такая модель вместе с используемым релятивистским проекционным оператором на состояния определенного спина позволяет правильно учесть все релятивистские поправки, которые были пропущены в других работах. Полная амплитуда распада ортопозитрония имеет вид:

$$F(o - Ps \rightarrow 3\gamma) = e^3 \varepsilon_\mu^*(k_1) \varepsilon_\nu^*(k_2) \varepsilon_\lambda^*(k_3) J^{\mu\nu\lambda}(k_1, k_2, k_3, M), \quad (30)$$

$$J^{\mu\nu\lambda}(k_1, k_2, k_3, M) = -i \int \frac{d^4 q_1}{(2\pi)^4} \frac{2m^2}{\varepsilon(\vec{q})} \frac{[M - 2\varepsilon(\vec{q})] \psi_M(\vec{q})}{(q_1^0 - \varepsilon(\vec{q}) + i0)(-q_2^0 + \varepsilon(\vec{q}) + i0)} \times \\ \times \frac{\text{Tr}[\hat{P} \gamma^\lambda (\hat{k}_3 - \hat{q}_2 + m) \gamma^\nu (\hat{q}_1 - \hat{k}_1 + m) \gamma^\mu]}{[(k_3 - q_2)^2 - m^2 + i0][(q_1 - k_1)^2 - m^2 + i0]}.$$

В этом выражении  $J^{\mu\nu\lambda}(k_1, k_2, k_3, M)$  представляет собой эффективный формфактор перехода ортопозитрония в три фотона. Он определяется как волновой функцией связанного состояния  $e^+e^-$ , так и амплитудой аннигиляции электрона и позитрона. В разделе 5.3 вычислены поправки порядка  $O(\alpha^2)$  к ширине распада парапозитрония и ортопозитрония во втором порядке теории возмущений. Получен полный вклад релятивистских эффектов порядка  $O(\alpha^2)$  в ширину распада ортопозитрония следующего вида:

$$\Delta\Gamma^{\text{th}}(o - Ps) = \frac{2(\pi^2 - 9)m\alpha^6}{9\pi} V_0 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2, \quad V_0 = 41.9. \quad (31)$$

Полученное значение вклада (31) (коэффициент  $V_0$ ) приводит к совпадению с экспериментальным результатом для ширины распада ортопозитрония группы Токийского университета:  $\Gamma^{\text{exp}}(o - Ps) = 7.0399\,(25) \text{ мкс}^{-1}$  <sup>7</sup>. В разделе 5.4 вычислены собственно - энергетические поправки порядка  $O(\alpha^2)$  к ширине распада парапозитрония и ортопозитрония в калибровке Фрида - Йенни. В разделе 5.5 исследовались релятивистские эффекты и радиационные поправки в процессах рождения позитрония при распаде легких мезонов. Проведен расчет диаграмм, в которых два виртуальных фотона, испущенные пи - мезоном, соединяются с электрон - позитронной линией, и с нее же испускается реальный фотон.

<sup>7</sup>O.Jinnouchi, S.Asai, T.Kobayashi Measurement of orthopositronium decay rate using SiO<sub>2</sub> powder: integration of thermalization into time spectrum fitting, E-preprint hep-ex/0011011, 2000.

Вычислены однопетлевые вклады порядка  $(Z\alpha)^7$  двухфотонных обменных амплитуд и двухфотонных аннигиляционных амплитуд в тонкую структуру позитрония.

- Построен квазипотенциал слабого взаимодействия ВП атома в однобозонном приближении при любых энергиях связи. Вычислен вклад слабого взаимодействия в лэмбовский сдвиг и сверхтонкую структуру атома водорода и мюония.
- Сформулирован метод расчета вклада поляризуемости протона в лэмбовском сдвиге электронного и мюонного водорода, основанный на использовании современных экспериментальных данных по структурным функциям глубокоэластичного лептон - нуклонного рассеяния. Вычислен вклад поляризуемости ядра, а также связанные с ним поправки порядка  $O(\alpha)$  в лэмбовском сдвиге мюонного и электронного водорода. Вычислен вклад внутренней поляризуемости ядра в изотопическом смещении водород - дейтерий для расщепления  $1S \div 2S$  на основе современных экспериментальных данных по структурным функциям глубокоэластичного лептон - нуклонного рассеяния и лептон - дейтронного рассеяния.
- Сформулирован способ расчета вклада отдельных барионных резонансов в сверхтонкую структуру атомов электронного и мюонного водорода, основанный на использовании формфакторов перехода нуклона  $N$  в нуклонный резонанс  $N^*$ . Получены аналитические интегральные выражения для соответствующих вкладов и вычислен вклад  $\Delta$  изобары в сверхтонкую структуру атомов электронного и мюонного водорода.
- Получены новые аналитические выражения для вкладов на поляризуемость протона в сверхтонкой структуре мюонного водорода в терминах поляризационных структурных функций глубокоэластичного рассеяния, в которых точно учитывается зависимость от массы мюона. Вычислен вклад поляризуемости протона в сверхтонкое расщепление атомов электронного и мюонного водорода на основе современных экспериментальных данных по поляризованному глубокоэластичному лептон - протонному рассеянию и модели Брейта-Вигнера.

- Вычислен вклад адронной поляризации вакуума порядка  $\alpha(Z\alpha)^4 m$ , а также адронные поправки порядка  $\alpha(Z\alpha)^5 m$ ,  $\alpha^2(Z\alpha)^4 m$  в лэмбовском сдвиге мюонного водорода. Получено аналитическое выражение для однопетлевого вклада адронной поляризации вакуума в наклон зарядового формфактора.
- Вычислен вклад адронной поляризации вакуума в сверхтонкую структуру мюония с точностью до сотых долей килогерца на основе новых экспериментальных данных по сечению аннигиляции  $e^+e^-$  в адроны с детекторов КМД-2 и СНД (Новосибирск). Получены адронные вклады амплитуд рассеяния света на свете порядка  $\alpha^3 E_F$  в СТС мюония в приближении полюсных членов псевдоскалярных мезонов. Вычислен вклад адронной поляризации вакуума в сверхтонкое расщепление основного состояния атома мюонного водорода с учетом дипольной параметризации для электромагнитных формфакторов нуклона.
- Сформулирована релятивистская петлевая модель для расчета ширины распада позитрония, основанная на рассмотрении конstituентов (электрона и позитрона) вне массовой поверхности и использовании релятивистского проекционного оператора частиц на состояние с определенным спином. Данная модель позволяет точно учитывать все релятивистские эффекты в распаде позитрония. Вычислены релятивистские  $\alpha^2$  поправки к ширине распада ортопозитрония в рамках этой модели. Вычислены собственно-энергетические электронные поправки порядка  $O(\alpha^2)$  к ширине распада орто- и парапозитрония в калибровке Фрида - Йенни. В рамках квазипотенциальной модели распада двухчастичного связанного состояния вычислен однопетлевой вклад поляризации вакуума, адронной поляризации вакуума, в ширину распада атома пиония. Вычислены релятивистские и радиационные поправки порядка  $O(\alpha)$  к ширине распада  $\pi^0$  мезона с образованием атома позитрония.
- Сформулирован квазипотенциальный метод расчета релятивистских и радиационных поправок к магнитному моменту двухчастичного связанного состояния в случае частиц произвольного спина. Показано, что выражения для  $g$  факторов связанных частиц содержат



члены порядка  $O(\alpha^2)$ , зависящие от спина частиц. Получены численные значения гиромагнитных факторов электрона в атоме водорода и дейтерия.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Релятивистская приведенная масса и квазипотенциальное уравнение, Теоретическая и математическая физика 64 (1985) 179-185.
2. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Релятивистский спектр энергии связанной системы двух частиц и локальное квазипотенциальное уравнение, Теоретическая и математическая физика 66 (1986) 399-408.
3. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Релятивистский спектр двухмезонного связанного состояния в скалярной электродинамике, Вестник МГУ сер.3. Физика. Астрономия 27 (1986) 3-8.
4. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Вычисление релятивистских поправок к сверхтонкой структуре мюония, Ядерная физика 45 (1987) 770-776.
5. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Релятивистские поправки к сверхтонкому расщеплению основного уровня водородоподобного атома, В межведомств. (МВиССО РСФСР и АН СССР) сборник научных статей "Математические проблемы квантовой механики и квантовой теории поля", под ред. Н.Н. Боголюбова (мл.), Д.А. Славнова и др., Куйбышев, Куйбышевский государственный университет, 1988, С.88-95.
6. А.П.Мартыненко Экзотический барион  $J^P = \frac{1}{2}^+$  из правил сумм КХД, Ядерная физика 54 (1991) 809-813.
7. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Ширина распада позитрония.  $O(\alpha^2)$  поправки во втором порядке теории возмущений, Известия Вузов. Физика No.10 (1994) 3-7.

8. А.П.Мартыненко, В.А.Салеев Вклад слабого взаимодействия в энергетический спектр двухлептонной системы, Теоретическая и математическая физика 100 (1994) 418-423.
9. R.N. Faustov, A.P. Martynenko, V.A. Saleev  $O(\alpha^2)$  corrections to the orthopositronium decay rate, Physical Review A51 (1995) 4520-4525.
10. R.N. Faustov, A.P. Martynenko A.P., V.A. Saleev  $O(\alpha^2)$  corrections to the orthopositronium decay rate, Proceedings of the XVII Workshop "Problems on High Energy Physics and Field Theory", editors: A.P. Samokhin, G.L. Rcheulishvili, Protvino, 1995, p.211-218.
11. А.П.Мартыненко Гибридный барион в правилах сумм КХД, Ядерная физика 58 (1995) 2054-2061.
12. А.П.Мартыненко, В.А.Салеев Weak interaction contribution to the energy spectrum of two-lepton system, Proceedings of the XVI Workshop "Problems on High Energy Physics and Field Theory", editor G.L. Rcheulishvili, Protvino, 1995, p.197-203.
13. А.П.Мартыненко, В.А.Салеев, Р.Н.Фаустов  $O(\alpha^2)$  поправки к ширине распада ортопозитрония, Ядерная физика 58 (1995) 1454-1459.
14. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Вклад двухфотонной аннигиляции в тонкую структуру P-волнового позитрония, Вестник Самарского государственного университета No.2 (1996) 108-112.
15. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Релятивистские поправки к тонкой структуре позитрония, Ядерная физика 60 (1997) 1272-1278.
16. А.П.Мартыненко Магнитные моменты легких гибридных барионов в правилах сумм КХД, Ядерная физика 60 (1997) 729-735.
17. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Вклад адронной поляризации вакуума в сверхтонкое расщепление мюонного водорода, Ядерная физика 61 (1998) 471-475.
18. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Рождение атомов позитрония в распадах легких мезонов, Вестник МГУ Сер.3. Физика. Астрономия No.5 (1998) 10-13.

19. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Evaluation of HVP contribution to the hyperfine splitting of muonic hydrogen, Proceedings of the International Workshop "Hadronic atoms and positronium in the standard model", editors: M.A. Ivanov, A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev et al., Dubna, 1998, P.214-219.
20. А.П.Мартыненко, В.А.Салеев Вклад поляризации вакуума в ширину распада пиония, Вестник Самарского государственного университета No.4 (1998) 166-170.
21. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Corrections of order  $(Z\alpha)^6 m_e^2/m_\mu$  in the muonium fine structure, Proceedings of the International Workshop "Hadronic atoms and positronium in the standard model", editors: M.A. Ivanov, A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev et al., Dubna, 1998, P.209-214.
22. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Поправки порядка  $(Z\alpha)^6 m_e^2/m_\mu$  к тонкой структуре мюония, Журнал экспериментальной и теоретической физики 115 (1999) 1221-1235.
23. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Corrections of order  $(Z\alpha)^6 m_e^2/m_\mu$  in the muonium fine structure induced by three photon exchange diagrams, Proceedings XII International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, edited by B.V. Levchenko, Moscow, 1999, P.429-435.
24. R.N.Faustov, A.Karimkhodzhaev, A.P.Martynenko Evaluation of hadronic vacuum polarization contribution to muonium hyperfine splitting, Physical Review A59 (1999) 2498-2499.
25. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Hadronic vacuum polarization contribution to the Lamb shift in muonic hydrogen, European Physical Journal direct C6 (1999) 1-6.
26. R.N.Faustov, A.P.Martynenko, V.A.Saleev Proton polarizability correction to the hydrogen hyperfine splitting, Ядерная физика 62 (1999) 2445-2448.

27. R.N.Faustov, A.Karimkhodzhaev, A.P.Martynenko Hadronic vacuum polarization contribution to muonium hyperfine splitting, Ядерная физика 62 (1999) 2449-2451.
28. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Поляризуемость протона и лэмбовский сдвиг в атоме мюонного водорода, Ядерная физика 63 (2000) 915-919.
29. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Deep inelastic scattering and the Lamb shift in muonic hydrogen, Proceedings XIV International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, editors: B.V. Levchenko, V.I. Savrin, Moscow, 2000, P.499-505.
30. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Hadronic vacuum polarization contribution to the spectra of hydrogenic atoms, Proceedings QED 2000 2nd Workshop on Frontier Tests of Quantum Electrodynamics and Physics of the Vacuum, editor G. Cantatore, AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2001, V.564, P.67-75.
31. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Вклад поляризуемости протона в лэмбовский сдвиг и сверхтонкую структуру водорода, В сб. научных трудов II Всероссийской конференции "Университеты России - фундаментальные исследования. Физика элементарных частиц и атомного ядра", редколлегия: Б.А. Долгошеин, Н.С. Зеленская, В.А. О कोरोков и др., МИФИ, Москва, 2001, С. 32-33.
32. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Proton polarizability contribution to the hydrogen Lamb shift and hyperfine splitting, Proceedings QED 2000 2nd Workshop on Frontier Tests of Quantum Electrodynamics and Physics of the Vacuum, editor G. Cantatore, AIP Conference Proceedings, Melville, New York, 2001, V.564, P.67-75.
33. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Эффекты поляризации вакуума и поляризуемости протона в лэмбовском сдвиге мюонного водорода, Ядерная физика 63 (2001) 1358-1363.
34. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Polarized deep inelastic scattering and the hydrogen hyperfine splitting, Proceedings XVth International

Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory, editors: M.N. Dubinin, V.I. Savrin, Moscow, 2001, P. 245-254.

35. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов G-факторы связанных частиц в квантовой электродинамике, Журнал экспериментальной и теоретической физики 120 (2001) 539-545.
36. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Nucleus polarizability contribution to the hydrogen-deuterium isotope shift, Modern Physics Letters A16 (2001) 507-511.
37. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Proton polarizability contribution to the hyperfine splitting in hydrogen, Ядерная физика 65 (2002) 265-270.
38. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Магнитный момент двухчастичного связанного состояния в квантовой электродинамике, Ядерная физика 65 (2002) 271-276.
39. А.П. Мартыненко, Р.Н. Фаустов Однопетлевые поправки порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$ ,  $(Z\alpha)^7$  к тонкой структуре мюония, Ядерная физика 66 No. 4 (2003) 780 Аннотация; E-preprint hep-ph/0112056, 2001.
40. E.V. Cherednikova, R.N. Faustov, A.P. Martynenko Proton polarizability contribution to the hyperfine splitting in muonic hydrogen, Nuclear Physics A703 (2002) 365-377.
41. А.П.Мартыненко, Р.Н.Фаустов Поправки порядка  $(Z\alpha)^6 m_1/m_2$ ,  $(Z\alpha)^7$  к тонкой структуре мюония, В сб. научных трудов III Всероссийской конференции "Университеты России - фундаментальные исследования. Физика элементарных частиц и атомного ядра", редколлегия: Б.А. Долгошеин, Н.С. Зеленская, В.А. Окороков и др., МИФИ, Москва, 2002, С. 115-116.
42. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Proton polarizability contribution to hydrogen hyperfine splitting, European Physical Journal C24 (2002) 281-285.
43. R.N. Faustov, A.P. Martynenko Nuclear structure corrections in the energy spectra of electronic and muonic deuterium, Physical Review A67 (2003) 052506-052512.
44. R.N. Faustov, A.P. Martynenko Pseudoscalar pole terms contributions to hadronic light - by - light corrections to the muonium hyperfine splitting, Physics Letters B541 (2002) 135-141.
45. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Effects of strong interaction in the energy spectra of hydrogenic atoms, In book of abstracts of International Conference PSAS 2002 "Precision physics of simple atomic systems", edited by S.G.Karshenboim, V.B. Smirnov, E.N. Borisov and V.A. Shelyuto, St. Petersburg, 2002, P.38.
46. R.N.Faustov, A.P.Martynenko G factors of bound particles in quantum electrodynamics, In book of abstracts of International Conference PSAS 2002 "Precision physics of simple atomic systems", edited by S.G. Karshenboim, V.B. Smirnov, E.N. Borisov and V.A. Shelyuto, St. Petersburg, 2002, P.67.
47. R.N.Faustov, A.P.Martynenko Gyromagnetic factors of bound particles with arbitrary spin in quantum electrodynamics, Canadian Journal Physics 80 (2002) 1365-1372.

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л.2.0 Зак. № 21168 Тираж 100 экз.

Бесплатно

Отпечатано на компьютерной издательской системе  
Издательский отдел Института ядерных исследований  
Российской Академии наук  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а