

На правах рукописи

ШАРКОВ Валерий Валерьевич

**Квантово-статистическая теория радиационного трения
релятивистского электрона**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород–2008

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (ННГУ).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Г.Ф. Ефремов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор В.Г. Гавриленко
кандидат физико-математических наук,
доцент Ю.Г. Шондин

Ведущая организация – Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им.
М.В.Ломоносова

Защита состоится " ____ " _____ 2009 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, корп.4, радиофизический факультет, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Диссертационная работа направлена на решение ряда задач, имеющих важное значение для современной квантовой радиофизики, методы которой, в первую очередь, основываются на аппарате квантовой электродинамики.

Несмотря на значительные успехи квантовой электродинамики, применение ее традиционных методов к решению базовых задач о взаимодействии заряженных частиц с электромагнитным полем натолкнулось на определенные трудности. Среди них так и нерешенная до конца задача о радиационном затухании электрона, появление расходимостей при вычислении электродинамических эффектов, а также значительное усложнение расчетов, например, лэмбовского сдвига при увеличении их точности [1*].

Радиационное затухание, представляющее собой реакцию собственного поля излучения на движение заряженной частицы, является одним из фундаментальных эффектов электродинамики и затрагивает наиболее принципиальные вопросы физической теории. Проблема радиационного затухания, возникшая по сути дела в начале двадцатого столетия, до сих пор продолжает привлекать к себе внимание многих исследователей ввиду особой важности ее решения. Дело в том, что классическая формула радиационной силы трения Абрагама-Лоренца приводит к хорошо известному парадоксу самоускорения. Именно, при наличии силы состояние электрона с определенной скоростью оказывается неустойчивым, и электрон за очень короткий промежуток времени приобретает ультрарелятивистскую скорость. Кроме этого, радиационная сила противоречит принципу причинности. Вследствие указанных выше парадоксов радиационную силу, строго говоря, нельзя считать малой. Тем не менее, традиционный способ решения классических задач с учетом реакции излучения основан на формальном использовании малости радиационной силы, то есть выражение для радиационной силы трения Абрагама-Лоренца рассматривается как возмущение в уравнении Лоренца. В основе классического рассмотрения этой проблемы лежит предположение о точечности заряда электрона. Другой особенностью в теоретическом описании радиационного затухания является существенная нелинейность взаимодействия между полем и частицей: частица генерирует поле, которое воздействует на частицу. Такое самовоздействие не может быть представлено как последовательность процессов, описываемых линейным волновым уравнением и линейным дифференциальным уравнением конечной степени. Кроме этого, для точечной частицы собственная энергия и энергия взаимодействия бесконечны, вследствие чего самовоздействие допускает корректное описание лишь при устранении

расходимостей. Таким образом, основные трудности физического понимания и строгой теоретической трактовки данного явления обусловлены как предположением о точности заряда электрона, так и принципиально нелинейным характером взаимодействия электрона с собственным полем излучения.

Несмотря на устранение расходимостей и строгий учет релятивистских свойств электрона, при последовательном классическом способе описания не удается избежать парадоксов в теории радиационного трения. Физически это связано с тем, что классическая электродинамика исходит, как выше было указано, из идеализации точности заряженной частицы. Реакция собственного поля излучения заряженной точечной частицы приводит к ее ускорению и нарушению принципа причинности. Многочисленные попытки устранить противоречия теории радиационного затухания в рамках классической электродинамики не увенчались успехом. Это произошло потому, что радиационное затухание, как и закономерности теплового поля излучения, имеет принципиально квантовую природу. Несмотря на значительные успехи квантовой электродинамики, применение ее традиционных методов к решению проблемы радиационного затухания не было успешным.

При построении квантовой теории радиационного затухания используются различные подходы и приближения [2*-4*]. Один из возможных путей решения проблемы радиационного затухания и взаимосвязанных проблем расходимостей, перенормировок и лэмбовского сдвига уровней основан на предложенных методах флуктуационно-диссипационной теории нелинейных открытых квантовых систем, представляющих собой существенное обобщение линейной теории броуновского движения квантовых систем, развитой Швингером [5*] и Сеницким [6*].

Наряду с последовательным полевым подходом при статистическом описании взаимодействия электрон-позитронного поля с квантовым полем излучения возможно рассмотрение одноэлектронной квантовой электродинамики [7*]. Такая возможность обусловлена тем, что радиационное затухание, лэмбовский сдвиг уровней и ряд других явлений представляют собой эффекты самовоздействия электрона через квантовое поле излучения либо воздействие на него флуктуирующего вакуумного электромагнитного поля. Успешное решение задач, связанных с поведением электрона Дирака в заданных внешних полях, в частности, в кулоновском потенциале приводит к убеждению о правомерности одночастичной квантовой электродинамики, рассматривающей взаимодействие релятивистского электрона с квантовым электромагнитным полем.

Среди известных эффектов квантовой электродинамики лэмбовский сдвиг уровней, установленный экспериментально, занимает особое место. Теоретический расчет эффекта Лэмба впервые был проведен Бете на основе идеи перенормировок. Элементарная статистическая теория эффекта Лэмба была предложена Велтоном [8*]. Основным недостатком этой теории является наличие расходимостей как при больших, так и при малых передаваемых импульсах фотонов. Общепринятая процедура вычисления лэмбовского сдвига, основанная на теории возмущений, также вынуждена использовать формальное правило перенормировок для устранения расходимостей в теоретических расчетах эффекта. Несмотря на успехи этих расчетов, они значительно усложняются при учете членов более высоких порядков малости [9*]. Совершенствование техники измерений и, в частности, развитие сверхточной лазерной спектроскопии, привело к тому, что точность измерений эффекта Лэмба значительно превосходит известные к настоящему времени теоретические расчеты. В связи с этим особый интерес представляет свободная от расходимостей и необходимости обращения к процедуре перенормировок статистическая теория лэмбовского сдвига уровней с выходом за рамки стандартной теории возмущений по константе взаимодействия.

Таким образом, актуальность темы данной диссертации обусловлена следующими обстоятельствами: 1) необходимостью устранить парадоксы теории радиационной силы трения; 2) необходимостью развития новых методов вычисления электродинамических эффектов, свободных от расходимостей и открывающих физическую природу этих явлений.

Цель настоящей работы заключалась в теоретическом исследовании взаимодействия электрона Дирака с полем электромагнитного вакуума и эффектов, следующих из этого взаимодействия, с позиций флуктуационно-диссипационной теории открытых квантовых систем.

Научная новизна работы заключается как в новом подходе к решению квантовых электродинамических задач, так и в полученных оригинальных результатах. В частности, в работе впервые:

1. Развита последовательная теория броуновского движения электрона Дирака в поле электромагнитного вакуума при единственном предположении о гауссовой статистике невозмущенных потенциалов вакуумного поля. При этом строго учитывалась как реакция собственного поля излучения, так и заданное параметрическое воздействие на электрон поля электромагнитного вакуума. Полученное таким образом точное стохастическое уравнение для динамических переменных электрона Дирака положено в основу квантовой

теории радиационного затухания, принципиальная особенность которой заключается в учете запаздывания взаимодействия между электроном и квантованным полем излучения.

2. Доказано, что в локальной квантовой теории имеет место запаздывание взаимодействия между электроном Дирака и собственным полем излучения, равное по порядку величины времени прохождения светом комптоновской длины волны. Непосредственно эффект квантовой пространственно-временной нелокальности обусловлен как конечностью значения дисперсии приращения координаты, так и фазовым множителем, обусловленным некоммутативностью оператора координаты электрона в различные моменты времени.

3. Благодаря указанному выше эффекту квантовой нелокальности решилась проблема точечности электрона в квантовой теории и, таким образом, были исключены парадоксы самоускорения и нарушения принципа причинности, присущие классической теории, а также устранены расходимости в квантовой электродинамике.

4. Показано, что воздействие на электрон флуктуаций поля электромагнитного вакуума приводит к экранированию кулоновского взаимодействия на малых расстояниях, определяемого новым эффективным потенциалом. Мы отказались от идеологии теории возмущений. Единственный «малый» параметр, использованный в нашей задаче, – гауссова статистика невозмущенных переменных термостата – потенциалов поля электромагнитного вакуума.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Нелокальная нелинейная зависимость обобщенной радиационной силы трения от динамических переменных электрона учитывает как реакцию собственного поля излучения электрона, так и воздействие вакуумного электромагнитного поля.

2. Дисперсия приращения координаты за промежуток времени $t = t - t_1$ для электрона Дирака конечна в собственной системе координат:

$$(\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t_1))^2 = \mathbf{D}_c^2 \sin^2 w_0 t ,$$

где $\mathbf{D}_c = \mathbf{h} / mc$, $w_0 = mc^2 / \mathbf{h}$.

3. Замена функции Грина фотона $D_{ji}(\mathbf{k}, t) \rightarrow \overset{\circ}{D}_{ji}(\mathbf{k}, t) = D_{ji}(\mathbf{k}, t) \cos \sigma l_c k$ (σ – параметр нелокальности) учитывает вклад области больших передаваемых импульсов фотонов собственного поля излучения электрона в силу реакции на релятивистский электрон.

4. Выражение для радиационной силы трения содержит запаздывание взаимодействия между электроном и собственным полем излучения на расстоянии порядка

комптоновской длины волны, что исключает известные парадоксы классической теории Абрагама-Лоренца.

5. Коэффициент радиационного трения релятивистского электрона определяет лэмбовский сдвиг энергетических уровней и дополнительный вклад в электромагнитную массу электрона.

6. Последовательная статистическая теория лэмбовского сдвига уровней свободна от расходимостей и необходимости обращения к процедуре перенормировок и выходит за рамки стандартной теории возмущений по константе взаимодействия. Найдена аналитическая зависимость смещения $2S-1S$ энергетических состояний электрона в водородоподобном атоме, учитывающая все порядки теории возмущений по постоянной тонкой структуры.

Научная и практическая значимость результатов работы

Результаты проведенных в диссертационной работе исследований открывают возможность вычисления новых эффектов и зависимостей в квантовой электродинамике, таких как температурная и частотная зависимости (форма линии) энергетических уровней атомов. Отказ от дипольного приближения при вычислении операторов, входящих в уравнения движения электрона, позволит значительно улучшить соответствие теории и эксперимента. Следует заметить, что все вычисления в диссертации были выполнены в одночастичном приближении. Отказ от этого приближения, то есть переход к электрон-позитронному полю, взаимодействующему с электромагнитным вакуумом, еще более повысит точность предсказания электродинамических эффектов.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Ежегодная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, 1999–2005 гг.; Нижегородская сессия молодых учёных, Нижний Новгород, 2001г. Результаты диссертации также обсуждались на семинарах кафедры квантовой радиофизики ННГУ, отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, а также кафедры теоретической физики Санкт-Петербургского педагогического университета.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в статьях [1-8], а также в тезисах докладов конференций [6-13].

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 90 страницах машинописного

текста, включая список литературы из 70 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко освещено современное состояние исследований по теме диссертации и обоснована её актуальность, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна полученных результатов, кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена краткому изложению исходных положений, с помощью которых описываются флуктуационно-диссипационные процессы в открытых квантовых системах и на которых основаны дальнейшие исследования. Приведены некоторые результаты нестационарной теории возмущений, опирающейся на формализм S-матрицы. Определены используемые в дальнейшем понятия линейного и нелинейного откликов (функций Грина), возникающих в системах при наложении внешних сил, и проанализированы их свойства. Кратко рассмотрены общие вопросы статистического описания систем, включая использование временных и спектральных характеристик флуктуаций как в классической, так и в квантовой областях. Основу теории составляет флуктуационно-диссипационная теорема. Вводится понятие гауссовых переменных и их основные свойства. Показывается, что переменные гармонического осциллятора, находящегося в термодинамическом равновесии с термостатом, имеют гауссову статистику.

Во второй главе рассматриваются особенности взаимодействия динамической системы с диссипативным окружением на основе микроскопической флуктуационно-диссипационной теории. Единственное предположение о гауссовости флуктуаций возмущенных переменных термостата позволяет написать стохастические уравнения движения для некоторой выделенной части полной системы – динамической подсистемы, взаимодействующей с диссипативным окружением (термостатом). Таким образом, теория строится на основе статистических предположений и не опирается на малость константы взаимодействия. Из получившегося стохастического уравнения следует, что поведение динамической подсистемы, взаимодействующей с гауссовым термостатом, исчерпывающим образом определяется временной функцией корреляции и линейным откликом термостата на заданное внешнее воздействие. При этом динамическая подсистема может находиться в сильно неравновесном состоянии, и потому стохастические уравнения одинаково применимы как в квазиравновесных, так и сильно неравновесных состояниях.

Данный метод применяется к проблеме броуновского движения электрона Дирака в поле электромагнитного вакуума. Для решения поставленной задачи используется одно-

электронное приближение. Невозмущенные переменные электромагнитного поля подчиняются гауссовой статистике с найденной корреляционной функцией $M_{ij}(\mathbf{k}, t)$ и функцией Грина фотона $D_{ij}(\mathbf{k}, t)$. В результате получается замкнутые уравнения в гейзенберговском представлении для операторов координаты и импульса электрона, учитывающее запаздывание взаимодействия между электроном и квантованными полями излучения и электромагнитного вакуума. Приведем выражение для силы, действующей на электрон со стороны поля, из которого получаются все результаты диссертации:

$$\begin{aligned}
F_j(t) = & -\frac{e^2}{c^2} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int \frac{d^3k}{(2p)^3} \left\{ D_{j\nu}(\mathbf{k}, t-t_1) \frac{1}{2} \left[e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)}, e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \right]_{\Psi(t_1)} \right\}_+ + \\
& + M_{j\nu}(\mathbf{k}, t-t_1) \frac{i}{\mathbf{h}} \left[e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)}, e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \right]_{\Psi(t_1)} h(t-t_1) \left. \right\} + \\
& + \frac{e^2}{c^2} \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int \frac{d^3k}{(2p)^3} \left\{ D_{av}(\mathbf{k}, t-t_1) \frac{1}{2} \nabla_j \left(\left[e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} \right]_{\Psi(t)}, \left[e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \right]_{\Psi(t_1)} \right) \right\}_+ + \\
& + D_{av}(\mathbf{k}, t-t_1) \frac{1}{2} \nabla_j \left(e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \right) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} + \\
& + M_{av}(\mathbf{k}, t-t_1) h(t-t_1) \frac{i}{\mathbf{h}} \nabla_j \left(\left[e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} \right]_{\Psi(t)}, \left[e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \right]_{\Psi(t_1)} \right) \left. \right\} + \\
& + M_{av}(\mathbf{k}, t-t_1) h(t-t_1) \frac{i}{\mathbf{h}} \nabla_j \left(e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \right) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} \left. \right\}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\mathbf{r}(t)$ – оператор координаты электрона, $\eta(t)$ – функция Хевисайда, e – заряд электрона, c – скорость света в вакууме. Уравнение (1) нелинейно из-за наличия экспоненциальных множителей с операторами координаты в показателях. По этой причине анализ уравнений движения наталкивается на значительные трудности. Первое приближение, которое мы использовали, было нерелятивистским. Было показано, что в этом случае проблемы, присущие задаче радиационного трения, не исчезают. Однако для устранения расходимостей всегда можно провести процедуру перенормировки. Было найдено выражение для действительной части коэффициента радиационного затухания и, исходя из него, продемонстрировано устранение расходимости массы электрона.

Вопросы, рассмотренные в третьей главе, связаны с решением проблемы радиационного затухания электрона в релятивистском случае. В основу расчетов положено выражение для силы взаимодействия электрона с электромагнитным полем (1). Основной вклад в затухание вносят первые два слагаемых в (1). В этом приближении получено уравнение движения электрона:

$$\frac{d^2}{dt^2} r_j(t) = \frac{1}{m} f_j(t) - \frac{d}{dt} \int dt_1 g_{ji}(t-t_1) \Psi(t_1) + \frac{1}{m} x_j(t), \tag{2}$$

где $f_j(t)$ – внешняя сила, $\gamma_{jl}(t)$ – коэффициент радиационного затухания $\zeta_j(t)$ – флуктуационный источник с равным нулю средним значением. Выражение для коэффициента радиационного затухания имеет вид:

$$\begin{aligned} g_{jl}(t-t_1) = & \frac{e^2}{mc^2} \int \frac{d^3k}{(2p)^3} \left\{ D_{jl}(\mathbf{k}, t-t_1) \left\langle \frac{1}{2} [e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)}, e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)}]_+ \right\rangle + \right. \\ & \left. + M_{jl}(\mathbf{k}, t-t_1) \left\langle \frac{i}{\hbar} [e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)}, e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)}]_- \right\rangle h(t-t_1) \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Угловые скобки обозначают усреднение по основному состоянию полной системы. Радиационная сила трения, определяемая коэффициентом (3), автоматически учитывает принцип причинности и запаздывание взаимодействия электрона с собственным полем излучения, связанное с конечностью скорости распространения света и некоммутативностью гейзенберговских операторов координаты электрона, взятых в различные моменты времени. Нелинейная зависимость радиационной силы от операторов координаты $\mathbf{r}(t)$ и $\mathbf{r}(t_1)$ определяется произведением экспоненциальных множителей. В квантовой электродинамике в отличие от классической имеется фундаментальный малый параметр – постоянная тонкой структуры $a = e^2/\hbar c$. Благодаря этому, при вычислении коэффициента радиационного затухания (3) достаточно воспользоваться приближением свободной эволюции для оператора координаты электрона $r_j(t)$. В результате мы получили, что дисперсия приращения координаты $\mathbf{r}(t)-\mathbf{r}(t_1)$ для электрона Дирака оказывается конечной в собственной системе координат благодаря наличию собственных (внутренних) степеней свободы, задаваемых матрицами Дирака. В этом случае произведение экспонент в (3) можно переписать в следующем виде:

$$e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} = e^{i\mathbf{k}\Delta\mathbf{r}} \exp \left\{ -\frac{i\omega_0 t}{2} (b x \arctan x + \mathbf{n}\boldsymbol{\alpha}(x - \arctan x)) \right\}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\alpha}$ и β – матрицы Дирака, $\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)-\mathbf{r}(t_1)$, $\omega_0 = mc^2/\hbar$, $\tau = t-t_1$, $x = ck/\omega_0$. Непосредственно эффект квантовой пространственно-временной нелокальности обусловлен как конечностью значения дисперсии приращения координаты, которая находится в показателе первой экспоненты в правой части (4), так и вычисленным нами фазовым множителем в показателе второй экспоненты в правой части (4), обусловленным некоммутативностью оператора координаты в различные моменты времени. Используя этот результат, была вычислена линейная восприимчивость электрона, в которую входит коэффициент радиационного затухания (3). В простейшем случае она принимает следующий вид:

$$c(w) = -\frac{1}{mw^2} \left(1 + i \frac{2a}{3} \frac{w}{w_0} \exp\left(\frac{iw}{\sqrt{2}w_0}\right) \right)^{-1}.$$

Из данной формулы для линейного отклика следует уравнение движения электрона во внешнем электрическом поле:

$$m\ddot{x}_j(t) - mt_0\ddot{x}_j(t-t_0) = eE_j(t); \quad t_0 = \frac{2}{3} \frac{e^2}{mc^3}, \quad t_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\hbar}{mc^2}.$$

Поскольку радиационная сила трения «включается» с опозданием на время t_0 , приближенно можно считать, что в течение этого времени электрон двигается только под действием внешнего поля. Тогда для больших промежутков времени получим хорошо известное уравнение, применяемое для практических вычислений, но с некоторым принципиальным отличием:

$$m\ddot{x}_j(t) = eE_j(t) + t_0 \frac{d}{dt} eE_j(t-t_0).$$

Согласно полученному уравнению, электрон взаимодействует с электрическим полем с опозданием на время прохождения светом комптоновской длины волны. Таким образом, показано, что конечное значение дисперсии приведет к запаздыванию взаимодействия между электроном и собственным полем излучения, что снимает известные парадоксы радиационного затухания и логарифмическую расходимость в квантовой электродинамике. Запаздывание определяется временем прохождения светом характерного размера электрона t_0 . Следовательно, квантовая теория радиационного затухания – это принципиально немарковская теория, учитывающая запаздывание взаимодействия между электроном и полем излучения. Так как характерное время запаздывания взаимодействия определяется энергией покоя mc^2 , то квантовая теория оказывается принципиально релятивистской теорией.

В четвертой главе излагается последовательная статистическая теория лэмбовского сдвига уровней электрона, находящегося в кулоновском поле. Основная особенность и достоинство предлагаемой статистической теории лэмбовского сдвига уровней заключается в отсутствии расходимостей и, следовательно, необходимости процедуры перенормировок. Слагаемые, содержащие градиент в выражении для силы (1), отвечают за особенности радиационного затухания для связанных состояний и определяют также лэмбовский сдвиг уровней, обусловленный воздействием на электрон флуктуаций электромагнитного вакуума. Вследствие этого часть силы, непосредственно определяющей лэмбовский сдвиг уровней, имеет вид:

$$F_j^L(t) = \frac{e^2}{c^2} \int_{-\infty}^{\infty} dt_1 \int \frac{d^3k}{(2p)^3} M_{av}(\mathbf{k}, t-t_1) \frac{i}{\mathbf{h}} \left\{ \nabla_j \left(\left[e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} \mathbf{E}_a(t), e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \mathbf{E}_v(t_1) \right]_- \right) + \nabla_j \left(e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \mathbf{E}_v(t_1) \right) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} \mathbf{E}_a(t) \right\} h(t-t_1). \quad (5)$$

Благодаря введению оператора Лиувилля $S_n(\mathbf{k}, t-t_1)$, описывающего эволюцию во времени электрона в атоме водорода, удалось преобразовать коммутатор в (5) к виду:

$$\left[e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}(t)} \mathbf{E}_a(t), e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}(t_1)} \mathbf{E}_v(t_1) \right] = \left[\mathbf{E}_a(t), \mathbf{E}_v(t) \right] S_n(\mathbf{k}, t-t_1),$$

благодаря чему выражение для силы (5) значительно упростится, и все особенности взаимодействия электрона и вакуумного электромагнитного поля сведутся к одному единственному параметру Λ_n :

$$F_j^L(t) = m\Lambda_n^2 \nabla_j \nabla_a \mathbf{E}_a(t),$$

$$\Lambda_n^2 = \frac{I_c^2 a}{3p} \int \frac{dw}{2p} \int dk \frac{k \cos \sigma k}{k^2 - w^2/c^2} S_n(k, w), \quad (6)$$

где σ – параметр нелокальности. Показано, что воздействие на электрон флуктуаций электромагнитного вакуума приводит к насыщению кулоновского взаимодействия на малых расстояниях, которое определяется эффективным потенциалом с размером области насыщения Λ_n :

$$V^{eff}(r) = -\frac{ze^2}{r} \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{\Lambda_n}\right) \right). \quad (7)$$

Этот потенциал приводит к изменению энергетических уровней электрона в водородоподобном атоме (лэмбовскому сдвигу уровней). Точность вычисления лэмбовского сдвига будет определяться точностью вычисления характерной длины Λ_n , определяемой согласно (6). Получена общая формула для лэмбовского сдвига уровней в атоме водорода с учетом только первых неисчезающих членов разложения (7) по малому параметру Λ_n/a (a – боровский радиус):

$$\Delta E_{ns} = \frac{4mc^2 a^5}{3pn^3} \left(\ln(1/a^2) + L_{n0} + 0.695 \right).$$

Было проведено сопоставление значения лэмбовского сдвига, вычисленного с учетом эффекта квантовой нелокальности, с хорошо известным результатом [10*], полученным на основе процедуры перенормировок. В частности из нашего выражения с учетом сдвига 2P уровня (см. [10*]) следует значение частоты перехода 2S-2P $n_{2S-2P} = 1058$ МГц, несколько превышающее экспериментальное значение $n_{2S-2P}^{exp} = 1057,845$ МГц [1*]. В то же время значение $n_{2S-2P} = 1050$ МГц [10*], полученное в тех же приближениях на основе

процедуры перенормировок оказывается значительно меньше экспериментального. В заключении сформулированы основные результаты четвертой главы.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача о взаимодействии электрона Дирака с полем электромагнитного вакуума. При единственном предположении о гауссовой статистике невозмущенных потенциалов электромагнитного поля получено выражение для силы такого взаимодействия, которое учитывает как воздействие внешнего вакуумного поля, так и поле излучения самого электрона.
2. В нерелятивистском приближении для связанных состояний проведена процедура перенормировки заряда и массы электрона для устранения расходимостей в уравнениях движения электрона. Показано, что возникающие в этом случае расходимости обусловлены приближением точечного электрона. Получено выражение для действительной части коэффициента радиационного затухания электрона.
3. Рассмотрен и проанализирован эффект квантовой пространственно-временной нелокальности, который заключается в конечности дисперсии приращения координаты релятивистского квантового электрона в собственной системе координат. Дисперсия имеет величину порядка квадрата комптоновской длины волны электрона.
4. Следствием эффекта квантовой нелокальности является запаздывание взаимодействия электрона с собственным полем излучения. Этот эффект обусловлен как конечностью значения дисперсии приращения координаты электрона, так и вычисленным нами принципиально важным фазовым множителем, обусловленным некоммутативностью оператора координаты в различные моменты времени. На основе эффекта квантовой нелокальности решена задача о радиационном затухании электрона Дирака. Найден коэффициент радиационного затухания электрона, и показана его взаимосвязь с лэмбовским сдвигом уровней. Показано также, что следствием конечности размеров электрона является то, что он взаимодействует с электрическим полем с опозданием на время прохождения светом комптоновской длины волны.
5. Построена последовательная статистическая теория лэмбовского сдвига уровней, свободная от расходимостей и, следовательно, не вынужденная прибегать к процедуре перенормировок. Физическим механизмом возникновения сдвига уровней является воздействие флуктуаций вакуумного электромагнитного поля на электрон. Получено

выражение для эффективного кулоновского потенциала, из которого следует насыщение взаимодействия на малых расстояниях.

6. Проведено сопоставление значения лэмбовского сдвига, вычисленного с учетом эффекта квантовой нелокальности, с хорошо известными результатами, полученными на основе процедуры перенормировок. Показано, что с применением одинаковых приближений наши результаты оказываются точнее.

Таким образом, используемый в диссертации метод стохастических уравнений для нелинейных открытых квантовых систем [19] исходит из точного гамильтониана полной системы и, таким образом, является принципиально микроскопическим. Особенность метода состоит в использовании статистического малого параметра и не опирается при его выводе на малость константы взаимодействия. Эта особенность позволяет выйти за рамки стандартной теории возмущений и учесть процессы, происходящие на малых расстояниях за очень короткий промежуток времени.

Применительно к квантовой электродинамике эта теория применима как для последовательно полевой теории, так и предложенной одночастичной квантовой электродинамике. Полученные результаты по решению проблем радиационного трения и устранения расходимостей на основе эффекта квантовой нелокальности в одночастичной КЭД могут быть распространены и обобщены на полевую теорию. Таким образом, по крайней мере в КЭД имеется альтернатива теории перенормировок с возможностью выхода за рамки стандартной теории возмущений.

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

- [1*] Вайнберг С., Квантовая теория поля. Т. 1. Общая теория. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [2*] Ford G. W., Lewis J. T., O'Connell R. F. Quantum oscillator in a blackbody radiation field//Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 2273.
- [3*] Barone P. M., Caldeira A. O. Quantum mechanics of radiation damping//Phys. Rev. A. 1991. V. 43. P. 57.
- [4*] Hakim V., Ambegaokar V. Quantum theory of a free particle interacting with linearly dissipative environment//Phys. Rev. A. 1985. V. 32. P. 423.
- [5*] Швингер Ю. Броуновское движение квантового осциллятора. Сб. статей. М.: ИЛ. 1962. С. 96-167.
- [6*] Senitzky I. R. Dissipation in quantum mechanic. The harmonic oscillator // Phys. Rev. 1960. V. 119. P. 670.

- [7*] Ефремов Г.Ф. Квантовая теория радиационного затухания релятивистского электрона //ЖЭТФ. 1996. Т. 110. С. 1629.
- [8*] Welton T.A. Some observable effects of the quantum-mechanical fluctuations of the electromagnetic field // Phys. Rev. 1948. V. 74, P. 1157.
- [9*] Швингер Ю. Частицы, источники, поля. Т.2. М. Мир, 1976.
- [10*] Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М. Наука. 1989.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В. Эффект квантовой нелокальности и радиационное затухание электрона Дирака. //ЖЭТФ, 2004, том 125, вып. 2, стр. 195-204.
2. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В. Расходимости и перенормировки в одночастичной модели квантовой электродинамики. //Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Вып. 20. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. С. 101-113.
3. Ефремов Г. Ф., Шарков В. В. Броуновское движение нерелятивистского электрона в фотонном термостате. //Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Вып. 21. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. С. 109-117.
4. Ефремов Г. Ф., Шарков В. В. Радиационное затухание электрона Дирака. //Вестник ННГУ. Математическое моделирование и оптимальное управление. Вып. 25. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. С. 141-154.
5. Ефремов Г.Ф., Мареева О.В., Воробьев Д.А., Шарков В.В. Статистическая теория радиационной силы трения электрона в фотонном и фононном полях. //Актуальные проблемы статистической радиофизики (Малаховский сборник), 2003, том 2, стр. 5-40.
6. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В., Петров Д.А. Квантово-статистическая теория радиационных эффектов без расходимостей. //Актуальные проблемы статистической радиофизики (Малаховский сборник), 2007, том 6, стр. 3-35.
7. Efremov G.F., Sharkov V.V., Krupennikov D.V. "Non-divergent statistical quantum electrodynamics". //International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC), 2008, v.18, No.9, p. 2817-2824.
8. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В. Квантово-статистическая теория радиационного трения релятивистского электрона. //ТМФ, 2009, том 158, №3, стр. 478-496.
9. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В. Броуновское движение нерелятивистского электрона в фотонном термостате //Труды третьей научной конференции по радиофизике. 7 мая 1999 г. /Ред. А.В.Якимов. Н.Новгород: ННГУ, 1999. С. 56-58.

10. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В. К теории радиационного затухания электрона Дирака //Труды четвертой научной конференции по радиофизике. 5 мая 2000 г. /Ред. А.В.Якимов. Н.Новгород: ТАЛАМ, 2000. С. 60-61.
11. Ефремов Г.Ф., Курбатов Р.А., Новиков М.А., Шарков В.В., Проблемы квантовой статистической нелинейной оптики. //Труды четвертой научной конференции по радиофизике. 5 мая 2000 г. /Ред. А.В.Якимов. Н.Новгород: ТАЛАМ, 2000. С. 12-18.
12. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В., Причинность и квантовая нелокальность теории радиационного затухания электрона Дирака //Труды (пятой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А.Андропова. 7 мая 2001 г. /Ред. А.В.Якимов. Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2001. С.63-64.
13. Ефремов Г.Ф., Шарков В.В. Радиационное затухание и лэмбовский сдвиг уровней с учетом эффекта квантовой нелокальности электрона Дирака //Труды (шестой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения М.Т.Греховой. 7 мая 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. - Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2002. С. 65-66.

Подписано в печать _____. Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. Печ. л.1.

Заказ _____. Тираж 100 экз.

Типография Нижегородского госуниверситета.

603950 Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.