

На правах рукописи

ПЕТРОВ Дмитрий Алексеевич

**Немарковская теория релаксации спиновых моментов электронов,
взаимодействующих со случайными полями в вакууме и конденсированных
средах**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Сатанин А.М.
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

кандидат физико-математических наук,
доцент Шондин Ю.Г.
НГПУ им. К. Минина

Ведущая организация: ФГБНУ «Научно-исследовательский радиофизический институт»

Защита состоится «___»_____2013 года в «___» часов 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. __, ауд. ____.

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

Автореферат разослан «___»_____2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Для науки в целом историческое значение гипотезы о существовании внутренней степени свободы электронов [1], и ее подтверждение в опытах Штерна и Герлаха [2], является огромным, связанным не только с фундаментальным характером этого открытия, определяющим новые свойства материи, но и с его следствиями, важность и значение которых для современной физики сложно недооценить. Последующее за этим открытием исследование свойств и проявлений спиновой степени свободы в различных физических системах привело к обнаружению множества важных эффектов, давших импульс развитию новых направлений в науке и технике.

В настоящее время область спин-зависимых явлений интенсивно развивается сразу в нескольких направлениях, и тесно переплетена с различными разделами современной физики и химии. Это обусловлено в первую очередь необходимостью при описании многих тонких физических процессов учитывать спиновую степень свободы [3], приводящую, например, к таким важным эффектам, как эффект поляризации и деполяризации электронных пучков в накопительных кольцах [4], спиновый эффект Холла [5], эффект оптической ориентации носителей заряда в кристаллах [6]-[7], комбинированный резонанс [8] и многие другие. Это говорит о том, что область спин-зависимых явлений по своей структуре многогранна, и часто в фокусе ее исследований оказываются спиновые системы, имеющие различную физическую природу.

Однако наиболее впечатляюще результаты в области спин-зависимых явлений были получены в физике конденсированного состояния, связанные с эффектами оптической ориентации носителей заряда в кристаллах и гигантского магнетосопротивления [9], способствовавшие возникновению новой ветви твердотельной электроники, в последствии получившей название спинтроники [10]-[12]. Основная цель спиновой электроники заключается в изучении спин-зависимых оптических и транспортных явлений с целью создания спин-электронных приборов для хранения и обработки информации [7, 12-13]. В качестве примера, демонстрирующего достижения этого направления, следует отметить такие принципиально новые устройства, как спиновый вентиль, спиновый диод и транзистор, спиновые фильтры, а также квантовый компьютер с электронными спиновыми состояниями [12].

Все это в совокупности делает чрезвычайно важным изучение спин-зависимых явлений, что диктуется с одной стороны необходимостью исследовать свойства и физические процессы, протекающие в этих системах, а с другой определяется практической проблемой управления их состояниями.

В теоретическом плане решение этих задач предполагает изучение динамики спиновых систем с учетом действия определенного окружения и внешних электромагнитных полей. Другими словами, задача заключается в исследовании процесса установления равновесия, т.е. процесса релаксации в спиновых системах. Данная проблема имеет достаточно длинную историю, и ей посвящено большое число как теоретических, так и экспериментальных работ. Важность и актуальность изучения процессов спиновой релаксации определяется с одной стороны их решающей ролью в спектроскопических исследованиях строения вещества, а с другой тем, что релаксация спиновых систем представляет собой простейший пример необратимого процесса, на основе которого могут быть поняты некоторые общие закономерности физической кинетики [14]. С теоретической точки зрения исследование свойств спиновых систем и процесса их релаксации предполагает вывод и решение уравнений, описывающих их динамику под действием внешних полей и окружения. Интегрирование этих уравнений позволяет определить основные характеристики рассматриваемых систем, а также их зависимость от внешних и внутренних параметров, что открывает возможность практического управления спиновыми состояниями.

При этом часто данная проблема сильно усложняется необходимостью при ее решении учитывать множество различных особенностей, сильно влияющих на свойства спиновых систем, среди которых во многих случаях существенную роль играют как внешние факторы, например, стохастичность внешних полей и окружения, их неравновесность, так и внутренние, среди которых особое значение имеют шумы, определяющие нижние пределы величин сигналов, которые могут быть обработаны средствами электроники и, в частности, спинтроники (спиновые

шумы [15]-[18]). Кроме этого, в некоторых случаях при описании спиновой динамики оказывается недостаточным марковское приближение в исходных уравнениях и становится необходимым рассматривать эффекты, связанные с наличием памяти в системе. Важность эффектов памяти была осознана достаточно давно, что послужило стимулом для создания соответствующего математического аппарата [19]. В настоящее время данная тематика привлекает большое внимание как теоретиков, так и экспериментаторов в различных областях физики и особенно в физике конденсированного состояния, что связано в первую очередь с проблемами воздействия короткими и мощными электромагнитными полями на вещество [20]-[21] и, в частности, с проблемами возбуждения лазерными импульсами электронов в полупроводниках [22]-[23]. Таким образом, часто является необходимым при описании спиновой динамики выйти за рамки марковского приближения, и исследовать процессы релаксации спиновых систем с учетом эффекта памяти.

Поэтому вычисление основных характеристик спиновых систем, таких как времена релаксации, резонансные частоты, равновесные значения, спиновые восприимчивости, спектр флуктуаций и многих других, а также определение возможного изменения этих параметров при вариациях внешнего воздействия является одной из самых актуальных теоретических задач в этой области, требующей совместного учета различных факторов и особенностей. В частности, в спинтронике и ее приложениях большое значение имеют системы, состоящие из спиновых моментов электронов, взаимодействующих с различными диссипативными окружениями, среди которых наиболее существенную роль играют поле излучения и поле фононов кристаллической решетки. Другими словами, в свете основных проблем спинтроники и спиновой физики вообще представляет большой теоретический интерес определение свойств и параметров этих систем в случае, когда задействованы большинство из указанных выше особенностей.

Сложность данной проблемы делает необходимым при ее исследовании использовать разнообразные физические модели, акцентирующие свое внимание на наиболее важных свойствах рассматриваемых систем, построение которых также является нетривиальной задачей. Поэтому является актуальной разработка и исследование моделей, позволяющих описывать динамику этих систем с учетом разнообразных внешних и внутренних их особенностей. Решению некоторых вопросов этой общей проблемы и посвящена диссертационная работа, основные цели которой могут быть сформулированы следующим образом.

Цели диссертации:

1. Построение двух дополняющих друг друга микроскопических моделей кинетики спинового момента электронов, взаимодействующих в одном случае с фотонным, а в другом с фононным диссипативным окружением, позволяющих единым образом описывать релаксационные и флуктуационные процессы в этих системах, а также учесть вклад эффекта памяти в их динамику;
2. Теоретическое определение и исследование основных характеристик этих систем, таких как времена релаксации, равновесные значения, отклик на действие переменного магнитного поля, т.е. их спиновую восприимчивость, а также зависимость этих характеристик от параметров систем, например, частоты и напряженности магнитного поля, температуры кристалла и некоторых других;
3. Исследование влияния эффекта памяти и флуктуаций переменных окружения на искомые характеристики рассматриваемых систем.

Научная новизна работы определяется как методом, использованным при исследовании процессов релаксации в рассматриваемых спиновых системах, так и результатами, полученными при решении поставленных задач. В частности, в диссертации:

1. Разработаны две микроскопические модели кинетики спинового момента электронов в фотонном и фононном окружениях, позволяющие учитывать эффекты памяти, а также единым образом описывать флуктуационные и диссипационные процессы в изучаемых системах;
2. Получены немарковские стохастические уравнения для спинового момента электронов со строго определенными флуктуационными источниками и силой трения,

учитывающей принцип причинности, а также реакцию переменных окружения и их статистические свойства;

3. Впервые в задаче о радиационном трении спинового момента электрона рассмотрен вклад эффекта осцилляций Шредингера и корреляции электронных плотностей, последовательное вычисление которой позволило в данной задаче обойти процедуру перенормировки;
4. Получены аналитические выражения для спиновой восприимчивости и времени релаксации в наиболее общем немарковском случае, а также выявлены частотные и температурные особенности этих характеристик, связанные эффектом памяти;
5. Проанализировано влияние флуктуаций переменных окружения на частоту прецессии спинового момента электрона.

Теоретическая и практическая значимость диссертации заключается в следующем. В первую очередь ее результаты могут быть использованы при исследовании свойств и параметров неравновесных спиновых систем, обладающих эффектом памяти, а также для вычисления и изучения их статистических характеристик, таких как функции корреляции различного порядка, спектр флуктуаций и др. Во-вторых, произведенный в диссертации анализ некоторых аспектов стохастической динамики спинового момента электронов может оказаться полезным при определении влияния немарковских эффектов и флуктуаций переменных диссипативного окружения на состояния спиновых систем, а также при прогнозировании возможного изменения этих состояний. Кроме этого, полученные аналитические выражения, учитывающие эффекты памяти, и характеризующие процесс релаксации спинового момента электронов, важны при исследовании спин-электронного транспорта в полупроводниковых структурах, и могут быть использованы при создании приборов на спиновых эффектах. Этим, в частности, определяется прикладное значение диссертации для современной радиофизики и спиновой электроники.

Положения, выносимые на защиту

1. Построенные микроскопические модели кинетики спинового момента электронов в фотонном и фононном окружениях позволяют:
 - a) получить стохастическое уравнение, а также выражения для флуктуационных источников, силы радиационного и фононного трения, описывающие броуновское движение и процесс релаксации спинового момента в наиболее общем немарковском случае;
 - b) определить времена релаксации и спиновую восприимчивость с учетом эффекта памяти;
 - c) из интегро-дифференциальных стохастических уравнений получить уравнения Блоха с микроскопически определенными временами релаксации, равновесными значениями и немарковскими поправками.
2. В рамках данных моделей показано, что рассматриваемые системы обладают оптической активностью, проявляющейся в зависимости поперечного времени релаксации спинового момента от частоты внешнего магнитного поля, и связанной с наличием обратных связей в этих системах.
3. Частотная зависимость поперечного времени релаксации имеет разные свойства для правой и левой круговых поляризации магнитного поля. В случае правой круговой поляризации с увеличением частоты время релаксации сначала возрастает, достигая при определенных частотах максимального значения, а потом убывает, асимптотически стремясь к нулю обратно кубу частоты при взаимодействии электрона с фотонами, а также обратно пятой и четвертой степени частоты при низких и высоких температурах кристалла в случае электрон-фононного взаимодействия. Для левой круговой поляризации время релаксации при увеличении частоты уменьшается, стремясь к нулю так же, как в случае правой круговой поляризации.
4. Спиновая восприимчивость рассматриваемых систем при частотах порядка частоты спиновой прецессии практически совпадает с марковским вариантом, следующим из решения уравнений Блоха. В случае, когда частота магнитного поля много больше частоты прецессии, существенную роль начинает играть эффект памяти, вызывающий

искажения и деформацию формы спиновой восприимчивости, и приводящий к возникновению новых ее свойств. В частности, в линии поглощения системы появляются два дополнительных резонанса, а также частоты, при которых системы становятся квазипрозрачными, имеющими минимум поглощения.

5. Влияние флуктуаций переменных фотонного и фононного окружений приводит к увеличению частоты прецессии спинового момента электрона на небольшую аддитивную поправку, величина которой зависит от параметров системы. В случае радиационного трения сдвиг частоты пропорционален постоянной тонкой структуры, тогда как для фононного трения этот эффект определяется константой электрон-фононного взаимодействия и температурой кристалла. Причем с ростом температуры частота прецессии увеличивается, и асимптотически растет пропорционально первой степени температуры.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 6 статей [A1]-[A6] в рецензируемых журналах и 3 работы [A7]-[A9] в сборниках трудов конференций.

Основные результаты диссертации обсуждались на семинарах кафедры квантовой радиофизики ННГУ, а также докладывались на следующих конференциях: Ежегодная региональная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, 2007-2011 гг.; Нижегородская сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 2008-2011 гг.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, списка работ, опубликованных по теме диссертации и списка литературы. Объем работы составляет 167 страниц, включая 11 рисунков, библиографию из 394 наименований и списка работ автора из 9 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** рассматривается актуальность темы, кратко излагается содержание работы, формулируются ее цели и основные результаты. Обсуждаются методы решения поставленных задач, описывается новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1 имеет методический характер, и посвящена краткому изложению исходных положений концепции открытых систем и метода квантовых нелинейных стохастических уравнений, с помощью которых описываются флуктуационно-диссипационные процессы в рассматриваемых спиновых системах. Введены основные понятия и определения метода, такие как S-матрица, линейные и нелинейные функции реакции, обобщенные восприимчивости и др. В представлении Гейзенберга произведен вывод нелинейного стохастического уравнения и флукуационных источников для операторов физических величин открытой квантовой системы, взаимодействующей с внешними переменными полями и гауссовым окружением, находящимся в состоянии термодинамического равновесия. Получено выражение для нелинейной силы трения, действующей со стороны окружения и его флуктуаций на систему. В заключении формулируются основные результаты этой главы.

В **Главе 2** рассматривается задача о динамике спинового момента электрона, взаимодействующего с собственным полем излучения и флуктуациями электромагнитного вакуума в наиболее общем немарковском случае. Данная задача является важной и актуальной в ряде разделов современной физики. В частности, радиационное трение магнитного момента принципиально при проектировании циклических ускорителей, и является причиной таких эффектов, как поляризация и деполяризация электронных и позитронных пучков в накопительных кольцах. Кроме этого, задача о радиационном трении магнитного момента встречается в астрофизике при исследовании динамики магнитного момента пульсаров и нейтронных звезд, а также в физике конденсированного состояния при изучении процессов спиновой релаксации, в которых радиационные каналы играют большую роль. Таким образом, существует необходимость в построении общих моделей, объединяющих некоторые характерные черты разнообразных

физических систем, в которых радиационное трение магнитного (спинового) момента является наиболее важным. Построению и исследованию одной из таких моделей и посвящена эта глава.

В параграфе 2.1 определяются цели исследования, приводится краткий обзор работ по изучаемой проблеме. Дается постановка задачи. Производится разделение исходной системы на открытую подсистему и диссипативное окружение. Формулируются основные приближения как относительно силы взаимодействия между подсистемами, так и физических свойств окружения. Записывается полный гамильтониан исходной системы.

Параграф 2.2 посвящен выводу немарковских стохастических уравнений, описывающих динамику проекций оператора спинового момента нерелятивистского электрона, находящегося во внешнем магнитном поле, и взаимодействующего с собственным полем излучения и флуктуациями электромагнитного вакуума. Определены компоненты силы радиационного трения и флуктуационного источника. Установлено, что в общем случае сила трения состоит из двух самостоятельных частей, одна из которых обусловлена конфигурационным движением электрона, а вторая его спиновым моментом. Показано, что в каждой из них присутствуют два механизма трения, связанные между собой флуктуационно-диссипационной теоремой, и определяющиеся функцией Грина фотонов и функцией корреляции переменных электромагнитного окружения. Установлено, что в приближении слабых магнитных полей (изотропного пространства) часть радиационной силы трения, связанная с конфигурационным движением электрона, оказывается равной нулю, и не дает вклада в спиновую релаксацию.

Большое внимание уделено вопросу нелинейной зависимости силы трения от переменных электрона и, в частности, проблеме «распутывания» произведения операторов электронных плотностей $e^{i\mathbf{kr}(t)}e^{-i\mathbf{kr}(t)}$. В связи с тем, что электрон обладает внутренней структурой, наиболее заметно проявляющейся в сильной корреляции конфигурационных и спиновой степеней свободы в релятивистском случае и в существовании эффекта осцилляций Шредингера (Zitterbewegung), данная задача решена с учетом указанной особенности, определенным образом влияющей на некоторые полученные результаты.

Произведено упрощение выражения для силы радиационного трения. Показано, что в приближениях изотропного пространства и свободной прецессии сила трения существенно упрощается, и становится линейной по спиновым переменным. При этом стохастические уравнения для проекций спинового момента $s_i(t)$ ($i = x, y, z$) принимают вид

$$\frac{ds_i(t)}{dt} - \gamma_0[\mathbf{s}(t) \times \mathbf{B}]_i = s_0 \gamma_z \delta_{iz} - \int_{-\infty}^{+\infty} dt_1 \gamma_{ij}(\tau) s_j(t_1) + \xi_i(t), \quad (1)$$

где \mathbf{B} – внешнее магнитное поле, $s_0 = \hbar/2$, $\gamma_{ij}(\tau)$ и γ_z – коэффициенты радиационного трения, $\xi_i(t)$ – флуктуационные источники, имеющие равные нулю средние значения по вакуумному состоянию электромагнитного окружения.

Согласно (1), динамика спинового момента определяется коэффициентами радиационного трения $\gamma_{ij}(\tau)$, учитывающими в уравнении (1) принцип причинности, и содержащими в данной модели наиболее полную информацию о действии поля излучения и флуктуаций электромагнитного вакуума.

В заключение данного параграфа обсуждается вопрос об условиях, при которых в рамках сделанных приближений уравнение (1) применимо для описания рассматриваемой системы.

Параграф 2.3 посвящен решению стохастических уравнений (1) и, в частности, определению и исследованию спиновой восприимчивости системы с учетом эффекта памяти.

В разделе 2.3.1 на основе системы, образованной из усредненных уравнений (1) по вакуумному состоянию электромагнитного окружения, рассматривается динамика проекций спинового момента $s_i(t) = \langle s_i(t) \rangle_0$ ($i = x, y, z$) при действии на электрон внешнего переменного магнитного поля, которое удобно записать в виде

$$\mathbf{B} = \mathbf{x}_0 B_1 \cos(\omega t) + \mathbf{y}_0 B_1 \sin(\omega t) + \mathbf{z}_0 B_0 = \mathbf{B}_\perp(t) + \mathbf{z}_0 B_0, \quad (2)$$

позволяющем рассматривать как левую ($\omega > 0$), так и правую ($\omega < 0$) круговые поляризации.

Из решения полученной системы определен линейный отклик спиновой подсистемы на действие переменного магнитного поля $\mathbf{B}_\perp(t)$:

$$\begin{pmatrix} s_x(t) \\ s_y(t) \end{pmatrix} = \hat{\chi}(\omega) B_1 \begin{pmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\hat{\chi}(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega)$ есть искомая спиновая восприимчивость.

Результаты произведенных вычислений показывают, что как времена релаксации, так и $\hat{\chi}(\omega)$ определяются коэффициентами радиационного трения γ_{ij} .

В разделе 2.3.2 на основе аппарата обобщенных функций вычисляется частотная зависимость γ_{ij} . Показано, что они имеют действительную и мнимую составляющие, нелинейным образом зависящие от частоты.

В разделе 2.3.3 производится анализ и обсуждение полученных результатов. В первую очередь определены выражения для поперечного и продольного времени релаксации:

$$\frac{1}{T_{\text{tr}}(\omega)} = \frac{\alpha}{3} \Omega \left(\left| \frac{\omega}{\Omega} \right|^3 \cos\left(\rho \frac{\omega}{\Omega}\right) + \left| \frac{\omega + \omega_0}{\Omega} \right|^3 \cos\left(\rho \frac{\omega + \omega_0}{\Omega}\right) \right), \quad (4)$$

$$\frac{1}{T_l} = \frac{2\alpha}{3} \Omega \left| \frac{\omega_0}{\Omega} \right|^3 \cos\left(\rho \frac{\omega_0}{\Omega}\right), \quad (5)$$

справедливые при $\omega < \Omega$ и $\omega_0 \ll \Omega$, где ω – частота внешнего магнитного поля, $\omega_0 = eB_0 / mc$ – частота прецессии спинового момента, $\alpha = e^2 / \hbar c$ – постоянная тонкой структуры, $\Omega = mc^2 / \hbar \approx 7.7 \cdot 10^{20}$ рад·с⁻¹, $\rho = 1/\sqrt{2}$ – численный параметр, связанный в данной модели с учетом внутренней структуры электрона в задаче о «распутывании» произведения операторов электронных плотностей. В формулах (4)-(5) и далее прямые скобки $| |$ обозначают модуль.

Как показывает формула (4), учет эффекта памяти приводит, во-первых, к зависимости поперечного времени релаксации от частоты магнитного поля, имеющей ряд особенностей (Рис. 1). В частности, $T_{\text{tr}}(\omega)$ обладает разными свойствами для правой ($\omega < 0$) и левой ($\omega > 0$) круговых поляризацій магнитного поля, что означает асимметрию свойств спиновой подсистемы для $\omega < 0$ и $\omega > 0$, что свидетельствует о своего рода оптической активности данной системы.

Проведено исследование частотной зависимости спиновой восприимчивости. Показано, что при переходе к переменной $y = \omega / \omega_0$, $\hat{\chi}(\omega)$ является функцией двух безразмерных параметров: $d = B_1 / B_0 \sqrt{2}$ и $\varepsilon = \alpha \omega_0^2 / 3\Omega^2 \ll 1$. При $d \ll 1$ на частотах $y \sim 1$ форма $\hat{\chi}(\omega)$ практически совпадает с марковским вариантом, следующими из решения уравнений Блоха (Рис. 2(A,D)). В области $y \gg 1$ начинают проявляться немарковские эффекты, приводящие к возникновению двух дополнительных резонансов (Рис. 2(C)). При увеличении параметра d , когда $d \sim 1$ или $d > 1$, в $\hat{\chi}(\omega)$ возникают заметные искажения и деформации, связанные с проявлением эффекта памяти и зависимостью поперечного времени релаксации от частоты (Рис. 2(B,D)).

Определена асимптотика действительной и мнимой частей восприимчивости при больших частотах $|y| \gg 1$. В этом случае $\chi' \sim \omega^{-5}$ и $\chi'' \sim |\omega|^{-3}$, что также является одним из проявлений немарковского характера взаимодействия, поскольку в марковском случае $\chi'(\omega) \sim \omega^{-1}$ и $\chi''(\omega) \sim \omega^{-2}$.

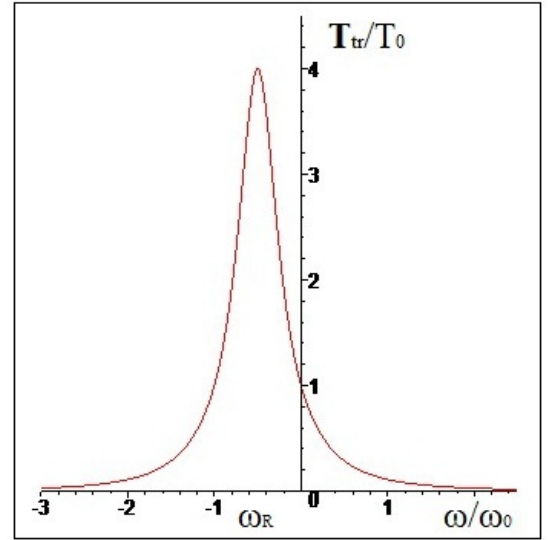


Рис. 1. Зависимость поперечного времени релаксации от отношения частот ω / ω_0 .

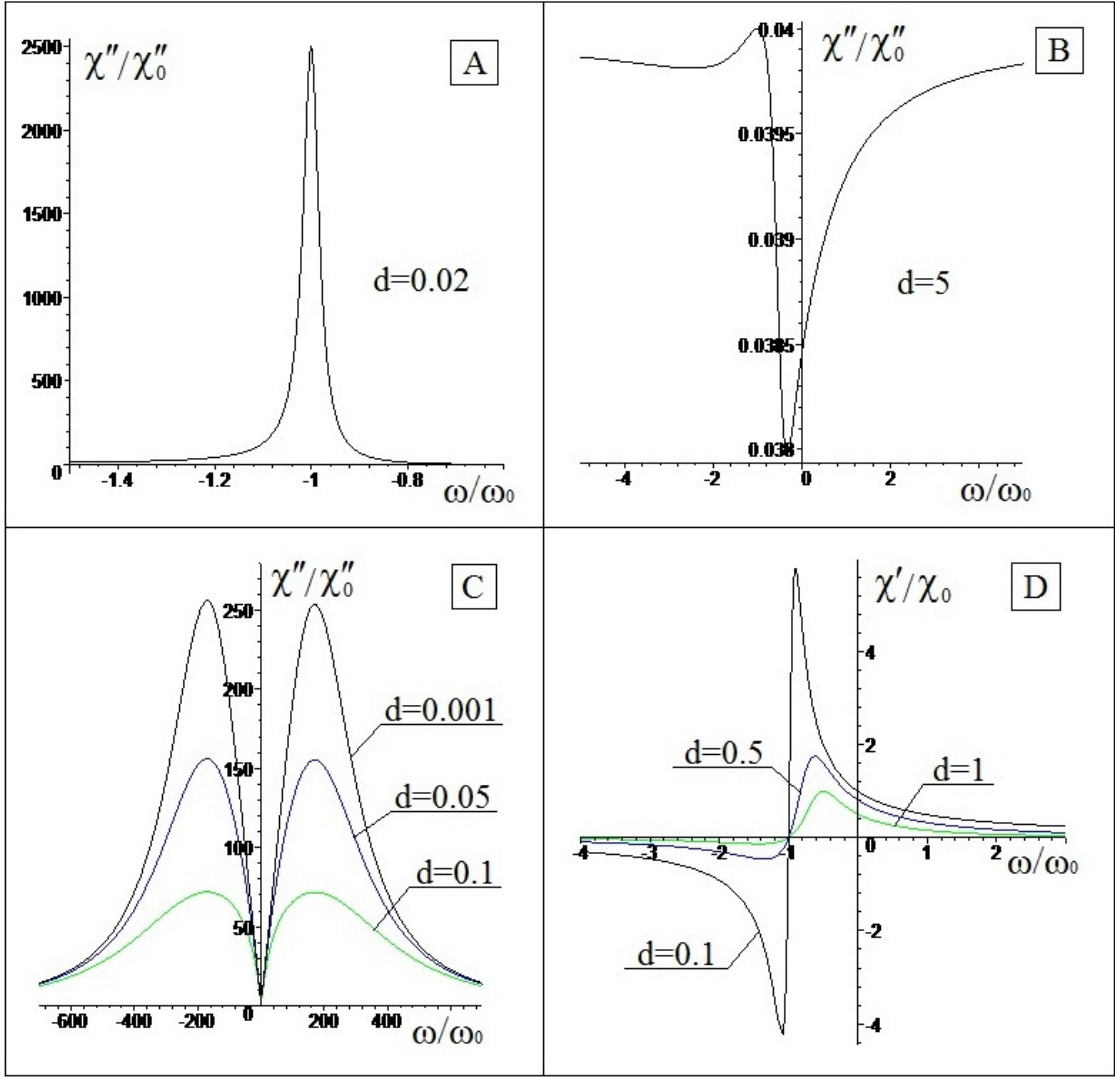


Рис. 2. Зависимость действительной $\chi'(\omega)$ и мнимой $\chi''(\omega)$ частей спиновой восприимчивости от отношения частот ω/ω_0 при различных значениях параметра d .

В параграфе 2.4 решается задача о переходе от стохастических уравнений (1) к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, т.е., другими словами, рассматривается вопрос о марковском предельном случае в данной модели. Установлено, что в математическом плане он соответствует пренебрежению частотной зависимостью коэффициентов радиационного трения, когда $\gamma_{ij}(\omega) \approx \gamma_{ij}(0)$ ($\gamma_{ij}(\tau) \approx \gamma_{ij}\delta(\tau)$). При этом немарковские поправки определяются как коэффициенты разложения $\gamma_{ij}(\omega)$ в ряд по малому параметру, роль которого в данной модели играет отношение ω/Ω . С учетом этого показано, что стохастические уравнения (1) переходят в уравнения Блоха с микроскопически определенными временами релаксации и равновесными значениями:

$$\frac{ds_i(t)}{dt} = \frac{s_i^{(0)} - s_i(t)}{\tau_i} + \sum_{l=0} a_{ij}^{(l)} \frac{d^l s_j(t)}{dt^l} + \xi_i(t), \quad (6)$$

где τ_i и $s_i^{(0)}$ – искомые времена релаксации и равновесные значения, $a_{ij}^{(l)}$ – тензор, элементы которого определяют немарковские поправки в (6),

$$s_x^{(0)} = s_y^{(0)} = 0, \quad s_z^{(0)} = s_0 \cos\left(\rho \frac{\omega_0}{\Omega}\right), \quad (7)$$

$$\frac{1}{\tau_x} = \frac{1}{\tau_y} = \frac{\alpha\omega_0}{3} \left(\frac{\omega_0}{\Omega}\right)^2, \quad \tau_z = 2\tau_{x,y}. \quad (8)$$

В параграфе 2.5 изучается эффект изменения частоты прецессии спинового момента, обусловленный флуктуациями электромагнитного вакуума. Показано, что в результате взаимодействия электрона и электромагнитного вакуума происходит увеличение частоты прецессии спинового момента на небольшую аддитивную поправку, пропорциональную постоянной тонкой структуры:

$$\tilde{\omega}_0 = \omega_0(1 + \Delta), \quad (9)$$

где

$$\Delta = \frac{8\alpha}{3\pi} f(1/\sqrt{2}) \approx 0.0003504, \quad (10)$$

$f(\rho)$ – интегральная функция параметра $\rho = 1/\sqrt{2}$.

Следует отметить, что соотношение (10) имеет одну особенность, связанную с проблемой бесконечностей в радиационных эффектах, таких, например, как лэмбовский сдвиг или аномальный магнитный момент. Как показано в многочисленных работах, для правильного вычисления численных значений этих эффектов необходимо произвести либо перенормировку фундаментальных констант, либо процедуру обрезания, устранив тем самым из получающихся выражений логарифмически расходящиеся члены.

В данной модели указанная проблема находит естественное разрешение через учет некоторых свойств внутренней структуры электрона, проявляющихся в существовании параметра ρ в выражении (10), наличие которого делает значение Δ конечным. При этом если пренебречь указанными свойствами, т.е. считать, что $\rho = 0$, то в (10) возникает традиционная для радиационных эффектов логарифмическая бесконечность, причем сдвиг частоты $\Delta = \Delta_0 - \lim_{a \rightarrow \infty} \ln(a)$, т.е. будет иметь отрицательный знак.

Проведено сравнение величины Δ , с эффектом аномального магнитного момента электрона, который также приводит к увеличению частоты прецессии. Показано, что $\Delta_{am} \approx 3.3 \cdot \Delta$, т.е. в несколько раз больше, чем сдвиг, вызванный радиационным трением.

Основные результаты второй главы сформулированы в параграфе 2.6.

Вопросы, рассматриваемые в Главе 3, связаны с проблемой релаксации спиновых систем, находящихся в контакте с диссипативным окружением в конденсированных средах. В настоящей главе методом стохастических уравнений исследуется задача о динамике спинового момента электронов проводимости, взаимодействующих с полем фононов и его флуктуациями в ковалентных немагнитных кристаллах с центром симметрии, находящихся во внешнем магнитном поле с учетом спин-орбитальной связи.

Данная задача является важной в ряде направлений спиновой физики, например, при интерпретации исследований радиоспектроскопическими методами строения вещества (эффекты парамагнитного, ядерного и комбинированного резонансов). Но наиболее актуальной она является в области спинтроники при изучении спин-зависимого электронного транспорта в полупроводниковых структурах, а также при создании приборов на спиновых эффектах, для которых принципиальное значение имеет информация о свойствах и процессах протекающих в спиновых системах, например, о спиновых шумах, их статистических характеристиках и некоторых других. Поэтому построение моделей, позволяющих совмещать различные особенности подобных систем, такие как неравновесность, флуктуации, различные переходные процессы, эффекты памяти и многие другие, является необходимым шагом при решении указанной общей задачи. Разработке и исследованию одной из таких моделей и посвящена эта глава.

В параграфе 3.1 дается введение и постановка задачи. Формулируется актуальность проблемы, приводится краткий обзор работ по данной теме. Согласно принципам теории открытых систем, производится разделение изучаемой системы на динамическую подсистему – спиновый момент электрона и на оставшуюся макроскопическую часть – термостат, представляющий собой поле фононов, находящееся в состоянии термодинамического равновесия при температуре T . Рассматриваются основные механизмы релаксации спинового момента в конденсированных немагнитных средах. Формулируются некоторые приближения относительно

изучаемой модели. Определяются статистические свойства термостата, а также записывается полный гамильтониан системы.

Параграф 3.2 посвящен выводу стохастического уравнения для спинового момента электрона проводимости, и его исследованию в некоторых частных случаях. В рассматриваемой системе считается, что электрон проводимости взаимодействует с акустическими фононами, описываемыми в ковалентных кристаллах моделью деформационного потенциала. При этом действие фононов на спин электрона осуществляется через энергию спин-орбитальной связи.

В разделе 3.2.1 на основе приближения замороженного конфигурационного движения электрона из гамильтониана системы получены стохастические уравнения для проекций оператора спинового момента. Определены выражения для силы фононного трения и флуктуационных источников. Установлено, что сила трения аддитивно включает в себя два механизма релаксации спинового момента, связанные между собой флуктуационно-диссипационной теоремой Каллена-Вельтона, и определяющиеся с одной стороны откликом фононной системы на действие электрона, а с другой флуктуациями фононного поля.

Используя приближение свободной прецессии, выделены коэффициенты фононного трения, учитывающие принцип причинности и эффект памяти. При этом стохастическое уравнение для спинового момента электрона упрощается, и совпадает по форме с (1), в котором теперь $\gamma_{ij}(\tau)$ и γ_z являются коэффициентами фононного трения, зависящими от параметров кристалла, таких как период обратной решетки, скорость акустических фононов, температура кристалла и некоторых других. В конце этого раздела обсуждается вопрос об условиях, при которых в рамках используемых приближений полученное стохастическое уравнение позволяет описывать изучаемую систему.

В разделе 3.2.2 на основе аппарата обобщенных функций производится вычисление и анализ частотной зависимости коэффициентов фононного трения. Показано, что они имеют действительную и мнимую составляющие, нелинейным образом зависящие как от частоты магнитного поля, так и температуры кристалла.

В разделе 3.2.3 рассматривается вопрос о переходе в данной модели к марковскому случаю. Оказывается, он возможен, когда безразмерный параметр $p = \omega / \Omega \ll 1$, где ω – частота магнитного поля, $\Omega = c_a q_d$ – характерная частота фононного окружения, c_a – скорость акустических фононов, q_d – период обратной решетки. С учетом этого условия, через разложение коэффициентов фононного трения в ряд по параметру p определены немарковские поправки в стохастическом уравнении в случае низких и высоких температур кристалла. При этом показано, что стохастические уравнения (1) переходят в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (6), т.е. в уравнения Блоха, в которых по-прежнему тензор $a_{ij}^{(l)}$ определяет немарковские поправки. Установлено, что времена релаксации имеют разную форму и значение в зависимости от величины температуры кристалла. Так, в случае низких температур, когда $k_B T / \hbar \Omega \ll 1$, скорость релаксации пропорциональна $\alpha' B_0^5$, и не зависит от температуры. В противоположном случае, когда $k_B T / \hbar \Omega \gg 1$, скорость релаксации пропорциональна $\alpha'' T B_0^4$, где α' и α'' – размерные константы, B_0 – модуль продольной составляющей магнитного поля, а T – температура кристалла. Полученные зависимости совпадают с результатом для процесса релаксации спинового момента, обусловленного модуляцией кристаллического поля, вызванного решеточными колебаниями.

В параграфе 3.3 изучаются свойства системы с учетом эффекта памяти. В наиболее общем немарковском случае решается задача о динамике спинового момента электрона проводимости, на который действует внешнее периодическое во времени магнитное поле с круговой поляризацией – формула (2).

В разделе 3.3.1 получена система интегро-дифференциальных уравнений для средних значений проекций спинового момента с учетом переменного магнитного поля. Вычислены линейный отклик (3) и спиновая восприимчивость $\hat{\chi}(\omega)$, а также продольное и поперечное

времена релаксации. Показано, что они выражаются через коэффициенты фононного трения γ_{ij} и γ_z .

В разделе 3.3.2 проводится анализ и обсуждение полученных результатов. Определены частотная и температурная зависимости поперечного и продольного времени релаксации:

$$\frac{1}{T_{tr}(\omega)} = \beta\Omega \left(\left| \frac{\omega}{\Omega} \right|^5 \coth\left(\frac{|\omega|}{\Omega T_{eff}}\right) + 2 \left| \frac{\omega + \omega_0}{\Omega} \right|^5 \coth\left(\frac{|\omega + \omega_0|}{\Omega T_{eff}}\right) \right), \quad (11)$$

$$\frac{1}{T_l} = \beta\Omega \left| \frac{\omega_0}{\Omega} \right|^5 \coth\left(\frac{|\omega_0|}{\Omega T_{eff}}\right), \quad (12)$$

где ω – частота внешнего магнитного поля, ω_0 – частота прецессии спинового момента, $T_{eff} = 2k_B T / \hbar\Omega$ – эффективная температура, $\beta = E_{el} / E$, $E_{el} = \bar{\pi}^2 / 2m$ – кинетическая энергия электрона, $\bar{\pi}$ – среднее значение кинематического импульса, E – параметр, имеющий размерности энергии. Для типичных значений $q_d \sim 10^8$ рад·см⁻¹, $c_a \sim 10^5$ см·с⁻¹, $M \sim 10^{-22}$ г (суммарная масса атомов, входящих в состав одной элементарной ячейки кристалла, например, $M_{Si} \approx 6.52 \cdot 10^{-22}$ г), параметр E имеет порядок $E \sim 10^6$ эВ. Это означает, что $\beta = E_{el} / E \ll 1$, т.е. является малым параметром в данной модели.

Согласно (11), поперечное время релаксации в отличие от T_l является функцией частоты магнитного поля, что, как и в случае радиационного трения, демонстрирует проявление немарковских эффектов. Графики зависимости T_{tr} от частоты ω и параметра $\delta = \hbar\omega_0 / 2k_B T$ представлены на Рис. 3.

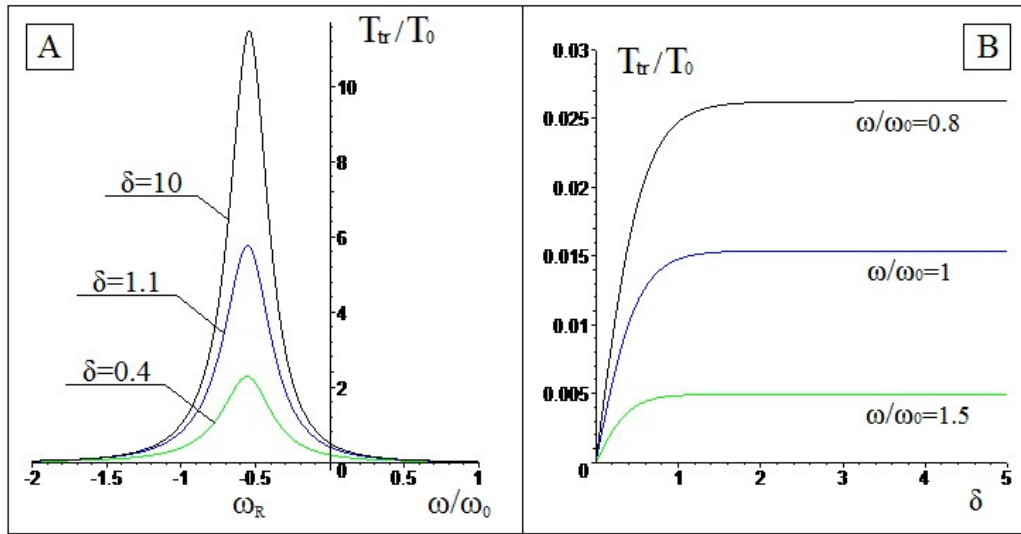


Рис. 3. Зависимость поперечного времени релаксации от отношения частот ω / ω_0 (А) и параметра δ (В).

Из Рис. 3(А) видно, что частотная зависимость T_{tr} имеет различные свойства для правой и левой круговых поляризаций магнитного поля, т.е. асимметрию между правым и левым. Это можно рассматривать как своего рода оптическую активность системы, связанную в данной модели с эффектом памяти. Кроме этого, при уменьшении параметра δ (Рис. 3(В)) T_{tr} стремится к нулю, что объясняется в рамках используемого подхода возрастанием фононного трения, т.е. числа фононов, с которыми взаимодействует электрон при увеличении температуры.

Установлено, что асимптотическое поведение поперечного времени релаксации зависит от величины δ . В случае, когда $\delta \ll 1$, T_{tr} при больших частотах ($\omega \gg \omega_0$) пропорционально ω^{-4} . При $\delta \gg 1$ поперечное время релаксации $T_{tr} \sim |\omega|^{-5}$.

Далее проанализированы частотные и температурные зависимости действительной $\chi'(\omega)$ и мнимой $\chi''(\omega)$ частей спиновой восприимчивости. При переходе к переменной $y = \omega / \omega_0$ показано, что $\hat{\chi}(\omega)$ зависит от параметров: $d = \tanh^{1/2}(1/\delta) \cdot B_1 / B_0 = d_1 \tanh^{1/2}(1/\delta)$ и $\varepsilon = 1/T_0\omega_0 \ll 1$, где $T_0 = \beta\Omega|\omega_0/\Omega|^5$ – продольное время релаксации при нулевой температуре. Величина этих параметров влияет на вид формы линии поглощения (Рис. 4).

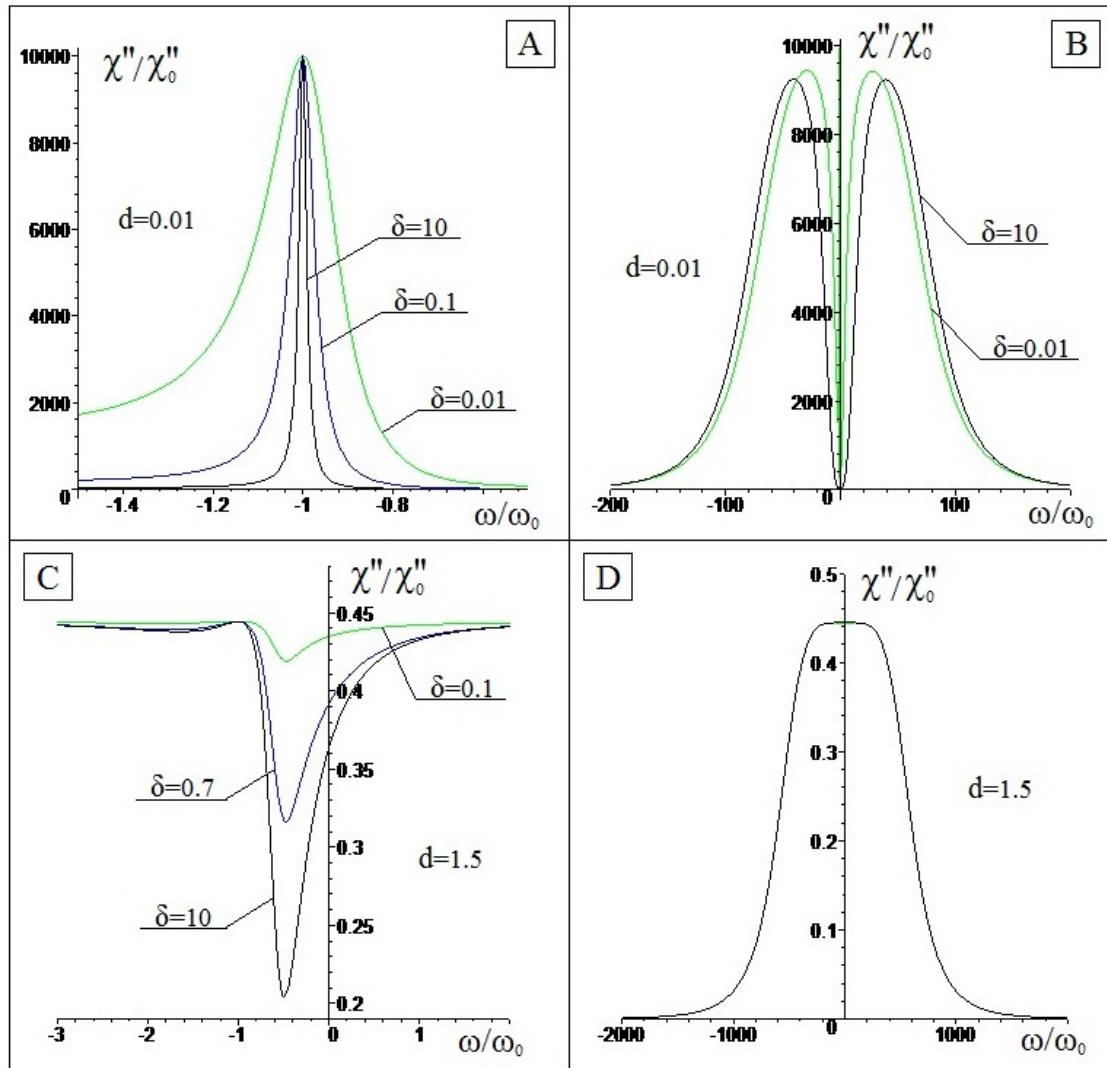


Рис. 4. Зависимость формы линии поглощения χ'' от отношения частот ω/ω_0 при $\varepsilon \sim 10^{-7}$ и различных значениях параметров d и δ .

Кроме этого, определена асимптотическая зависимость действительной и мнимой частей динамической восприимчивости при больших частотах ($\omega \gg \omega_0$) в случае низких и высоких температур кристалла. Показано, что при низких T , когда $\delta \gg 1$, $\chi' \sim \omega^{-9}$ и $\chi'' \sim |\omega|^{-5}$. В противоположном случае, когда $\delta \ll 1$, $\chi' \sim \omega^{-7}$ и $\chi'' \sim \omega^{-4}$.

Еще одна особенность формы линии поглощения $\chi''(\omega)$ связана с ее температурной зависимостью (Рис. 5).

Оказывается при фиксированных частотах и некоторых значениях температуры кристалла $\chi''(\omega)$ имеет максимальное значение (Рис. 5(A)). Это свойство можно рассматривать как эффект температурного резонанса, существующего, как показывает Рис. 5(B), не при всех значениях частот. Проанализирована зависимость δ_R от параметров системы и частоты магнитного поля.

В параграфе 3.4 рассматривается эффект изменения частоты прецессии спинового момента электрона проводимости, обусловленный флуктуациями фононного поля, и заключающийся в увеличении частоты прецессии на небольшую аддитивную поправку:

$$\tilde{\omega}_0 = \omega_0(1 + \Delta(E_{el}, T_{eff})), \quad (13)$$

$$\Delta(E_{el}, T_{eff}) = \frac{E_{el}}{E} b(T_{eff}), \quad (14)$$

где $b(T_{eff}) = b_0 + b_1(T_{eff})$, $b_0 = 1/4\pi$ – определяет вклад нулевых (вакуумных) флуктуаций поля фононов в Δ , а

$$b_1(T_{eff}) = \frac{2}{\pi} \int_0^1 dx \frac{x^3}{e^{2x/T_{eff}} - 1} \quad (15)$$

представляет собой сдвиг частоты, связанный с температурными флуктуациями фононного окружения. В асимптотике при $T_{eff} \gg 1$ из (15) следует, что $b_1(T_{eff}) \approx T_{eff} / 3\pi$, т.е. при больших температурах сдвиг частоты прецессии увеличивается пропорционально температуре кристалла.

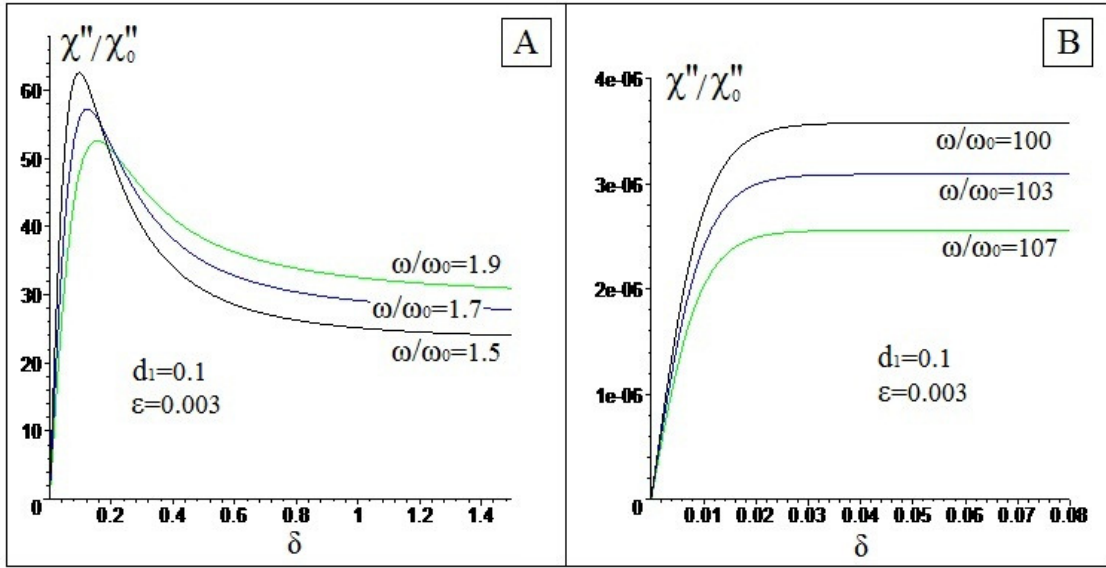


Рис. 5. Зависимость формы линии поглощения χ'' от параметра δ при $\varepsilon \sim 10^{-7}$ и различных значениях отношения частот ω/ω_0 .

Произведена оценка этого эффекта. Например, для температуры $T \sim 10^3$ К, энергии электрона $E_{el} \sim 1$ эВ и типичных значениях параметров кристалла ($E \sim 10^6$ эВ) сдвиг частоты (14) имеет значение $\Delta \sim 10^{-6}$, что, например, на порядок меньше химического сдвига для протонов.

В заключение параграфа обсуждается аналогия между сдвигом частоты прецессии электрона, связанным с флуктуациями фононного поля, и поляронным эффектом.

Основные результаты третьей главы сформулированы в **параграфе 3.5**.

В **Приложении** рассматривается важная для исследуемых во второй главе вопросов задача о характере движения электрона Дирака в постоянном магнитном поле.

В **параграфе 1** дается введение в проблему, а также формулируется постановка задачи. Рассматривается случай свободного движения электрона Дирака. Показано, что это движение в релятивистской квантовой механике имеет сложный осциллирующий характер.

В **параграфе 2** производится в представлении Гейзенберга вывод и решение уравнений для переменных электрона Дирака в слабом постоянном однородном магнитном поле. Получено уравнение для среднего значения оператора скорости электрона Дирака в состоянии $|n\rangle$ ($(E_n - E)|n\rangle = 0$, где E_n - уровни Ландау):

$$\ddot{\mathbf{a}}(t) \frac{i\hbar}{2E_n} - \dot{\mathbf{a}}(t) + [\mathbf{a}(t) \times \boldsymbol{\omega}_0] \frac{mc^2}{E_n} = 0, \quad (16)$$

где $\mathbf{v}(t) = c\mathbf{a}(t) = c\langle \mathbf{a}(t) \rangle_n$ – среднее значение оператор скорости, $\boldsymbol{\omega}_0 = e\mathbf{B}_0 / mc$ – циклотронная частота, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{z}_0 B_0$. В нерелятивистском случае (16) переходит в известное в нерелятивистской физике уравнение прецессии скорости электрона в магнитном поле.

Установлено, что решение для средних значений операторов скорости и координаты в состоянии $|n\rangle$ содержит быстрые и медленные колебания, имеющие частоты $\omega_1 = 2E_n / \hbar$ и $\omega_2 = \omega_0 mc^2 / E_n$, причем $\omega_2 \ll \omega_1$, где E_n – собственное значение энергии электрона Дирака (уровни Ландау).

В параграфе 3 проведено исследование полученных решений. В частности показано, что в отличие от классического релятивистского случая, в котором модуль поперечной к \mathbf{B}_0 скорости электрона $|\mathbf{v}_\perp|$ и радиус его ларморовской орбиты r_L являются постоянными, в релятивистской квантовой механике они перестают быть константами, и становятся осциллирующими функциями времени с периодом колебаний $1/(\omega_1 - \omega_2) \approx 1/\omega_1$. В результате высокочастотных осцилляций среднее значение радиуса ларморовской орбиты увеличивается на небольшую поправку, пропорциональную квадрату магнитного поля.

В параграфе 4 исследована дисперсия приращения координаты электрона Дирака в слабом магнитном поле, характерная особенность которой заключается в том, что она имеет не только традиционную квадратичную зависимость от времени, но и дополнительное быстро осциллирующее слагаемое, представляющее собой одно из проявлений внутренней структуры электрона.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Область спин-зависимых явлений многогранна, и имеет в своей структуре множество направлений, пересекающихся с различными разделами современной физики. Несмотря на это, существует несколько задач, которые объединяют эту область в единое целое. В теоретическом плане одной из них является проблема изучения динамики спиновых систем с целью определения основных свойств и параметров, которые можно использовать в практических целях. Однако часто спиновые системы являются настолько сложными, что при исследовании их свойств приходится использовать разнообразные теоретические модели, акцентирующие свое внимание на наиболее важных особенностях этих систем. Разработке и изучению некоторых из таких моделей и была посвящена настоящая работа. В частности:

1. На основе концепции открытых систем и метода квантовых нелинейных стохастических уравнений построены две микроскопические модели, описывающие броуновское движение и процесс релаксации спиновых моментов электронов, взаимодействующих с фотонным и фононным окружениями в наиболее общем немарковском случае. Данные модели имеют ряд особенностей. В частности, они учитывают определенную взаимосвязь между флуктуациями переменных окружений и эффектами памяти в рассматриваемых системах, и имеют возможность дополнять друг друга при изучении процессов спиновой релаксации в более общих (многоканальных) системах.
2. Для оператора спинового момента электронов получены интегро-дифференциальные стохастические уравнения со строго определенными флуктуационными источниками и силой трения, учитывающей принцип причинности и эффекты памяти, и состоящей из двух взаимосвязанных частей, обусловленных с одной стороны реакцией фотонного и фононного окружений на действие электронов, а с другой их статистической природой, т.е. флуктуациями. Исследован марковский предельный случай в рассматриваемых системах. Показано, что в этом приближении исходные интегро-дифференциальные стохастические уравнения переходят в уравнения Блоха с микроскопически определенными временами релаксации, равновесными значениями и немарковскими поправками.
3. На основе немарковских стохастических уравнений исследованы некоторые статистические свойства спиновых моментов электронов, в частности, динамическая восприимчивость рассматриваемых систем. Вычислены продольное и поперечное времена релаксации. Показано, что они выражаются через коэффициенты радиационного и фононного трения, причем поперечное время релаксации в отличие от продольного является функцией частоты магнитного поля, что

можно рассматривать как эффект дисперсии времени релаксации, являющийся одним из проявлений немарковского характера взаимодействия. Важным следствием этой частотной зависимости является асимметрия поведения поперечного времени релаксации относительно правой и левой круговых поляризаций внешнего магнитного поля, существенно влияющая на динамическую восприимчивость и, в частности, на форму линии поглощения. При определенных условиях, как показало исследование, в линии поглощения возникают дополнительные резонансные частоты, область квазипрозрачности, температурный резонанс, асимметрия для правой и левой круговых поляризаций магнитного поля, что свидетельствует о своего рода оптической активности рассматриваемых систем, связанной с эффектами памяти.

4. Исследован эффект изменения частоты прецессии спинового момента электрона, обусловленный флуктуациями переменных окружений. Показано, что в результате взаимодействия спиновой подсистемы и фотонного (фононного) окружения происходит увеличение частоты прецессии на небольшую аддитивную поправку, зависящую от параметров системы. В случае радиационного трения в результате учета некоторых свойств внутренней структуры электрона сдвиг частоты прецессии оказывается конечным, и не содержит традиционной для радиационных эффектов логарифмической бесконечности. В то же время пренебрежение указанными свойствами приводит в данной модели к логарифмически расходящимся слагаемым.

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Uhlenbeck G.E., Goudsmith S. Ersetzung der hypothese vom unmechanischen zwang durch eine forderung bezuglichdes inneren verhaltens jedes einzelnen elektron //Die Naturwissenschaften. – 1925. – V. 13. – №47. – Pp. 953-954.
- [2] Gerlach W., Stern O. Das magnetische moment dessilberatoms //Z. Phys. – 1922. – V. 9. – Pp. 353-355.
- [3] Dyakonov M.I. Spin physics in semiconductors. Springer, Series in solid state sciences. Berlin, 2008. – 440 p.
- [4] Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч., Борисов А.В. Квантовая электродинамика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. С. 296-302.
- [5] Valenzuela S.O., Tinkham M. Direct electronic measurement of the spin Hall effect // Nature. – 2006. – V. 442. – P. 176.
- [6] Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. Оптические свойства наноструктур. Учебное пособие. СПб.: Наука, 2001. – С. 135-140.
- [7] Кусраев Ю.Г. Спиновые явления в полупроводниках: физика и приложение //УФН. – 2010. – Т.180. – С. 759-773.
- [8] Рашба Э.И. Комбинированный резонанс в полупроводниках //УФН. – 1964. – Т. 84. – С. 557-578.
- [9] Fert A., et al. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices //Phys. Rev. Lett. – 1988. – V. 61. – P. 2472.
- [10] Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. Spintronic: Fundamentals and application //Rev. Mod. Phys. – 2004. – Vol. 76. – P. 323-410.
- [11] Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники //УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 1337-1348.
- [12] Аплеснин С.С. Основы спинтроники: Учебное пособие. 2-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 288 с.
- [13] Awschalom D.D., Loss D., Samarth N. Semiconductor spintronics and quantum computation. Berlin: Springer, 2002. – 311 p.
- [14] Александров И.В. Теория магнитной релаксации. М.: Наука, 1975. – 400 с.
- [15] Muller G.M., Oestreich M., Romer M., Hubner J. Semiconductor spin noise spectroscopy: fundamentals, accomplishments, and challenges //Physica E. – 2010. – V. 43. – Pp. 569-587.
- [16] Crooker S.A., Brandt J., et al. Spin noise of electrons and holes in self-assembled quantum dots //Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 104. – P. 036601.
- [17] Glazov M.M., Sherman E.Ya. Theory of spin noise in nanowires //Phys. Rev. Lett. – 2011. – V. 107. – P. 156602.
- [18] Zapasskii V. S., Greilich A., et al. Optical Spectroscopy of Spin Noise //Phys. Rev. Lett. – 2013. – V. 110. – P. 176601.
- [19] Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982. – 304 с.
- [20] Конуэл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. М.: Мир, 1970. – 384 с.
- [21] Крымский В.В., Балакирев В.Ф. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на свойства вещества //ДАН. – 2002. – Т. 385. – №6. – С. 786-787.
- [22] Haug H., Jauho A.-P. Quantum kinetics in transport and optics of semiconductors. – Berlin/Heidelberg: Springer, 1997.
- [23] Shah J. Ultrafast spectroscopy of semiconductor microstructures. – Berlin/ Heidelberg: Springer, 1996.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [А.1] Ефремов Г.Ф., Петров Д.А. Радиационное трение спинового магнитного момента в присутствии поля электромагнитного вакуума // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Радиофизика. – 2010. – №2(1). – С. 75-83.
- [А.2] Ефремов Г.Ф., Петров Д.А. О характере движения электрона Дирака в постоянном магнитном поле // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2011. – №2(1). – С. 170-180.
- [А.3] Ефремов Г.Ф., Петров Д.А. К вопросу о «распутывании» произведения операторов электронных плотностей в релятивистской квантовой теории // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2011. – №5(1). – С. 155-163.
- [А.4] Петров Д.А. К вопросу о влиянии электрон-фононного взаимодействия и флуктуаций фононного поля на релаксацию спинового момента электрона проводимости в немагнитных кристаллах. I // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Физика твердого тела. 2013 (в печати).
- [А.5] Петров Д.А. К вопросу о влиянии электрон-фононного взаимодействия и флуктуаций фононного поля на релаксацию спинового момента электрона проводимости в немагнитных кристаллах. II // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Физика твердого тела. 2013 (в печати).
- [А.6] Ефремов Г.Ф., Шарков В.В., Петров Д.А. Квантово-статистическая теория радиационных эффектов без расходимостей // Актуальные проблемы статистической физики (Малаховский сборник). – 2007. – Т.6. – С. 3-35.
- [А.7] Ефремов Г.Ф., Петров Д.А. Радиационное затухание магнитного момента нерелятивистского электрона // Сб. XIII нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины: Тезисы докладов. Нижний Новгород. – 2008. – С. 68-70.
- [А.8] Ефремов Г.Ф., Петров Д.А. Эффект осцилляций Шредингера в задаче о движении электрона Дирака в постоянном магнитном поле // Сб. XV нижегородская сессия молодых ученых. Естественнонаучные дисциплины: Тезисы докладов. Нижний Новгород. – 2010. – С. 34-35.
- [А.9] Петров Д.А. О влиянии электрон-фононного взаимодействия на релаксацию спинового момента электрона проводимости в немагнитных кристаллах // Сб. XVI нижегородская сессия молодых ученых. Нижний Новгород. – 2011. – С. 75-79.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава I. Метод нелинейных стохастических уравнений для открытых квантовых систем

§1.1 Введение

§1.2 Поведение квантовой системы при наличии нестационарного возмущения. Теория S-матрицы

§1.3 Линейные и нелинейные характеристики квантовых систем при динамических возмущениях

§1.4 Обобщенные восприимчивости и их свойства

§1.5 Вывод стохастических уравнений для открытых квантовых систем

1.5.1 Постановка задачи и основные приближения

1.5.2 Гауссовы операторы и их свойства

1.5.3 Вывод нелинейного стохастического уравнения в приближении гауссовой статистики переменных термостата

§1.6 Выводы

Глава II. Динамика спинового момента электрона, взаимодействующего с собственным полем излучения и флуктуациями электромагнитного вакуума

§2.1 Введение и постановка задачи

§2.2 Стохастическое уравнение для спинового момента электрона

§2.3 Динамическая восприимчивость спиновой подсистемы

2.3.1 Динамическая восприимчивость

2.3.2 Вычисление частотной зависимости коэффициентов радиационного трения

2.3.3 Анализ и обсуждение полученных результатов

§2.4 Уравнения релаксации спинового момента в марковском случае

§2.5 Эффект изменения частоты прецессии спинового момента

§2.6 Выводы

Глава III. Динамика спинового момента электрона проводимости, взаимодействующего с полем фононов и его флуктуациями в немагнитных кристаллах

§3.1 Введение и постановка задачи

§3.2 Стохастическое уравнение для спинового момента электрона проводимости

3.2.1 Стохастическое уравнение

3.2.2 Вычисление частотной зависимости коэффициентов фононного трения

3.2.3 Уравнения релаксации спинового момента в марковском случае

§3.3 Динамическая восприимчивость спиновой подсистемы

3.3.1 Динамическая восприимчивость

3.3.2 Анализ и обсуждение полученных результатов

§3.4 Эффект изменения частоты прецессии спинового момента электрона проводимости

§3.5 Выводы

Заключение

Приложение. О движении электрона Дирака в постоянном магнитном поле

§1. Введение и постановка задачи

§2. Уравнения движения для операторов координаты и скорости электрона Дирака в магнитном поле и их решение

§3. Исследование полученного решения

§4. Дисперсия приращения координаты электрона Дирака

§5. Выводы

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Список литературы