

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

УДК 530.145:535.14

**ЛЕОНОВ
АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ**

**КВАНТОВЫЕ И НЕПЕРТУРБАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В
ЭВОЛЮЦИИ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ В РЕЗОНАНСНОМ
ПОЛЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности **01.04.02 – теоретическая физика**

Научный руководитель
доктор физико-математических наук
профессор
Феранчук Илья Давыдович

Минск, 2010

Работа выполнена в **Белорусском государственном университете**

Научный руководитель:

Феранчук Илья Давыдович

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
теоретической физики и астрофизики БГУ

Официальные оппоненты:

Могилевцев Дмитрий Сергеевич

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
квантовой оптики ИФ НАН Беларуси

Слепян Григорий Яковлевич

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
электродинамики неоднородных сред
НИИ ядерных проблем БГУ

Оппонирующая организация:

Научно-практический центр НАН Беларуси
по материаловедению

Защита состоится « 24 » декабря 2010 г. в 16 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68; тел. ученого секретаря 284-04-41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук

Ю.П. Выблый

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся активные экспериментальные исследования взаимодействия различных квантовых систем (атомов, квантовых точек, примесных центров и других объектов) с резонансными внешними полями, которые позволяют управлять характеристиками этих систем. Подобные исследования имеют существенное значение для спектроскопии, квантовой оптики, наномеханики, квантовой электродинамики в резонаторах и для других приложений.

Для теоретического анализа получаемых экспериментальных результатов используют различные квантовые модели, наиболее известной и важной среди которых является модель Раби (МР). Эта модель учитывает существенные особенности резонансного взаимодействия, выделяя двухуровневую систему (ДУС), взаимодействующую с одномодовым квантовым полем. В задачах о взаимодействии излучения с веществом МР имеет такое же фундаментальное значение, как, например, атом водорода для квантовой механики. Анализ ее поведения лежит в основе исследований по созданию наиболее эффективных элементов для квантовых компьютеров. Во многих случаях МР рассматривается как нулевое приближение при изучении более сложных систем. Поэтому ее исследованию и анализу приложений к конкретным физическим проблемам посвящено огромное число работ.

Несмотря на достаточно простую форму Гамильтониана МР, точное решение для его стационарных состояний отсутствует. Поэтому большинство исследований основано на использовании различных приближений и упрощений, в результате которых область применимости полученных решений существенно сужается. В связи с этим остается актуальной разработка методов эффективного численного и аналитического описания стационарной задачи ДУС в резонансном квантовом поле, применимых во всем диапазоне изменения ее параметров.

Основные приложения МР связаны с исследованием эволюции ДУС в резонансном поле. Такая задача во многих работах решается на основе уравнений Блоха для матрицы плотности ДУС с приближенным «расщеплением» средних значений от произведений операторов поля и ДУС (марковское приближение). Другой подход к решению этой задачи основан на использовании приближенного разложения оператора эволюции по степеням коммутаторов операторов ДУС и поля, что возможно при достаточно слабом взаимодействии между этими подсистемами.

В то же время знание собственных состояний МР позволяет исследовать точную эволюцию матрицы плотности ДУС без использования приближения вращающейся волны, с учетом квантовых флуктуаций поля и корреляции между ДУС и полем. Поэтому еще одной актуальной задачей является численное и аналитическое исследование качественных изменений в эволюции МР, которые связаны с выходом за рамки известных приближений и объяснение новых экспериментальных данных в области сильной связи и больших возбуждений (интенсивностей) внешних полей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Научное исследование, выполненное в настоящей диссертационной работе, непосредственно связано с тематикой проблем, разрабатываемых на кафедре теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета, в том числе в рамках Задания 04 «Разработка и применение новых эффективных методов теоретического описания квантовых систем» ГПФИ «Поля и частицы» (№ гос. регистрации 20063502), а также грантов Белорусского государственного университета для студентов, магистрантов и аспирантов по темам «Операторный метод непертурбативного описания взаимодействия излучения с периодическими структурами» (2009), «Когерентные эффекты при описании взаимодействия излучения с квантовыми объектами и кристаллическими структурами» (2010) и гранта Министерства образования Республики Беларусь по теме «Непертурбативные эффекты в эволюции квантовой системы в резонансном электромагнитном поле» (2010).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является описание динамики двухуровневой системы во внешнем резонансном квантовом поле на основе применения операторного метода решения уравнения Шредингера и анализ квантовых и непертурбативных эффектов, которые приводят к качественным изменениям в эволюции исходной модели по сравнению с результатами, полученными в рамках известных приближений.

Для достижения намеченной цели были решены следующие основные задачи:

1. Построено обобщение операторного метода решения стационарной задачи двухуровневой системы в одномодовом квантовом поле для численного и равномерно-пригодного аналитического расчета спектра собственных состояний модели Раби.
2. Выполнено качественное и количественное аналитическое описание основных параметров квантового эффекта «коллапса–возрождения» в эволюции двухуровневой системы в модели Джейнса-Каммингса для резонансного и нерезонансного случаев.

3. Проведен анализ качественных особенностей энергетического спектра модели Раби и определен диапазон параметров системы, при которых необходим выход за рамки общепринятых приближений при решении задачи об эволюции двухуровневой системы во внешнем поле.
4. Построен эффективный алгоритм численного решения эволюционной задачи двухуровневой системы во внешнем резонансном поле и найдено равномерно-пригодное аналитическое приближение для описания динамики исходной системы в рамках операторного метода, позволившее рассмотреть новые качественные эффекты в эволюции системы.

Объектом исследования является двухуровневая система, помещенная во внешнее резонансное квантовое поле. Предмет исследования – особенности эволюции двухуровневой системы при сильной связи с резонансным полем. Выбор объекта исследования обусловлен актуальностью проблемы резонансного взаимодействия поля с веществом для приложений в области лазерной физики, квантовой оптики, физики конденсированного состояния.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод численного расчета с любой необходимой точностью и получения равномерно-пригодного аналитического приближения для собственных состояний двухуровневой системы в одномодовом квантовом поле.
2. Метод аналитического описания и расчета основных параметров эффекта «коллапса–возрождения» в эволюции модели Джейнса-Каммингса при произвольной «расстройке» резонанса.
3. Теоретическое объяснение механизмов резонансной перестройки осцилляций Раби инверсной населенности двухуровневой системы в зависимости от времени и амплитуды поля.
4. Точное описание эволюции модели Раби на основе стационарных состояний системы, найденных в рамках операторного метода, и построение аналитического приближения для расчета инверсной населенности двухуровневой системы в практически значимом случае интенсивных полей.

Личный вклад соискателя

Большинство опубликованных работ [1–А – 10–А], а также интерпретация полученных результатов выполнена совместно с научным руководителем, доктором физико-математических наук, профессором И.Д. Феранчуком, который определял основные цели и формулировал приоритетные задачи исследования. Аналитические расчеты, разработка вычислительных алгоритмов и проведение численных экспериментов выполнены соискателем самостоятельно.

Апробация результатов диссертации

Результаты, представленные в настоящей диссертации, докладывались на следующих конференциях: «XI Int. Conference on Quantum Optics» (Минск, 2006), «8-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 2009), «Международная школа-конференция «Современные проблемы физики» – 2010» (Минск, 2010), «62-я конференция студентов и аспирантов БГУ» (Минск, 2005), «63-я конференция студентов и аспирантов БГУ» (Минск, 2006), «64-я конференция студентов и аспирантов БГУ» (Минск, 2007), «66-я конференция студентов и аспирантов БГУ» (Минск, 2009), «67-я конференция студентов и аспирантов БГУ» (Минск, 2010), научных семинарах кафедры теоретической физики и астрофизики БГУ.

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, из них 6 в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РБ [1–А – 6–А], 3 статьи в сборниках материалов конференций, 1 – в сборниках тезисов докладов конференций. Общий объем опубликованных работ – 5 авторских листов в изданиях, включенных в перечень ВАК РБ, 3 авторских листа – в других изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 133 наименования, пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 107 страниц. В диссертации представлены 22 иллюстрации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 посвящена исследованию стационарной задачи двухуровневой системы (ДУС), помещенной во внешнее резонансное квантовое поле.

В § 1.1 введено понятие модели ДУС и обоснованы условия, при которых возможно описание на ее основе реальных физических объектов. Рассмотрена простейшая модель, описывающая взаимодействие ДУС с резонансным квантовым полем – модель Раби (МР), и ее приближение – модель Джейнса-Каммингса (МДК). Приведен обзор имеющихся работ, в основе которых лежит использование данных моделей, и сделан вывод об их актуальности и важном прикладном значении. Обоснована необходимость разработки новых алгоритмов решения стационарной задачи МР, пригодных во всем диапазоне изменения ее параметров.

Гамильтониан МР можно представить в следующей форме:

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \Delta \hat{\sigma}_3 + \hat{a}^+ \hat{a} + f(\hat{\sigma}_+ + \hat{\sigma}_-)(\hat{a} + \hat{a}^+). \quad (1)$$

Здесь выбрана система единиц с $\hbar = c = 1$ и энергией кванта поля $\omega = 1$; Δ – энергия перехода между состояниями ДУС в указанных энергетических единицах (случаю точного резонанса соответствует $\Delta = 1$); f – константа связи ДУС с полем; \hat{a}^+ , \hat{a} – операторы рождения и уничтожения квантов поля; $\hat{\sigma}_3$, $\hat{\sigma}_\pm = (\hat{\sigma}_1 \pm i\hat{\sigma}_2)/2$ – матрицы Паули.

В системе, описываемой Гамильтонианом (1), существует дополнительный интеграл движения – комбинированная четность:

$$\hat{P} = \hat{\sigma}_3 \hat{S} = \hat{\sigma}_3 e^{i\pi \hat{a}^+ \hat{a}}, \quad [\hat{H}, \hat{P}] = 0. \quad (2)$$

Поэтому собственные векторы и собственные значения энергии МР зависят от двух квантовых чисел и удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\hat{H}|\psi_{np}\rangle = E_{np}|\psi_{np}\rangle, \quad \hat{P}|\psi_{np}\rangle = p|\psi_{np}\rangle, \quad (3)$$

где числа $p = \pm 1$ определяют чётность, а $n = 0, 1, 2, \dots$ – квантовые числа, связанные с возбуждениями поля.

Несмотря на простую форму гамильтониана (1), точного аналитического решения уравнений (3) не найдено. Поэтому при анализе конкретных приложений МР используют различные приближения, среди которых одним из наиболее распространенных и изученных является приближение вращающейся волны (ПВВ), которое ведет к МДК. В рамках данного приближения пренебрегают «антивращающимися» слагаемыми $\hat{\sigma}_+ \hat{a}^+$ и $\hat{\sigma}_- \hat{a}$, в результате чего Гамильтониан (1) принимает вид:

$$\hat{H}_0 = \frac{1}{2} \Delta \hat{\sigma}_3 + \hat{a}^+ \hat{a} + f(\hat{\sigma}_+ \hat{a} + \hat{\sigma}_- \hat{a}^+). \quad (4)$$

После такого преобразования существенным образом изменяется и интеграл движения (2), который в случае Гамильтониана МДК описывает число возбуждений в системе:

$$\hat{J} = \frac{1}{2} \hat{\sigma}_3 + \hat{a}^+ \hat{a}. \quad (5)$$

В § 1.2 рассмотрено решение стационарной задачи МДК в рамках приближения вращающейся волны (ПВВ). Отмечено, что в формировании стационарных состояний участвуют только две соседние гармоники поля. Показан расходящийся характер решений с ростом константы связи и амплитуды поля.

В § 1.3 описан операторный метод (ОМ) численного решения стационарной задачи МР и получены простые итерационные выражения, позволяющие рассчитывать собственные состояния МР с любой необходимой точностью. На основе полученных решений сделан вывод о существенной ограниченности области применимости МДК. Кроме того, отмечено, что в формировании стационарных состояний МР участвует много гармоник поля.

В § 1.4 разработано равномерно-пригодное приближение (РПП) для аналитического решения стационарной задачи МР в рамках ОМ. Проведен сравнительный анализ численного ОМ, РПП ОМ и ПВВ решений (рисунок 1) и

сделан вывод о корректности полученных РПП решений во всем диапазоне изменения параметров системы.

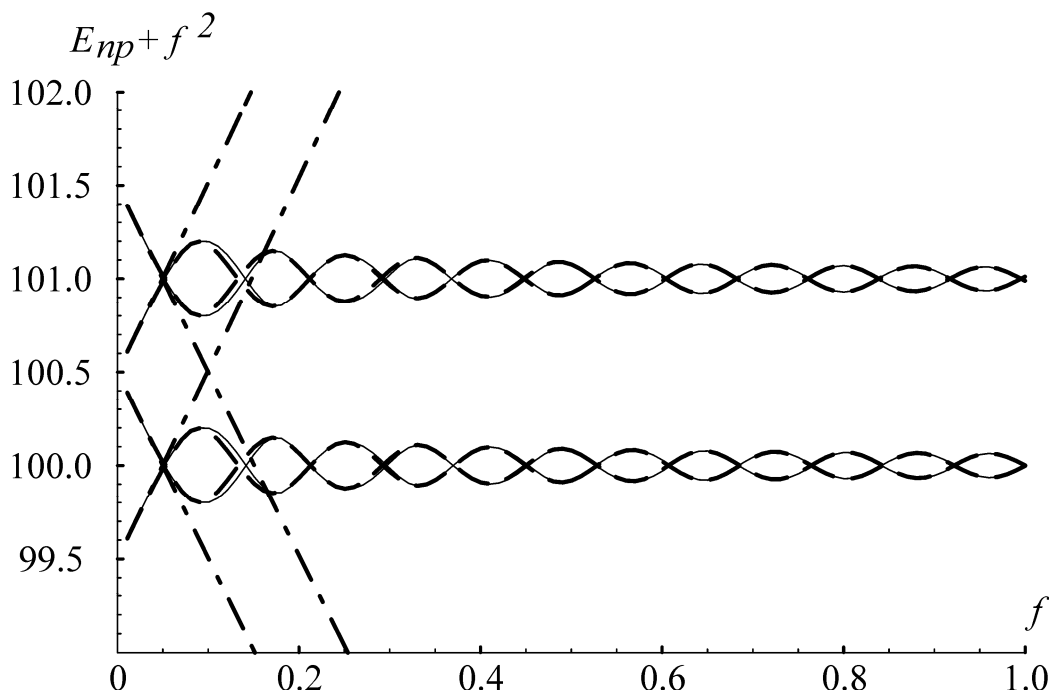


Рисунок 1 – Структура энергетических уровней МР для высоковозбужденных состояний как функции константы связи f : РПП ОМ – сплошные линии; численный ОМ – штриховые линии; ПВВ – штрихпунктирные линии

В главе 2 рассмотрена эволюция ДУС в рамках МДК и получены общие выражения, описывающие динамику системы. Показано, что в поведении инверсной населенности наблюдаются эффекты, связанные с поочередным рождением и затуханием высокочастотных осцилляций Раби системы – эффект «коллапса-возрождения» (ЭКВ).

В § 2.1 приведены теоретические аспекты ЭКВ и даны определения его основных параметров (период ЭКВ, ширина ЭКВ, время затухание регулярной структуры ЭКВ). Обоснована необходимость в поиске аналитического описания динамики МДК для анализа временных масштабов ЭКВ в зависимости от характерных параметров системы (константы связи, «расстройки» резонанса, амплитуды поля), с помощью которых можно было бы качественно изменять эволюцию системы.

В § 2.2 построено точное решение задачи об эволюции МДК в рамках ПВВ на основе матрицы плотности системы и выведено общее выражение для инверсной населенности ДУС как функции времени.

В § 2.3 получены простые выражения, описывающие как медленную («огибающую») составляющую, так и высокочастотную компоненту осцилляций инверсной населенности системы (рисунок 2). Основная идея состояла в замене суммирования интегрированием и оценке полученного интеграла методом перевала. Рассмотрен случай точного резонанса ($\Delta = 1$), и показано, что инверсная населенность является автомодельной функцией времени. Рассмотрена зависимость инверсной населенности ДУС от амплитуды поля и показан затухающий характер амплитудных осцилляций Раби при определенных временах взаимодействия ДУС с полем (рисунок 3). Сделан вывод о необходимости учета этого вклада при анализе затуханий осцилляций инверсной населенности ДУС при рассмотрении МДК как открытой системы.

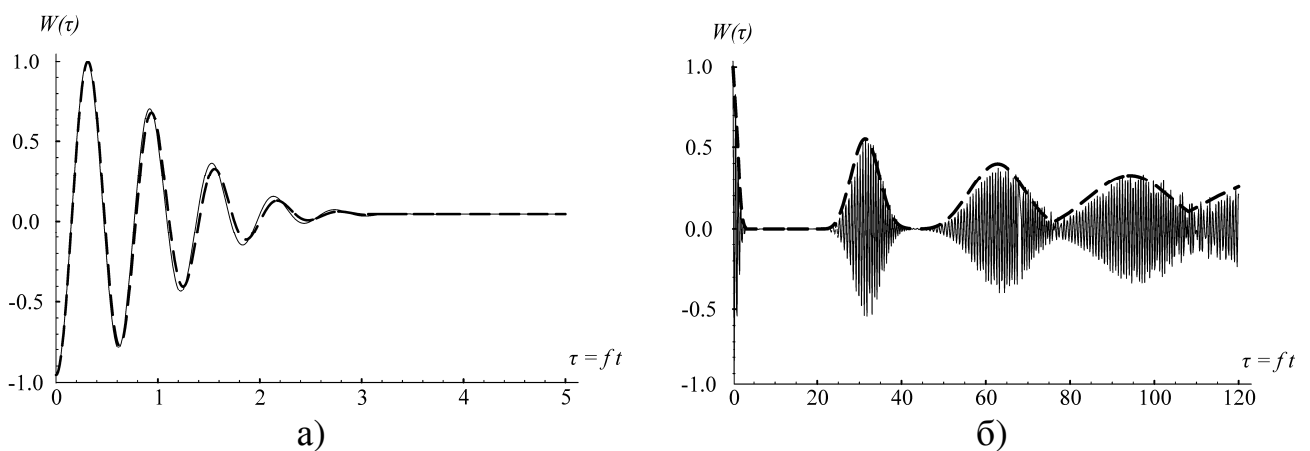


Рисунок 2 – Сравнение результатов расчета инверсной населенности $W(\tau)$ ($\Delta = 1$, $\varepsilon^2=25$) как функции времени численно (сплошная линия) и аналитически (пунктирная линия): а) высокочастотные осцилляции на начальном интервале; б) аналитическая «огибающая» на широком интервале

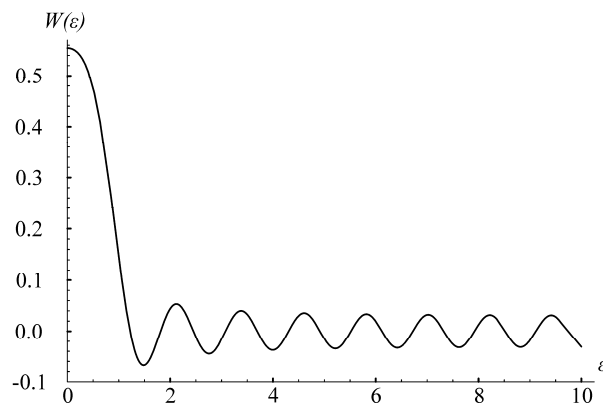


Рисунок 3 – Инверсная населенность $W(\varepsilon)$ как функция амплитуды поля для случая $fT = 2.65$ и $\Delta = 1$

В § 2.4 рассмотрены изменения, возникающие в эволюции ДУС при появлении «расстройки» резонанса. Показано, что в этом случае происходит сдвиг положения равновесия осцилляций инверсной населенности системы. В соответствии с идеологией § 2.3 получены простые аналитические выражения, описывающие высокочастотную компоненту и «огибающую» инверсной населенности ДУС для случая ненулевой «расстройки» ($\Delta \neq 1$).

В главе 3 рассмотрены эффекты, связанные с квази-пересечением энергетических уровней стационарных состояний МДК в рамках ПВВ. Показано, что для снятия вырождения необходима «правильная» перестройка стационарных состояний, а сам эффект имеет резонансный характер относительно амплитуды поля, т.е., он проявляется только вблизи резонансных значений $\varepsilon \sim \varepsilon_0$.

В § 3.1 рассмотрен Гамильтониан МР, который можно записать в виде:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + f\hat{V}, \quad (6)$$

где \hat{H}_0 соответствует Гамильтониану МДК (4), а оператор \hat{V} содержит «антивращающие» слагаемые, которыми в рамках ПВВ пренебрегают:

$$\hat{V} = \hat{\sigma}_+ \hat{a}^+ + \hat{\sigma}_- \hat{a}. \quad (7)$$

Получены простые аналитические соотношения, которые показывают, что теория возмущений по оператору \hat{V} при определенных условиях может приводить к возникновению сингулярных слагаемых. Сделан вывод о необходимости введения «правильной» линейной комбинации собственных векторов невозмущенной системы для снятия вырождения по энергии соответствующих состояний.

В § 3.2 рассмотрена резонансная перестройка стационарных состояний МДК на основе использования «правильной» линейной комбинации вырожденных состояний. Получены простые аналитические выражения как для собственных векторов, так и для собственных значений энергии исходной модели.

§ 3.3 сделан вывод о том, что преобразование стационарных состояний МДК должно приводить к нетривиальной зависимости эволюции ДУС от

амплитуды поля. Рассмотрена эволюция МДК с учетом снятия вырождения по стационарным состояниям, и получено простое аналитическое выражение, позволяющее исследовать инверсную населенность как функцию времени и амплитуды поля. Показано, что при достаточно малых амплитудах поля она описывается строго периодическими осцилляциями Раби, совпадающими с результатами в рамках ПВВ; а при $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_0$ эта зависимость качественно изменяется (рисунок 4).

Исследовано поведение амплитудных осцилляций Раби системы при различных длительностях взаимодействия ДУС с полем (рисунок 5). Обоснована необходимость выхода за рамки ПВВ и дополнительного анализа эффектов, связанных с наличием «антивращающих» слагаемых в Гамильтониане МР, при рассмотрении затухающих и диссипативных процессов в эволюции модели.

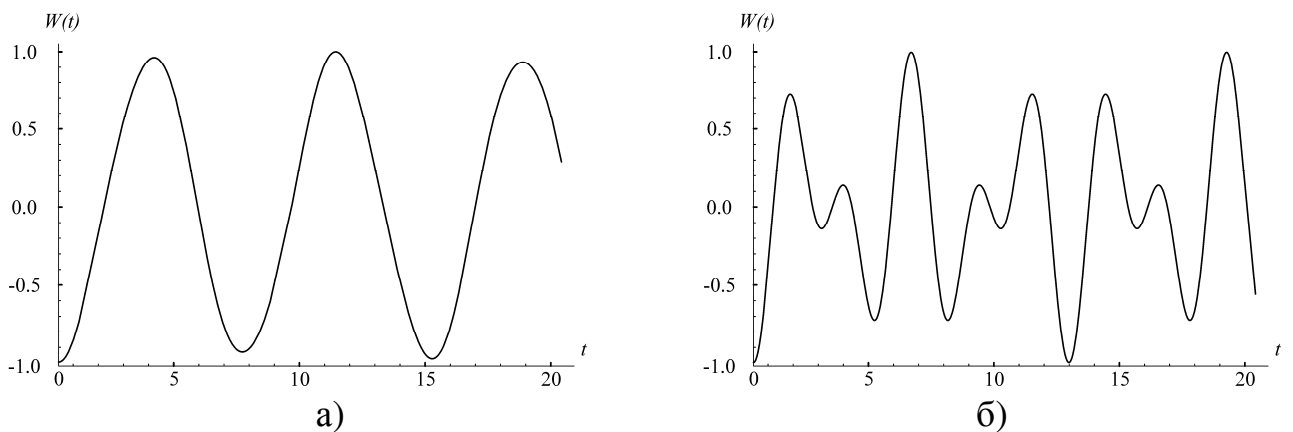


Рисунок 4 – Зависимость заселенности от времени при нулевой «расстройке» ($\Delta = 1$) и $f = 0.1$: а) вдали от амплитудного резонанса ($\varepsilon^2 = 20$); б) в амплитудном резонансе ($\varepsilon^2 = 100$)

Глава 4 посвящена исследованию квантовых и непертурбативных эффектов, возникающих в эволюции МР: i) подавление процессов «коллапса-возрождения» и ii) качественное изменение формы и спектра осцилляций заселенности по сравнению с осцилляциями Раби.

В § 4.1 описаны трудности исследования МР вне рамок известных приближений и обоснована актуальность разработки эффективных методов численного и аналитического исследования качественных изменений в эволюции МР, которые связаны с выходом за рамки ПВВ, марковского приближения и приближения классического поля.

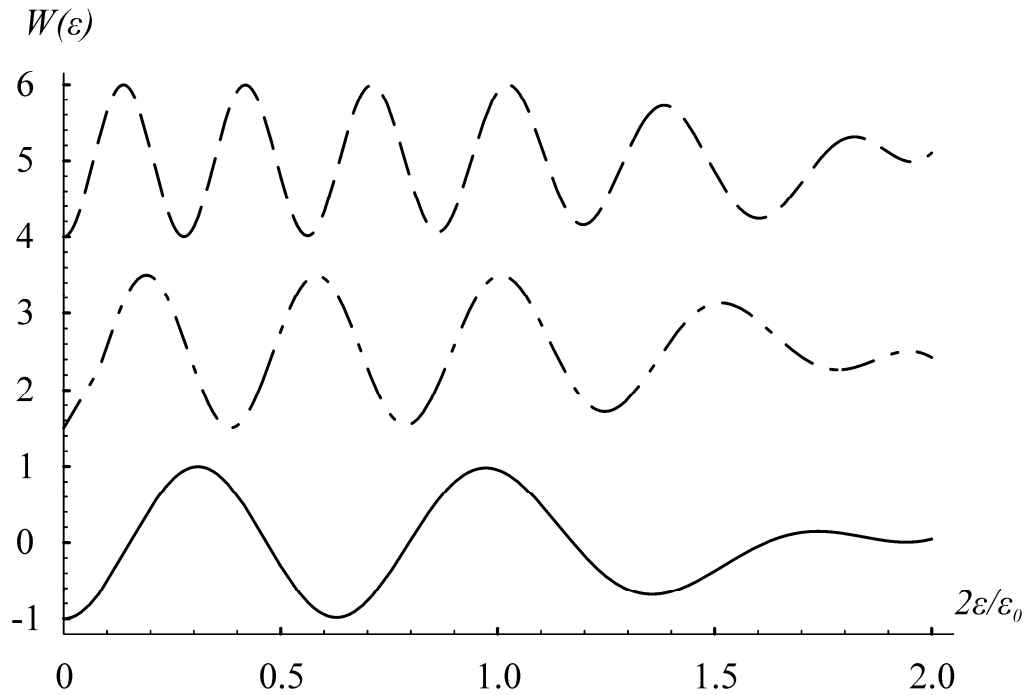


Рисунок 5 – Зависимость заселенности от амплитуды поля при $f = 0.15$ с заданной длительностью импульса: $\tau_1 = 1.00 \pi$ (сплошная линия), $\tau_2 = 1.61 \pi$ (штрихпунктирная линия), $\tau_3 = 2.23 \pi$ (штриховая линия). Для наглядности уровень отсчета $W(\varepsilon)$ для различных значений τ смещен на 2.5 единицы

В § 4.2 рассмотрен операторный метод численного решения эволюционной задачи для МР на основе стационарных состояний, полученных в рамках § 1.3. Построение решения основано на вычислении точной матрицы плотности эволюции всей системы.

В § 4.3 построено аналитическое решение эволюционной задачи на основе использования стационарных состояний МР, полученных в рамках РПП ОМ. Выполнено сравнение численного ОМ, РПП ОМ, ПВВ и квазиклассического решений (рисунок 6), сделан вывод об области применимости известных приближений при рассмотрении задачи об эволюции МР и о хорошем соответствии численного и РПП ОМ решений. Выявлен ряд новых эффектов, присутствующих в поведении инверсной населенности системы (рисунок 7).

В § 4.4 получено простое аналитическое выражение, описывающее с высокой степенью точности временную зависимость инверсной населенности ДУС в практически значимом пределе сильных полей (рисунок 8).

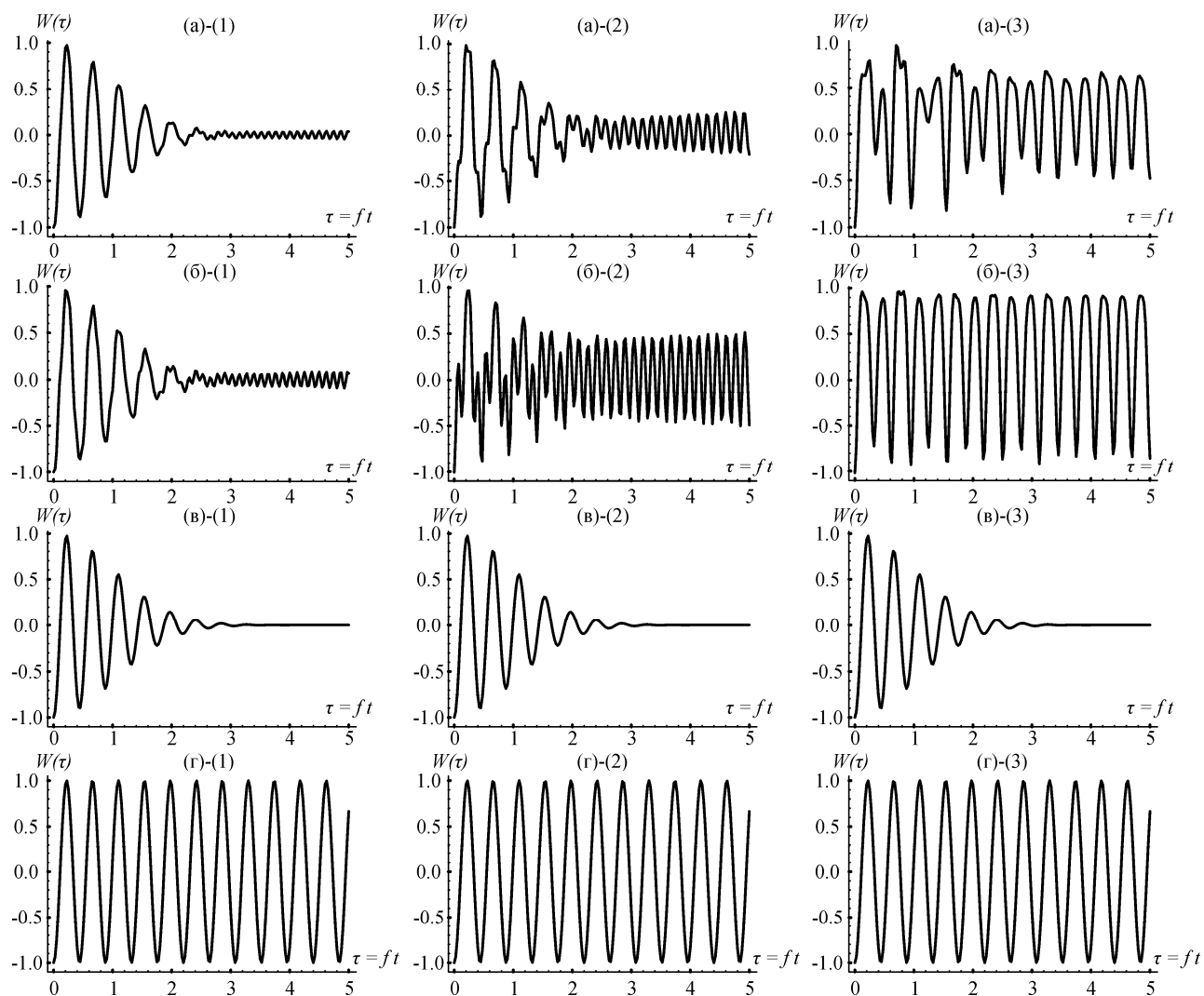


Рисунок 6 – Зависимость инверсной населенности от времени для случая $\Delta = 1$ и $\varepsilon^2 = 50$ при разных константах связи: (1) – $f = 0.01$; (2) – $f = 0.05$; (3) – $f = 0.1$. Представлены решения, полученные в рамках численного ОМ (а), РПП ОМ (б), ПВВ (в) и квазиклассического приближения (г)

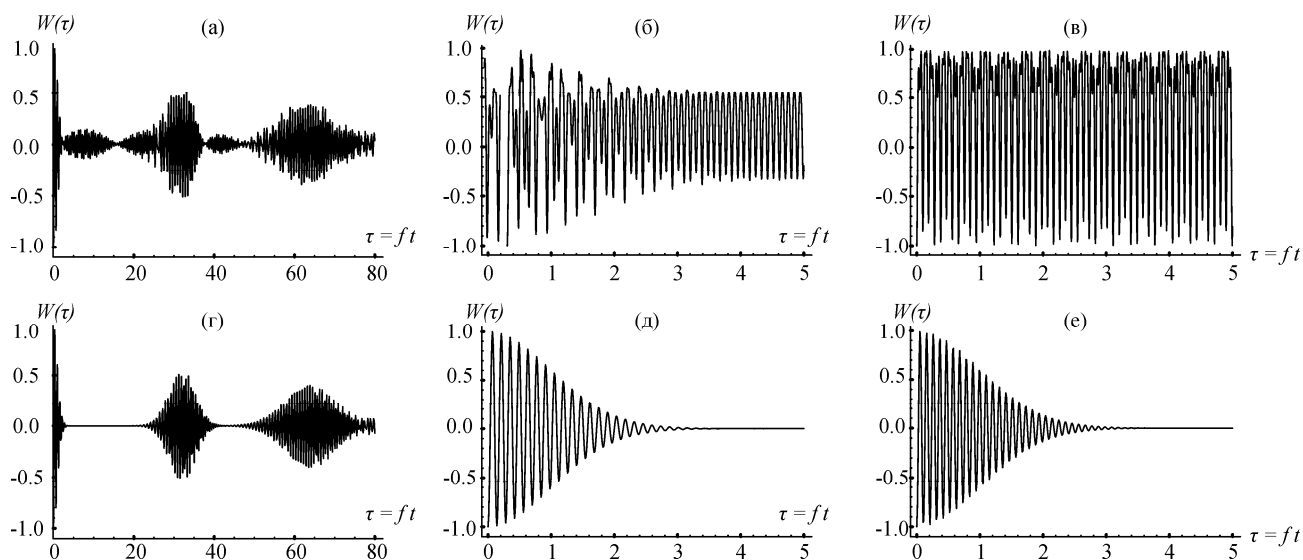


Рисунок 7 – Инверсная населенность как функция времени для случая $\Delta = 1$ и $f = 0.03$ при различных значениях амплитуды внешнего поля: (а), (г) – $\varepsilon^2 = 25$; (б), (д) – $\varepsilon^2 = 500$; (в), (е) – $\varepsilon^2 = 900$. Верхняя часть графика (а-в) соответствует решениям, полученным в рамках РПИ, нижняя – решениям, полученным в рамках ПВВ

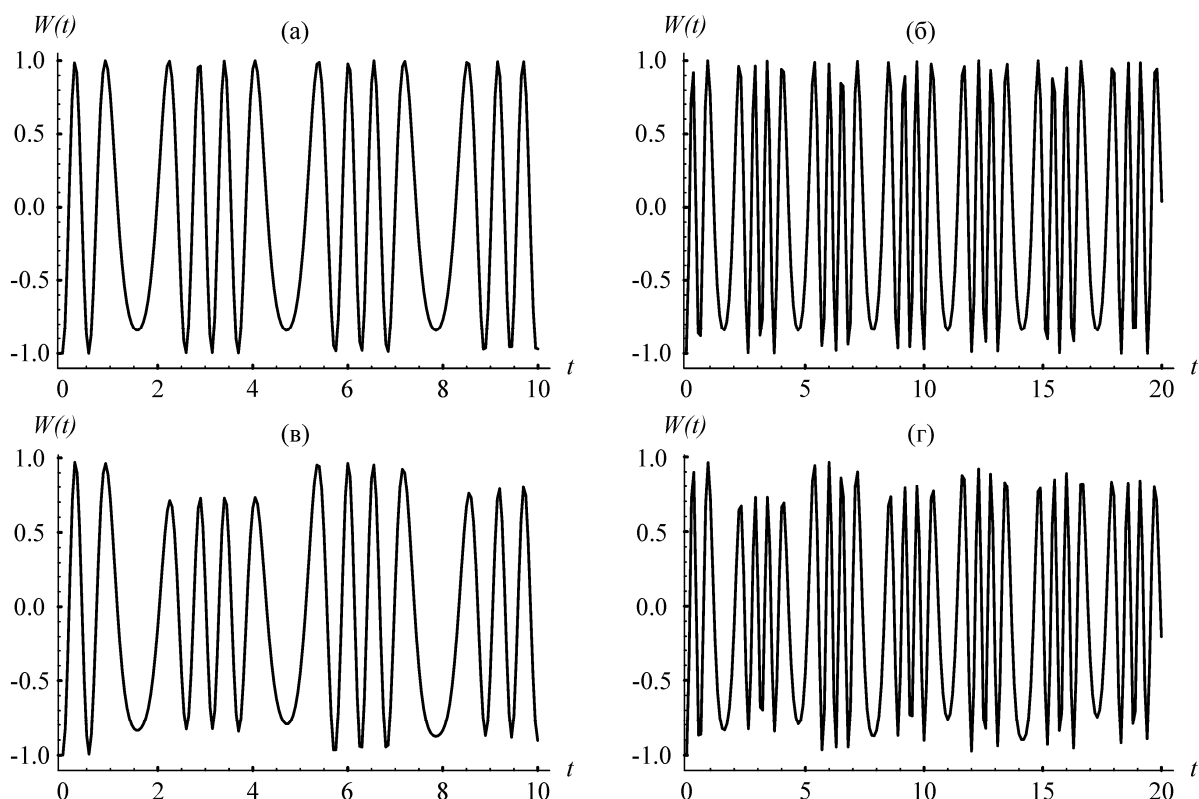


Рисунок 8 – Зависимость инверсной населенности от времени в случае сильного внешнего поля при $\Delta = 1, f = 0.03$ и $\varepsilon^2 = 900$ на разных временных интервалах: (а), (б) – решения, соответствующие асимптотической формуле РПИ; (в), (г) – решения, полученные численно в рамках численного ОМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В диссертации исследована эволюция двухуровневой системы во внешнем резонансном поле вне рамок известных приближений. Описан ряд новых квантовых и непертурбативных эффектов в поведении системы, связанных с выходом за рамки приближения вращающейся волны, марковского приближения и приближения классического поля. Дано теоретическое объяснение не описанных ранее экспериментальных данных в области сильной связи и больших возбуждений (интенсивностей) внешних полей.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Построено обобщение операторного метода для численного и аналитического расчета стационарных состояний модели Раби, равномерно-пригодных во всем диапазоне изменения ее параметров [1–А, 6–А].
2. Выполнено аналитическое описание основных параметров эффекта «коллапса-возрождения» в эволюции двухуровневой системы в модели Джейнса-Каммингса для резонансного и нерезонансного случаев [2–А, 3–А].
3. Проведен качественный анализ энергетического спектра модели Раби и определены значения параметров системы, при которых необходим выход за рамки известных приближений [4–А, 5–А].
4. Построено численное и равномерно-пригодное аналитическое решение эволюционной задачи модели Раби во всем диапазоне изменения ее параметров [6–А].
5. На основе полученного решения впервые выявлены качественные особенности поведения системы: подавление эффекта «коллапса-возрождения» и изменение спектра и формы осцилляций Раби для инверсной населенности в зависимости от амплитуды поля [6–А].
6. Получено простое асимптотическое выражение для инверсной населенности двухуровневой системы в практически значимом пределе интенсивных полей [6–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Модель двухуровневой системы, которая была выбрана в качестве основного объекта исследования, имеет важное прикладное значение для квантовой оптики, спектроскопии, наномеханики, квантовой электродинамики в резонаторах и других направлений современной теоретической физики. На ее основе возможно качественное и количественное описание взаимодействия разнообразных квантовых систем с резонансными внешними полями. Особую актуальность модель двухуровневой системы получила в связи с активными исследованиями по поиску оптимальных параметров элементарных ячеек для квантовых компьютеров.

Результаты диссертации могут быть использованы в исследованиях в области квантовой оптики, информатики и резонансной лазерной спектроскопии, которые ведутся в Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению для исследований по ЭПР и ЯМР в конденсированных средах, в НИИ ядерных проблем БГУ при описании квантоворазмерных эффектов в наноструктурах и других научных центрах Республики Беларусь и за рубежом, где ведутся исследования в области резонансного взаимодействия излучения с веществом, а также используются в спецкурсе для студентов кафедры теоретической физики и астрофизики БГУ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи:

- 1–А. Леонов, А.В. Исследование эволюции квантовой системы в модели Джейнса-Каммингса без приближения вращающейся волны / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук. – 2008. – №. 3 – С. 76–85.
- 2–А. Леонов, А.В. Аналитическое исследование эффекта «коллапс-возрождение» в модели Джейнса-Каммингса / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2008. – Т. 52, № 5. – С. 49–54.
- 3–А. Feranchuk, I.D. Analytical analysis of the “collapse-revival” effect in the Jaynes-Cummings model / I.D. Feranchuk, A.V. Leonov // Phys. Lett. A. – 2009. – Vol. 373, № 5. – P. 517–520.
- 4–А. Леонов, А.В. Резонансная перестройка осцилляций Раби двухуровневой системы / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Журнал прикладной спектроскопии. – 2009. – Т. 76, № 4. – С. 511–515.
- 5–А. Feranchuk, I.D. Resonant modification of the Rabi oscillations of a two-level system / I.D. Feranchuk, A.V. Leonov // Phys. Lett. A. – 2009. – Vol. 373, № 45. – P. 4113–4116.
- 6–А. Леонов, А.В. Преобразование спектра осцилляций Раби для двухуровневой системы в сильном резонансном поле / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Журнал прикладной спектроскопии. – 2010. – Т. 77, № 6. – С. 899–906.

Материалы конференций:

- 7–А. Леонов, А.В. Исследование квазиклассического предела в модели Джейнса-Каммингса / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Сборник работ 63-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета, Минск, 23–26 мая 2006 г. / Белгосуниверситет; редкол.: А.Г. Захаров [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 1. – С. 158–161.
- 8–А. Леонов, А.В. Об использовании модели Раби для описания взаимодействия резонансного излучения с веществом / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Взаимодействие излучений с твердым телом =

Interaction of Radiation with Solids: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент. 2009 г. / редкол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2009. – С. 30–42.

- 9–А. Леонов, А.В. Неклассические и немарковские эффекты в эволюции квантовой системы во внешнем поле / А.В. Леонов, И.Д. Феранчук // Современные проблемы физики : сб. науч. тр. конф. – Минск: Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 2010. – С. 42–47.

Тезисы докладов:

- 10–А. Feranchuk, I.D. Accurate quasi-classic limit for Jaynes-Cummings model / I.D. Feranchuk, A. Leonov // XI International Conference on Quantum Optics: Programme and Book of Abstracts, Minsk, May 26-31, 2006 / Minsk (Belarus), 2006. – P. 31.

РЕЗЮМЕ

Леонов Александр Владимирович

КВАНТОВЫЕ И НЕПЕРТУРБАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭВОЛЮЦИИ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ В РЕЗОНАНСНОМ ПОЛЕ

Ключевые слова: двухуровневая система, модель Раби, модель Джейнса-Каммингса, осцилляции Раби, эффект «коллапса-возрождения», резонанс, затухание.

Целью диссертационной работы является описание динамики двухуровневой системы во внешнем резонансном квантовом поле на основе применения операторного метода решения уравнения Шредингера и анализ квантовых и непертурбативных эффектов, которые приводят к качественным изменениям в эволюции исходной модели по сравнению с результатами, полученными в рамках известных приближений.

Объектом исследования является двухуровневая система, помещенная во внешнее резонансное квантовое поле.

Предметом исследования являются характеристики этой системы в широком диапазоне изменения ее параметров.

Наиболее важными новыми научными результатами являются:

- метод численного расчета с любой необходимой точностью и получения равномерно-пригодного аналитического приближения для собственных состояний двухуровневой системы в одномодовом квантовом поле;
- метод аналитического описания и расчета основных параметров эффекта «коллапса–возрождения» в эволюции модели Джейнса-Каммингса при произвольной «расстройке» резонанса;
- теоретическое объяснение механизмов резонансной перестройки осцилляций Раби инверсной населенности двухуровневой системы в зависимости от времени и амплитуды поля;
- точное описание эволюции модели Раби на основе стационарных состояний системы, найденных в рамках операторного метода, и построение аналитического приближения для расчета инверсной населенности двухуровневой системы в практически значимом случае интенсивных полей.

РЭЗІЮМЭ

Леонаў Аляксандр Уладзіміравіч

КВАНТАВЫЯ І НЕПЕРТУРБАТЫЎНЫЯ ЭФЕКТЫ Ё ЭВАЛЮЦЫІ ДВУХУЗРОЎНЕВАЙ СІСТЭМЫ Ё РЕЗАНАНСНЫМ ПОЛІ

Ключавыя словы: двухузроўневая сістэма, мадэль Рабі, мадэль Джэйнса-Каммінгса, асцыляцыі Рабі, эфект «калапса-адраджэння», рэзананс, затуханне.

Мэтай дысертацыйнай працы з’яўляецца апісанне дынамікі двухузроўневай сістэмы ва ўзнешнім рэзанансным квантавым полі на аснове прымянення аператарнага метада рашэння ўраўнення Шродзінгера і аналіз квантавых і непертурбатыўных эфектаў, якія прыводзяць к якасным змяненням у эвалюцыі зыходнай мадэлі ў параўнанні з рэзультатамі, якія былі атрыманы ў рамках вядомых прыбліжэнняў.

Аб’ектам даследавання з’яўляецца двухузроўневая сістэма, якую змясцілі ва ўзнешнім рэзанансным квантавым полі.

Прадметам даследавання з’яўляюцца характарыстыкі гэтай сістэмы ў шырокім дыяпазоне змянення яе параметраў.

Найбольш значнымі новымі навуковымі вынікамі з’яўляюцца:

- метада колькаснага разліку з любой неабходнай дакладнасцю і атрымання раўнамерна-прыгоднага аналітычнага прыбліжэння для ўласных станаў двухузроўневай сістэмы ў аднамодавым квантавым полі;
- метада аналітычнага апісання і разліку асноўных параметраў эфекта «калапса-адраджэння» ў эвалюцыі мадэлі Джэйнса-Каммінгса пры адвольнай «расстройцы» рэзананса;
- тэарэтычнае тлумачэнне механізмаў рэзананснай перастройцы асцыляцый Рабі інверснай населеннасці двухузроўневай сістэмы ў залежнасці ад часу і амплітуды поля;
- дакладнае апісанне эвалюцыі мадэлі Рабі на аснове стацыянарных станаў сістэмы, якія былі знойдзены ў рамках аператарнага метада, і пабудова аналітычнага прыбліжэння для разліку інверснай населеннасці двухузроўневай сістэмы ў практычна значным выпадку інтэнсіўных палей.

SUMMARY

Leonov Aleksandr Vladimirovich

QUANTUM AND NON-PERTURBATIVE EFFECTS IN THE EVOLUTION OF THE TWO-LEVEL SYSTEM IN THE RESONANT FIELD

Key words: two-level system, Rabi model, Jaynes-Cummings model, Rabi oscillations, «collapse-revival» effect, resonance, damping.

The main goal of the thesis is the description of dynamics of the two-level system in the external resonant field on the basis of implementation of the operator method for solution of the Schrödinger equation and analysis of the quantum and non-perturbative effects that lead to the qualitative changes in the evolution of the initial model in comparison with results obtained within the well-known approximations.

The object of the research is the two-level system in the external resonant quantum field.

The subjects of the research are the characteristics of this system in the whole range of the parameter variation.

The most significant new scientific results are:

- method of the numerical calculation with any needed accuracy and development of the uniformly-available approximation for the eigenstates of the two-level system in the single-mode quantum field;
- method of analytical description and calculation of the main parameters of the «collapse-revival» effect in the evolution of the Jaynes-Cummings model for any detuning values;
- theoretical explanation of the mechanism of the resonant retuning of the Rabi oscillations of the population inversion of the two-level system depending on time and field amplitude;
- accurate description of the evolution of the Rabi model on the basis of the eigenstates of the system obtained within the operator method, and development of the analytical approximation for calculation of the population inversion in the practically important case of the intensive fields.

ЛЕОНОВ
Александр Владимирович

**КВАНТОВЫЕ И НЕПЕРТУРБАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭВОЛЮЦИИ
ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ В РЕЗОНАНСНОМ ПОЛЕ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Подписано в печать «___» _____ 2010 г. Формат 60х90 1/16
Бумага – офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. ____
Учет. изд. л. ____ . Тираж 60 экз. Заказ № ____

Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси
220072, Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси
Лицензия ЛП № 20 от 27.05.2003 г.