

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

УДК 535.14

**НГУЕН
КУАНГ ШАН**

**НЕПЕРТУРБАТИВНОЕ ОПИСАНИЕ КВАНТОВЫХ
ЭФФЕКТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РЕЗОНАНСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Минск, 2022

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный
руководитель: **Феранчук Илья Давыдович**,
доктор физико-математических наук, профессор
кафедры теоретической физики и астрофизики
Белорусского государственного университета.

Официальные
оппоненты: **Могилевцев Дмитрий Сергеевич**,
член-корреспондент НАНБ,
доктор физико-математических наук,
заместитель заведующего Центром квантовой
оптики и информатики Института
физики им.Б.И.Степанова НАН Беларуси.

Грода Ярослав Геннадьевич,
кандидат физико-математических наук,
спец. теоретическая физика,
доцент по специальности «Механика»,
доцент кафедры механики и конструирования
Учреждения образования «Белорусский государственный
технологический университет».

Оппонирующая
организация: Научно-исследовательское учреждение
«Институт ядерных проблем Белорусского
государственного университета».

Защита состоится «11» февраля 2022 года в 14:30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (220072, г. Минск, пр. Независимости, 68; тел.: +375 17 2708059, e-Mail: vyblyi@gmail.com).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа НАН Беларуси.

Автореферат разослан «_____» января 2022 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физико-математических наук

Ю.П. Выблый

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении состояний вещества, в которых квантовые и когерентные эффекты проявляются в макроскопических масштабах необходимо учитывать состояния системы, которые невозможно описать на основе стандартных методов теории возмущений и необходимо вводить непертурбативные подходы, как правило, индивидуальные для каждого конкретного физического явления. Широкое распространение для этой цели получили методы, основанные на использовании модельных гамильтонианов.

В частности, модель для описания взаимодействия вещества и электромагнитного излучения с частотой, близкой к частоте одного из электронных переходов атомов (или ядер) среды (резонансное излучение), на основе представления о взаимодействии двухуровневого атома (кюбита) с одномодовым квантовым полем была введена в работе¹ - квантовая модель Раби (КМР). В последнее время интерес к этой модели возрос в связи с тем, что для многих систем оказалось возможным изменять параметр взаимодействия атома (кюбита) с полем в широких пределах, включая так называемый режим ультра сильной связи (УСС).

Одно из направлений развития КМР связано с ее обобщением для систем, содержащих несколько атомов (кюбитов) в резонансном поле и, в частности, для двух атомов - так называемой Тавис-Каммингс модели (ТКМ)². Эта модель включает в себя два приближения. Одно из них - это приближение вращающейся волны (ПВВ), которое справедливо для малых значений константы связи f атома с полем. Другое приближение связано с предположением, что расстояние между атомами $\rho = |R_1 - R_2|$ мало по сравнению с длиной волны λ резонансного поля, то есть $\rho \ll \lambda$. В работе³ ТКМ была исследована вне рамок ПВВ, однако приближение $\rho \ll \lambda$ сохранилось.

В то же время системы, которые содержат 2 кюбита, находящихся друг от друга на расстоянии $\rho \sim \lambda$ и взаимодействующих с резонансным квантовым полем, были недавно реализованы экспериментально, причем оказалось возможным изменять положения кюбитов в широких пределах с помощью точно сфокусированных оптических пинцетов⁴.

Как было недавно показано, что КМР является точно интегрируемой

¹ Rabi, I. I. On the process of space quantization / I. I. Rabi // Phys. Rev. — 1936. — Vol. 49, №. 4. — P. 324-328.

² Tavis, M. Exact solution for an n -molecule-radiation-field hamiltonian / M. Tavis, F. W. Cummings // Phys. Rev. — 1968. — Vol. 170, №. 2. — P. 379-384.

³ Agarwal, S. Tavis-cummings model beyond the rotating wave approximation: Quasidegenerate qubits / S. Agarwal, S. M. H. Rafsanjani, J. H. Eberly // Phys. Rev. A. — 2012. — Vol. 85, №. 4. — P. 043815 (11 pp.).

⁴ Photon-mediated localization in two-level qubit arrays / J. Zhong, N. A. Olekhno, Y. Ke et al. // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Vol. 124, №. 9. — P. 093604 (6 pp.).

системой, и задача о спектре ее стационарных состояний выражается через решения многочленных рекуррентных соотношений. Этот результат имеет принципиальное значение, однако собственные функции и собственные значения не представляются в замкнутой аналитической форме, что весьма затрудняет их использование для конкретных приложений при описании задач эволюции КМР, которые связаны с суммированием по всему спектру стационарных состояний системы.

Одно из направлений исследований, которое на протяжении многих лет ведется на кафедре теоретической физики и астрофизики Белгосуниверситета связано с разработкой методов непертурбативного описания квантовых систем (см.⁵ и цитированную литературу). В частности, этот подход в приложении к КМР был использован в работе⁶ для построения приближенных аналитических представлений для собственных функций и собственных значений гамильтониана КМР, равномерно-пригодных во всем диапазоне изменения его параметров. Однако эффективность этого приближения для приложений, связанных с описанием статистических и корреляционных характеристик КМР вне рамок ПВВ, была исследована недостаточно, что и определило одну из задач, поставленных в настоящей диссертации.

Представляет прикладной интерес обобщение такого подхода для системы, которая содержит 2 атома (кюбита), для ее описания в режиме УСС при произвольном расстоянии ρ между кюбитами. Целью такого анализа, выполненного в диссертации, является исследование зависимости параметров и динамики системы от величины ρ , которую можно использовать как дополнительный параметр для управления ее наблюдаемыми характеристиками. В частности, это позволяет изменять положение когерентного пика в экспериментах по измерению сечения рассеяния резонансного излучения на системе из двух атомов; контролировать степень перепутанности состояний системы при кодировке и передаче информации от двух излучателей; влиять на заселенность состояний для управления процессом спонтанного испускания; получать периодическую структуру в системе из N атомов – протяженной модели Дике⁷.

Еще один круг проблем, рассмотренных в диссертации, связан с описанием квантовых эффектов при каналировании заряженных частиц в изогнутом

⁵ Non-perturbative Description of Quantum Systems / I. Feranchuk, A. Ivanov, V.-H. Le, A. Ulyanenko. — Springer International Publishing, 2015. — 120 p.

⁶ Feranchuk, I. D. Two-level system in a one-mode quantum field: numerical solution on the basis of the operator method / I. D. Feranchuk, L. I. Komarov, A. P. Ulyanenko // Journal of Physics A: Mathematical and General. — 1996. — Vol. 29, №. 14. — P. 4035-4047.

⁷ Benediktovitch, A. Quantum theory of superfluorescence based on two-point correlation functions / A. Benediktovitch, V. P. Majety, N. Rohringer // Phys. Rev. A. — 2019. — Vol. 99, №. 1. — P. 013839 (18 pp.).

кристалле. В работе⁸ был впервые экспериментально обнаружен эффект каналирования заряженных частиц в изогнутом монокристалле, который был ранее теоретически предсказан в работе Цыганова⁹. В настоящее время этот эффект широко используется в физике высоких энергий для управления пучками заряженных частиц. В большинстве работ для интерпретации экспериментальных данных по каналированию в изогнутых кристаллах используется классическая теория. Максимальные значения угла поворота пучка возникают при минимально возможном значении радиуса изгиба кристалла $R_{кр}$. Однако, как было показано, что условия применимости квазиклассического приближения нарушаются при радиусе изгиба $R \approx R_{кр}$. Поэтому представляется важным детально исследовать движение частиц в изогнутых кристаллах с учетом ряда факторов, которые не описываются в рамках классической теории этого явления. В диссертации построена квантовая теория плоскостного каналирования ультрарелятивистских частиц в изогнутых монокристаллах и исследованы квантовые эффекты при $R \approx R_{кр}$. Показано, что в этом случае угловое распределение частиц на выходе изменяется в силу отличной от нуля проницаемости барьера, создаваемого кристаллографической плоскостью, что приводит к изменению углового распределения частиц на выходе из кристалла и эффективности захвата в режим каналирования. Экспериментальное исследование подобных проявлений квантово-размерных эффектов в физике высоких энергий представляет методический интерес, а также может быть полезным для оптимизации параметров изогнутых кристаллов.

Еще одно направление исследований диссертации связано с исследованием возможности получения когерентного рентгеновского излучения при прохождении пучка релятивистских электронов через кристалл. Хорошо известно, что когерентное рентгеновское излучение в лазерах на свободных электронах (РЛСЭ) возникает при прохождении пучка релятивистских электронов через ондулятор, который выполняет две функции. С одной стороны, вследствие механизма самоусиления спонтанного излучения (Self Amplified Spontaneous Emission - SASE) в нем происходит образование из первоначально однородного электронного импульса периодической последовательности микросгустков. В результате плотность электронов в импульсе становится периодически модулированной с периодом λ_0 , соответствующим резонансной длине волны ондулятора. С другой стороны, в нем происходит и формирование импульса когерентного ондуляторного излучения на резонансной частоте

⁸ Steering of charged particle trajectories by a bent crystal / A. Elishev, N. Filatova, V. Golovatyuk et al. // Physics Letters B. — 1979. — Vol. 88, №. 3. — P. 387-391.

⁹ Tsyganov, E. Channeling in the bent crystals / E. Tsyganov // Fermilab. TM Batavia. — 1976. — Vol. 682, 684. — P. 1.

$\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, (c - скорость света), возникающего на выходе из РЛСЭ. При этом когерентное излучение модулированного пучка сосредоточено в узком конусе вдоль направления движения электронов, а совпадение (резонанс) между частотой модуляции пучка и частотой испускаемых фотонов выполняется автоматически, поскольку модуляция пучка и частота испускаемых фотонов определяется одним и тем же механизмом ондуляторного излучения. Рассмотрим, однако, схему генерации излучения, при которой эти две функции разделены. Для этого предположим, что модулированный электронный импульс на выходе из ондулятора проходит через монокристаллическую мишень, в которой происходит генерация параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) с частотой ω_B , зависящей от структуры кристалла и угла θ_B между его плоскостями и направлением скорости электронов. При этом, как было недавно показано, что наибольшая интенсивность ПРИ достигается при скользящем движении пучка электронов вдоль поверхности монокристалла, в то время как рентгеновское излучение генерируется под большим углом $2\theta_B$ к направлению скорости электронов. Угол θ_B можно выбрать таким образом, чтобы выполнялось резонансное условие $\omega_B \approx \omega_0$. Тогда наряду с основным импульсом рентгеновского излучения от РЛСЭ произойдет генерация импульса когерентного ПРИ от модулированного электронного импульса. При этом пучок фотонов, соответствующий ПРИ, будет направлен под большим углом к направлению движения электронов, что расширяет возможности использования РЛСЭ.

Для анализа условий возникновения когерентного параметрического рентгеновского излучения и расчета его характеристик в диссертации использован метод эквивалентных фотонов, который дает достаточно простое и наглядное описание рассматриваемого явления.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации соответствует заданию «Фундаментальные основы новых прикладных эффектов в физике конденсированных сред и теории поля» ГПНИ «Конвергенция-2020», № ГР 20161856, выполняемому на кафедре теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета.

Диссертация соответствует пунктам «Теория конденсированного состояния классических и квантовых, макроскопических и микроскопических систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них» паспорта специальности 01.04.02 Теоретическая физика.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является описание эффектов, возникающих при взаимодействии заряженных частиц и резонансного излучения с веществом, в более широкой, по сравнению с исследованной ранее, области изменения физических параметров среды и излучения.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Расчет статистических и корреляционных характеристик электромагнитного поля и атомной системы в квантовой модели Раби вне рамок приближения вращающейся волны на основе равномерно пригодного описания;

2. Построение радиационно-индуцированного потенциала взаимодействия двух кубитов (атомов), сильно связанных с квантованным электромагнитным полем, и расчет наблюдаемых характеристик этой системы при произвольном расстоянии между кубитами;

3. Построение квантовой теории плоскостного каналирования ультрарелятивистских частиц в изогнутых монокристаллах и описание квантовых эффектов в их угловом распределении при минимально возможном значении радиуса изгиба кристалла $R \approx R_{кр}$;

4. Описание собственного электромагнитного поля периодически модулированного по плотности сгустка ультрарелятивистских электронов как пучка эквивалентных фотонов (псевдо-фотонов) с острым максимумом в спектральной плотности на частоте модуляции и анализ на этой основе условий генерации когерентного параметрического рентгеновского излучения.

Объектом исследования: модельные системы, которые описывают характерные особенности взаимодействия атомов среды с заряженными частицами и резонансным электромагнитным излучением.

Предмет исследования: непertурбативное описание модельных систем для расчета их макроскопических характеристик в широком диапазоне изменения параметров структурных элементов среды и излучения.

Научная новизна

1. Проведен анализ эффективности использования равномерно пригодного аналитического приближения операторного метода для описания стационарных состояний и наблюдаемых характеристик квантовой модели Раби вне рамок приближения вращающейся волны. Показано, что данное приближение находится в хорошем соответствии с численным решением и описывает все качественные особенности исследуемой системы. Описан новый “поляронный” эффект образования связанного состояния атома и поля в основном состоянии системы, обусловленный антивращающими слагаемыми в исходном гамильтониане.

2. Показано, что при изменении расстояния между двумя кубитами при

взаимодействии с резонансным одномодовым квантовым полем в резонаторе в режиме ультра-сильной связи наблюдаемые характеристики системы существенно изменяются, что позволяет осуществлять управление этими характеристиками, и может быть использовано для записи и передачи квантовой информации.

3. Показано, что в случае $R \approx R_{кр}$ в угловом распределении заряженных частиц на выходе из изогнутого монокристалла проявляются квантовые эффекты в силу отличной от нуля проницаемости барьера, создаваемого кристаллографической плоскостью, что приводит к изменению эффективности захвата в режим каналирования. Полученные результаты представляет интерес для задач по управлению релятивистскими пучками.

4. Рассчитан спектр эквивалентных фотонов периодически модулированного сгустка электронов на выходе из ондулятора рентгеновского лазера на свободных электронах и показано, что он содержит когерентную составляющую, которая дает возможность получения дополнительных импульсов рентгеновского излучения, направленных под большим углом к направлению движения пучка электронов в ондуляторе, что расширяет возможности использования таких лазеров.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитическая аппроксимация собственных функций и собственных значений для расчета статистических и корреляционных характеристик квантовой модели Раби вне рамок приближения вращающейся волны, которая остается справедливой во всем диапазоне изменения параметров системы.

2. Радиационно-индуцированный потенциал взаимодействия между двумя двухуровневыми атомами (кюбитами) в одномодовом квантовом поле в резонаторе при большой константе связи атомов с полем и произвольном расстоянии друг от друга, что позволяет управлять параметрами этой системы для записи и передачи квантовой информации.

3. Эффект подбарьерного туннелирования частиц при каналировании в изогнутом монокристалле при радиусе изгиба монокристалла, близком к критическому значению, который приводит к существенному изменению распределения частиц по углам вылета из кристалла, что необходимо учитывать при управлении пучками с помощью изогнутых кристаллов.

4. Теоретическое описание когерентного пика в спектральной плотности эквивалентных фотонов, определяющих собственное электромагнитное поле модулированного пучка ультрарелятивистских электронов, что позволяет получить дополнительные импульсы когерентного рентгеновского излучения в лазерах на свободных электронах.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно. Научный руководитель – профессор И.Д. Феранчук определял основные направления исследований и методы решения задач, поставленных в диссертации, а также обсуждал полученные результаты и возможности их практического использования. Доцент А. В. Леонов и кандидат физико-математических наук О. Д. Скоромник участвовали в обсуждении результатов, контроле и проверке расчетов и оказывали помощь в оформлении статей.

Апробация диссертации

Результаты исследований диссертации представлены на пяти международных конференциях:

XXVII Международной научно-практической конференции «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 18 апреля 2019 г.);

XVI International conference on quantum optics and quantum information, May 13-17, 2019, Minsk, Belarus;

XII Международной научно-технической конференции (Минск, 18-22 ноября 2019 г.);

XXVIII Международной научно-практической конференции «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 17 апреля 2020 г.);

IX Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики-2020» (Минск, 4-6 ноября 2020 г.);

X Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 22 апреля 2021 г.);

Конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф.И. Федорова (Гомель, 25 июня 2021 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты исследований диссертации опубликованы в одиннадцати научных работах, в том числе: 5 – статей в научных журналах в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 7 – статей в сборниках научных трудов и материалах конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из оглавления, перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 85 страниц, включая 15 рисунков на 15 страницах, 2 таблиц на 2 страницах.

Библиографический список включает 80 использованных источников на 6 страницах и 13 собственных публикаций автора на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **главе 1** представлен аналитический обзор литературы о модельных гамильтонианах для описания процессов взаимодействия заряженных частиц и излучения с веществом, которые рассматриваются в диссертации.

В **главе 2** рассмотрены следующие задачи: 1) расчет статистических и корреляционных характеристик электромагнитного поля и атомной системы в квантовой модели Раби вне рамок приближения вращающейся волны на основе равномерно пригодного описания. 2) построение радиационно-индуцированного потенциала взаимодействия двух кубитов (атомов), сильно связанных с квантованным электромагнитным полем, и расчет наблюдаемых характеристик этой системы при произвольном расстоянии между кубитами.

В **разделе 2.1** представлено аналитическое исследование равномерно пригодного приближения (РПП) для характеристик электромагнитного поля в квантовой модели Раби. Безразмерная форма гамильтониана КМР в натуральной системе единиц ($\hbar = c = 1$) определяется хорошо известным выражением¹⁰

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

где \hat{a} и \hat{a}^+ – операторы рождения и уничтожения квантов резонансной моды поля; частота поля $\omega = 1$ определяет масштаб измерения энергии системы; Δ – разность энергий между резонансными уровнями атома в единицах ω ; f – безразмерная константа связи ДУС и поля, пропорциональная дипольному матричному элементу перехода между этими состояниями; $\hat{\sigma}_i$ – матрицы Паули. Собственные векторы и собственные значения КМР зависят от двух квантовых чисел и удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{H}|\psi_{np}\rangle &= E_{np}|\psi_{np}\rangle, \\ \hat{P}|\psi_{np}\rangle &= p|\psi_{np}\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

где квантовое число $p = \pm 1$ определяет четность состояния, $n = 0, 1, \dots$ – уровень возбуждения поля. В рамках РПП эти величины определяются следующими аналитическими выражениями:

$$\begin{aligned} E_{np} &= n + \frac{1}{2}q - f^2 + \frac{1}{4}p\Delta(S_{n+q,n+q} + S_{nn}) - \frac{1}{2}qM, \quad n = 1, 2, \dots \\ M &= \sqrt{\left[1 + \frac{1}{2}\Delta(-1)^n(S_{n+q,n+q} - S_{nn})\right]^2 + \Delta^2 S_{n,n+q}^2}, \quad q = p(-1)^n, \\ S_{km} &= (-1)^m \sqrt{\frac{m!}{k!}} (2f)^{k-m} L_m^{k-m} (4f^2) e^{-2f^2}, \quad k \geq m; \quad S_{km} = S_{mk}, \end{aligned} \quad (3)$$

¹⁰ Scully, M. O. Quantum Optics / M. O. Scully, M. S. Zubairy.— Cambridge: Cambridge University Press, 1997. — 656 p.

где $L_m^k(x)$ – обобщенные полиномы Лагерра;

$$\begin{aligned}
 |\psi_{np}\rangle &= B_{np}\{\gamma |n, f\rangle + |n+q, f\rangle\}\chi_+ + pB_{np}\{(\gamma S_{nn} + S_{n,n+q}) |n, f\rangle + \\
 &\quad + (\gamma S_{n+q,n} + S_{n+q,n+q}) |n+q, f\rangle\}\chi_-, \\
 B_{np}^2 &= \{(\gamma^2 + 1) + (\gamma S_{nn} + S_{n,n+q})^2 + (\gamma S_{n+q,n} + S_{n+q,n+q})^2\}^{-1}, \\
 \gamma &= -\frac{p\Delta S_{n,n+q}}{2n + 2f^2 + p\Delta S_{nn} - 2E_{np}}, \quad \chi_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\chi_{\uparrow} \pm \chi_{\downarrow}). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Зависимость коэффициентов заселенности фоковских состояний электромагнитного поля в резонаторе в стационарных состояниях системы от константы связи:

$$Q_{kn}^S = \sum_p |\chi_s\langle k|\psi_{np}\rangle|^2. \quad (5)$$

Эти коэффициенты имеют важное значение при описании эволюции КМР, и их поведение тесно связано с разницей в интегралах движения системы для обоих приближений. В рамках ПВВ отличны от нуля заселенности только двух соседних фоковских состояний поля, тогда как в точных решениях и в РПП заселенности этих состояний “расплываются” по интервалу $|k - n| \approx f\sqrt{n}$ (Рис.1).

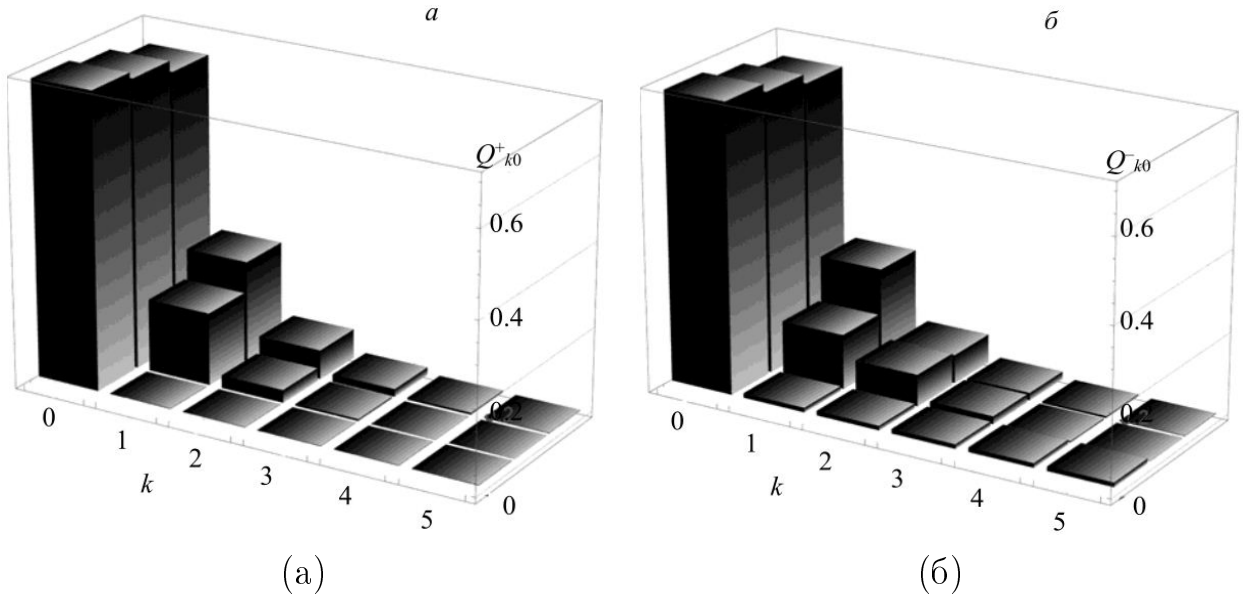


Рисунок 1. — Модули коэффициентов заселенности для основного состояния КМР при резонансе и $f = 0.25$: передний ряд - ПВВ, средний ряд - РПП, задний ряд - численное решение

Качественно отличается структура основного состояния системы в рамках ПВВ от точного решения и РПП для КМР. Действительно, состояние $|0\rangle \chi_{\downarrow}$, соответствующее вакууму электромагнитного поля, является точным

собственным вектором гамильтониана для ПВВ. В то же время основное состояние КМР соответствует “одетой” ДУС - связанному состоянию кубита и когерентного состояния электромагнитного поля, соответствующего ненулевым значениям числа фотонов в фоковском базисе. Образование такого состояния можно рассматривать как проявление “поляронного” эффекта, характерного для любых систем, соответствующих взаимодействию частицы с квантовым полем. [3, 4]

В разделе 2.2 теоретически исследованы спектр и динамика системы в режиме ультрасильной связи (УСС) вне рамок ПВВ и в зависимости от расстояния ρ между двумя кубитами. Показано, что зависимость от ρ становится важной в режиме УСС, где ПВВ неприменимо.

Гамильтониан двух одинаковых двухуровневых атомов (кубитов) с массой M , расположенных в позициях с координатами \vec{R}_1 и \vec{R}_2 в дипольном приближении для взаимодействия атомов с полем, записанный в натуральных единицах ($\hbar = c = 1$), имеет вид¹⁰

$$\hat{H} = -\frac{1}{2M} \left(\Delta_{\vec{R}_1} + \Delta_{\vec{R}_2} \right) + \frac{\epsilon}{2} \left(\sigma_3^1 + \sigma_3^2 \right) + \omega f \left[\left(\hat{a} e^{i\vec{k} \cdot \vec{R}_1} + \hat{a}^\dagger e^{-i\vec{k} \cdot \vec{R}_1} \right) \sigma_1^1 + \right. \\ \left. + \left(\hat{a} e^{i\vec{k} \cdot \vec{R}_2} + \hat{a}^\dagger e^{-i\vec{k} \cdot \vec{R}_2} \right) \sigma_1^2 \right] + \omega \hat{a}^\dagger \hat{a} + V_a(\vec{R}_1 - \vec{R}_2), \quad (6)$$

$$f = e_0 \omega \Delta d \sqrt{\frac{4\pi}{\omega^3 V}}. \quad (7)$$

здесь V - объем резонатора, f - безразмерная константа связи взаимодействия атома с полем, ϵ - энергия резонансного перехода между двумя состояниями кубита χ_\uparrow , χ_\downarrow с матричным элементом дипольного перехода d ; e_0 , m_0 - заряд и масса электрона соответственно; \hat{a}^\dagger , \hat{a} - операторы рождения и уничтожения резонансного квантового поля с частотой ω и волновым вектором \vec{k} , $V_a(\vec{R}_1 - \vec{R}_2)$ - потенциал взаимодействия атома с атомом за счет обменного и диполь-дипольного взаимодействий, Δ - оператор Лапласа и $\vec{\sigma}^1$, $\vec{\sigma}^2$ - матрицы Паули для кубитов один и два соответственно. Предел $M \rightarrow \infty$ соответствует ситуации двух неподвижных кубитов.

В диссертации показано, что потенциал $V_a(\vec{R}_1 - \vec{R}_2)$ существенно меньше радиационно-стимулированного потенциала, который определяется выражением: [5, 13]

$$U_\nu(x) = \omega u_\nu(x), \quad (8)$$

$$u_\nu(x) \psi_\nu = \left\{ \frac{\delta}{2} (\sigma_3^1 + \sigma_3^2) + \hat{a}^\dagger \hat{a} + f \left[\left(\hat{a} e^{i\phi} + \hat{a}^\dagger e^{-i\phi} \right) \sigma_1^1 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\hat{a} e^{-i\phi} + \hat{a}^\dagger e^{i\phi} \right) \sigma_1^2 \right] \right\} \psi_\nu, \quad (9)$$

здесь индекс ν означает совокупность квантовых чисел кубит-фотонной системы; $\phi = \pi x/\lambda$ и $\delta = \epsilon/\omega$. Его характерное поведение иллюстрирует Рис.2.

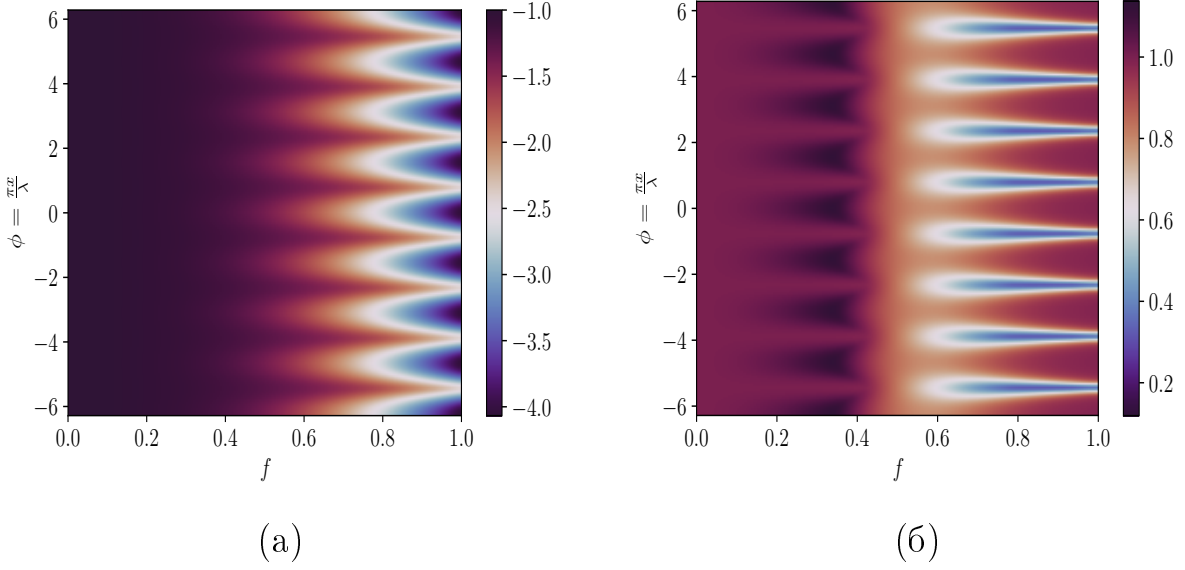


Рисунок 2. — Потенциальная поверхность $u_0(\phi)$ (а) основного состояния как функция безразмерной константы связи f и координаты $\phi = \pi x/\lambda$. Параметр $\delta = 1$. Когда система из двух кубитов находится в режиме УСС, потенциальные ямы самые глубокие. Частота перехода $\Omega_{\nu_1, \nu_2}(\phi)$ (б) из основного состояния в третье возбужденное состояние как функция безразмерной константы связи f и координаты ϕ . Параметр $\delta = 1$.

В диссертации найдена зависимость других характеристик системы от расстояния между кубитами.

В **главе 3** построена квантовая плоскостного каналирования ультрарелятивистских частиц в изогнутых монокристаллах и описание квантовых эффектов в их угловом распределении вблизи минимально возможного значения радиуса изгиба кристалла $R \approx R_{\text{кр}}$.

Усредненный потенциал кристаллографических плоскостей изогнутого кристалла имеет цилиндрическую симметрию и описывается функцией вида:

$$V(r) = \sum_{n=-n_1}^{n_1} V_1(r - R - nd),$$

где $V_1(r - R - nd)$ – потенциал одной плоскости; R – радиус изгиба центрального канала; n_1 – количество кристаллографических плоскостей в направлении, перпендикулярном изгибу; $d \ll R$ – межплоскостное расстояние.

Волновая функция для стационарных состояний релятивистской частицы с энергией E и массой $m \ll E$ в кристалле имеет вид:

$$\Psi(\vec{r}) = \frac{u(r)}{\sqrt{r}} \exp [i(l\varphi + p_z z)]; \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Для решения уравнение движения удобно ввести относительную радиальную переменную $x = r - R$, $|x| \ll R$, и использовать условие $|V(r)| \ll E$. Тогда уравнение для функции $u(r)$ становится подобным уравнению Шрёдингера для поперечного движения в случае плоскостного каналирования :

$$\left\{ -\frac{d^2}{dx^2} + 2E_0 V_{\text{eff}}(x) \right\} u(x) = \varepsilon u(x).$$

Собственное значение для полной энергии частицы определяется квантовыми числами l , p_z и энергией радиального движения ε в поле эффективного потенциала $V_{\text{eff}}(x)$: [1, 2, 9]

$$E \approx E_0 + \varepsilon; \quad E_0^2 = m^2 + p_z^2 + \frac{l^2 - 1/4}{R^2};$$

$$V_{\text{eff}}(x) = V(x) + \frac{p_0^2}{E_0 R} x = V(x) + \frac{p_0 v}{R} x; \quad p_0 = \sqrt{E_0^2 - m^2 - p_z^2}; \quad (10)$$

$v = \frac{p_0}{E_0}$ – скорость частицы. Классическое условие возникновения связанного состояния частицы в канале

$$R \geq \frac{p_0 v}{|V'(x)|_{\text{max}}} \equiv R_{\text{кр}}, \quad V'(x)_{\text{max}} = V_{\text{eff}}(x_1), \quad (11)$$

Однако в квантовой теории условие (11) не является достаточным для того, чтобы частица была захвачена в канал и изменила направление движения на большой угол. Это связано с возможностью туннелирования частицы под потенциальным барьером и с переходом в состояние непрерывного спектра, соответствующее прямолинейному движению частицы. Время жизни частицы в изогнутом канале, а следовательно, и угол поворота зависят от вида потенциала.

Частицы, заселившие уровни связанного движения с квантовым числом $k < k_1$, при выполнении условия $R \gg 2n_1$ будут двигаться по круговой траектории с радиусом R , что приведет к повороту захваченной части пучка на угол

$$\beta(L_r) = L_r/R,$$

где $L_r \leq L$ – путь, пройденный частицей в изогнутом кристалле.

При длине кристалла L угол поворота определяется только той частью траектории, на которой частица находилась на соответствующем уровне связанного движения, и его можно рассчитать по следующей формуле:

$$\beta_k = \frac{L_k}{R} [1 - \exp(-L/L_k)]. \quad (12)$$

Для гауссовой модели падающего пучка распределение по углам для интенсивности пучка на выходе из кристалла определяется следующим выражением:

$$I(\beta) = I_0 \Phi(\beta); \quad I_0 = \frac{\theta}{(2k_1 + 1)\sqrt{\pi}} \frac{\omega}{dV'(x_0)};$$

$$\Phi(\beta) = \sum_{k=0}^{k_1} (2k + 1) \Phi_0(\beta - \beta_k), \quad (13)$$

где величина β_k определяется формулой (12).

Рис.3 показывает характерное угловое распределение пучка на выходе из кристалла.

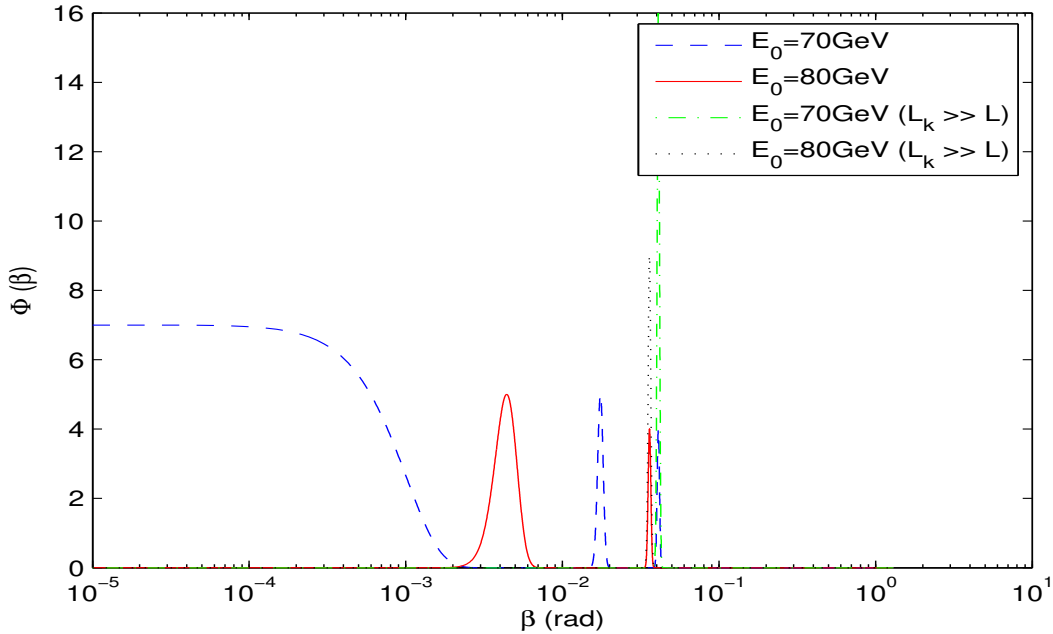


Рисунок 3. — Угловое распределение частиц на выходе из изогнутого кристалла.

В главе 4 рассчитан спектр эквивалентных фотонов периодически модулированного сгустка электронов на выходе из ондулятора рентгеновского лазера на свободных электронах и показано, что он содержит когерентную составляющую, которая дает возможность получения дополнительных импульсов рентгеновского излучения, направленных под большим углом к направлению движения пучка электронов в ондуляторе, что расширяет возможности использования таких лазеров.

В области энергии фотонов, много меньшей энергии частицы ($\omega \ll E$), спектр псевдофотонов можно получить на основе классического рассмотрения электромагнитного поля (используется натуральная система единиц $\hbar =$

$c = 1$). Предположим, что пучок релятивистских электронов обладает достаточно малой угловой расходимостью, так что скорость отдельной частицы можно представить в виде

$$\vec{v}_a = \vec{v} + \vec{v}'_a, \quad v'_a \ll v; \quad 1 - v^2 = \frac{m^2}{E^2} \equiv \gamma^{-2} \ll 1.$$

Ось z направим вдоль средней скорости пучка \vec{v} и предположим, что угловая расходимость частиц пучка относительно этой оси $\theta_a < \gamma^{-1}$. Флуктуации модуля скорости частиц связаны с некогерентностью пучка по энергии и удовлетворяют условию $|v_a - v| \approx \gamma^{-2} \Delta E / E \ll \gamma^{-2}$. Тогда компоненты вектора \vec{v}'_a , определяющего флуктуации скоростей частиц в пучке с точностью до слагаемых γ^{-2} , можно представить в виде

$$\vec{v}'_a = \vec{\theta}_a - \frac{\theta_a^2}{2} \vec{e}_z, \quad \theta_a^2 = \theta_{ax}^2 + \theta_{ay}^2, \quad \vec{\theta}_a = \theta_{ax} \vec{e}_x + \theta_{ay} \vec{e}_y,$$

где $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – единичные векторы

Проекция потока энергии электромагнитного поля, связанного с пучком частиц, на ось z можно разбить на две части:

$$\Pi = \Pi_{sp} + \Pi_{coh}.$$

Для некогерентный потока Π_{sp} получается обычное выражение:

$$\begin{aligned} \Pi_{sp} &= \frac{e^2}{2v\pi^2} N \int d\vec{k} \frac{k_{\perp}^2}{[k_z^2 \gamma^{-2} + k_{\perp}^2]^2} = \int \omega n(\omega) d\omega, \\ n_{sp}(\omega) &= N \frac{2e^2}{\pi\omega} \ln \left(\frac{m\gamma}{\omega} \right), \quad |\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_a| \approx \omega \gamma^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для когерентной части потока псевдофотонов находим

$$\begin{aligned} \Pi_{coh} &= N^2 \frac{e^2}{2v\pi^2} \xi \int_0^{\infty} dk \int d\vec{\theta}_k \frac{\vec{\theta}_k^2}{(\gamma^{-2} + \vec{\theta}_k^2)^2} e^{-(zkv)^2 \sigma_a^2 \vec{\theta}_k^2 / 2} e^{-\vec{\theta}_k^2 k^2 \sigma_b^2 / 2} \times \\ &\quad \times \left| \frac{1 - e^{iLk_z}}{K(1 - e^{idk_z})} \exp \left[\frac{-k_z^2 \sigma_c^2}{4} \right] \right|^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где величина σ_a обуславливает угловой разброс направлений скорости, а σ_b – среднеквадратичный разброс по поперечным координатам. Параметр $\xi = e^{-d^2/4\sigma_c^2} < 1$ определяет глубину модуляции в сгустке, от которой, в свою очередь, зависят флуктуации периода модуляции $\sigma_c \ll d$; d – период модуляции сгустка длиной $L = Kd$ и число микросгустков $K \gg 1$. Спектральная плотность когерентных псевдофотонов имеет острые максимумы при частотах $\omega_n = 2\pi n/d$, причем основной вклад вносит первая гармоника, соответствующая $n = 1$:

$$n_{coh}(\omega) \approx N^2 \frac{e^2}{2v\pi\omega} \frac{d^2}{L^2} \left[-e^{a^2\gamma^{-2}} Ei(-a^2\gamma^{-2})(1 + a^2\gamma^{-2}) - 1 \right] \times \\ \times e^{-2\pi^2\sigma_c^2/d^2} \sin^2 \left[(\omega - 2\pi/d) L/2 \right] / \sin^2 \left[(\omega - 2\pi/d) d/2 \right], \quad (16)$$

Сравним вклады когерентной (16) и некогерентной (14) составляющих в распределение псевдофотонов для параметров пучка электронов, соответствующих РЛСЭ:

$$\gamma^{-1} = \frac{0.511}{6.7 \cdot 10^3} \approx 8 \cdot 10^{-5}, k \approx 10^{10} m^{-1}, N \approx 1nC \approx 6 \cdot 10^9, \frac{2\pi^2\sigma_c^2}{d^2} \approx 0.3, \\ \sigma_a = 10^{-4}, \sigma_b = 2 \cdot 10^{-7} m, z = L = 4.3 \cdot 10^{-6} m, d = 6.28 \cdot 10^{-10} m, \\ a^2\gamma^{-2} = 6.4 \cdot 10^{-9} \cdot 0.5 [1.6 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-8} + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{16}] \approx 0.03.$$

Оценим число некогерентных псевдофотонов в интервале частот $\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx 10^{-3}$, характерном для импульса рентгеновского излучения в РЛСЭ.

$$N_{sp} = N \frac{2e^2}{\pi} \ln \frac{m\gamma}{\omega} \frac{\Delta\omega}{\omega} \approx 10^9 \cdot 10^{-5} \approx 10^4,$$

что существенно меньше величины, соответствующей импульсу РЛСЭ.

На Рис.4 показаны спектральные плотности распределения спонтанных и когерентных псевдофотонов. [6, 11]

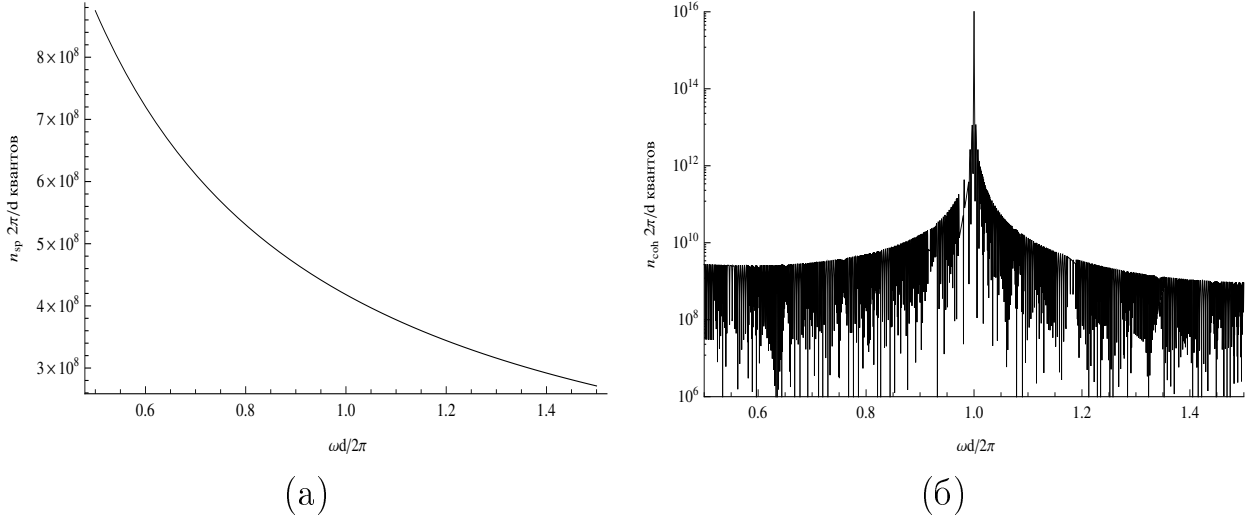


Рисунок 4. — Спектральная плотность распределения псевдофотонов модулированного пучка: а – некогерентных; б – когерентных в логарифмическом масштабе

В то же время интегрирование формулы (16) по такому же интервалу вблизи частоты $\omega_0 = \frac{2\pi}{d}$ дает число псевдофотонов, сопоставимое с числом реальных фотонов в импульсе РЛСЭ.

$$N_{coh} = N^2 \frac{e^2}{2} \frac{1}{\omega_0 L} \approx 3.6 \cdot 10^{19} \cdot \frac{1}{137} \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^4} \approx 4.5 \cdot 10^{12}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Показано, что аналитическое равномерно пригодное приближение для описания стационарных состояний квантовой модели Раби позволяет вычислять наблюдаемые характеристики системы вне рамок приближения вращающейся волны в согласии с численным решением [3, 4, 7, 8, 12].

2. Предсказан новый "поляронный" эффект для основного состояния квантовой модели Раби, обусловленный антивращающимися слагаемыми в исходном гамильтониане [3, 4].

3. Вычислен радиационно-индуцированный потенциал взаимодействия двух кубитов и показано, что расстояние между ними определяет дополнительный параметр для управления характеристиками системы из двух кубитов, взаимодействующих с одномодовым квантовым полем в резонаторе в режиме сильной связи [5, 13].

4. Показано, что в угловом распределении заряженных частиц на выходе из изогнутого монокристалла при радиусе изгиба, близком к критическому, проявляются квантовые эффекты, обусловленные отличной от нуля проницаемостью барьера, создаваемого кристаллографической плоскостью [1, 2, 9].

5. На основе метода эквивалентных фотонов показано, что модулированный пучок заряженных частиц в рентгеновском лазере на свободных электронах можно использовать для получения дополнительных импульсов когерентного рентгеновского излучения, направленных под большим углом к направлению движения пучка [6, 10, 11].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Основные результаты диссертации связаны с теоретическим анализом условий, при которых проявляются квантовые и непертурбативные эффекты в некоторых системах квантовой оптики и физики конденсированных сред. Они могут быть использованы при постановке новых экспериментов для наблюдения и практического применения этих эффектов. Методы и результаты, описанные в диссертации могут быть использованы в спецкурсах по прикладным проблемам квантовой теории.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ**Статьи в рецензируемых научных журналах**

1. *Нгуен Куанг Шан*. Квантовые эффекты при каналировании частиц в изогнутом кристалле / Нгуен Куанг Шан, И. Д. Феранчук // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. — 2016. — № 3. — С. 13–20.

2. *Ilya Feranchuk*. Quantum effects for particles channeling in a bent crystal / Ilya Feranchuk, Nguyen Quang San // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2016. — Vol. 383. — P. 109–114.

3. *Леонов, А. В.* Равномерно пригодное приближение для характеристик электромагнитного поля в квантовой модели Раби / А. В. Леонов, И. Д. Феранчук, О. Д. Скоромник, Н. К. Шан // Журнал прикладной спектроскопии. — 2019. — № 6. — С. 917–924.

4. *Leonau, A. U.* A Uniformly Suitable Approximation for the Characteristics of the Electromagnetic Field in the Rabi Quantum Model / A. U. Leonau, I. D. Feranchuk, O. D. Skoromnik, N. Q. San // Journal of Applied Spectroscopy. — 2020. — Vol. 86, № 6. — P. 1031–1038.

5. *Feranchuk, I. D.* Radiation-induced interaction potential of two qubits strongly coupled with a quantized electromagnetic field / I. D. Feranchuk, N. Q. San, A. U. Leonau, O. D. Skoromnik // Phys. Rev. A. — 2020. — Vol. 102, № 4. — P. 043702 (7 pp.).

6. *Феранчук, И. Д.* Метод эквивалентных фотонов для модулированного пучка электронов / И. Д. Феранчук, О. Д. Скоромник, Нгуен Куанг Шан // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. — 2020. — № 3. — С. 24–31.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. *Нгуен Куанг Шан*. Стационарные состояния модели Раби / Нгуен Куанг Шан // Материалы XXVII медунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния», Гродно, 18 апреля 2019 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ. – техн. фак.; редкол.: А. Е. Герман (гл.ред.) [и др.]. — Гродно: ГрГУ, 2019. — С. 119-121.

8. *Nguyen Quang San*. The study of thermodynamic values of the quantum Rabi model based on the operator method / Nguyen Quang San, I. D. Feranchuk // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г. / редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. — Минск: РИВШ, 2019. — 320 с. — С. 40-41.

9. *Nguyen Quang San*. Quantum effects for channeling in a bent crystal / Nguyen Quang San // Материалы XXVIII медунар. науч.-практ. конф. аспирант., магистр. и студ. «Физика конденсированного состояния», Гродно, 17 апреля 2020 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ. – техн. фак.; редкол.: А. Е. Герман (гл.ред.) [и др.]. — Гродно: ГрГУ, 2020. — С. 3-6.

10. *Нгуен Куанг Шан*. Метод эквивалентных фотонов для модулированного пучка электронов / Нгуен Куанг Шан // X Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», Гомель, 22 апреля 2021 г. : материалы: в 2 ч. – Электрон. дан. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – Ч. 1. – С. 163-165. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: IE от 11 версии и выше или любой актуальный браузер, скорость доступа от 56 кбит. – Режим доступа: <http://conference.gsu.by>. – Заглавие с экрана.

11. *Feranchuk, I. D.* Method of the pseudo-photons in electrodynamics for modulated electron beam / I. D. Feranchuk, Nguyen Quang San // Конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф.И. Федорова, Гомель, 25 июня 2021 г. : материалы: в 1 ч. – Электрон. дан. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 14-19. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования: IE от 11 версии и выше или любой актуальный браузер, скорость доступа от 56 кбит. – Режим доступа: <http://conference.gsu.by>. – Заглавие с экрана.

Тезисы докладов на конференциях

12. *Feranchuk, I.* Statistical Characteristics of the Quantum Rabi Model beyond the Rotating Wave Approximation / I. Feranchuk, A. Leonau, N-Q San // XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQOQI'2019), Minsk, May 13-17, 2019. / B.I.Stepanov Institute of Physics; chair: Sergei Kilin. – Minsk, 2019. – P. 35.

13. *San, N. Q.* Radiation-induced interaction potential of two qubits strongly coupled to a resonant quantum field / N. Q. San, A. U. Leonau, O. D. Skoromnik, I.D. Feranchuk // Современные проблемы физики : материалы междунар. школы-конф. молодых ученых и специалистов, Минск, 04-06 ноября, 2020 г. / Институт физики НАН Беларуси ; Под ред.: И.С. Никончук, М.С. Усачёнка. — Минск: ИФ НАН Беларуси, 2020. — С. 33-34.

РЕЗЮМЕ

Нгуен Куанг Шан

Непертурбативный расчет квантовых эффектов при взаимодействии заряженных частиц и резонансного излучения с веществом

Ключевые слова: модель Раби, двухуровневая система, операторный метод, ультра сильной связи, каналирование, изогнутый кристалл, критический радиус, самомодуляция пучка электронов, когерентное рентгеновское излучение в лазерах на свободных электронах, параметрическое рентгеновское излучение.

Целью диссертационной работы является описание эффектов, возникающих при взаимодействии заряженных частиц и резонансного излучения с веществом, в более широкой, по сравнению с исследованной ранее, области изменения физических параметров среды и излучения.

В диссертации получены следующие новые результаты. Проведен анализ эффективности использования равномерно пригодного аналитического приближения операторного метода для описания стационарных состояний и наблюдаемых характеристик квантовой модели Раби вне рамок приближения вращающейся волны. Описан новый “поляронный” эффект образования связанного состояния атома и поля в основном состоянии системы, обусловленный антивращающими слагаемыми в исходном гамильтониане. Показано, что при изменении расстояния между двумя кубитами при взаимодействии с резонансным одномодовым квантовым полем в резонаторе в режиме ультра-сильной связи наблюдаемые характеристики системы существенно изменяются, что позволяет осуществлять управление этими характеристиками, и может быть использовано для записи и передачи квантовой информации. Построено квантовое описание явления каналирования релятивистских заряженных частиц в изогнутых кристаллах. Найдены волновые функции квазистационарных состояний частиц, захваченных в каналы. Показано, что собственное электромагнитное поле периодически модулированного по плотности сгустка ультрарелятивистских электронов можно рассматривать как пучок эквивалентных фотонов с резкими пиками в спектральной плотности.

Основные результаты диссертации связаны с теоретическим анализом условий, при которых проявляются квантовые и непертурбативные эффекты в некоторых системах квантовой оптики и физики конденсированных сред. Они могут быть использованы при постановке новых экспериментов для наблюдения и практического применения этих эффектов и в спецкурсах по прикладным проблемам квантовой теории.

РЭЗІЮМЭ

Нгуен Куанг Шан

Непертурбатыўны разлік квантавых эфектаў пры ўзаемадзеянні зараджаных часціц і рэзананснага выпраменьвання з рэчывам

Ключавыя словы: мадэль Рабі, двухузроўневая сістэма, оператарны метада, ультра моцная сувязь, каналіраванне, выгнуты крышталі, крытычны радыус, самомодуляцыя пучка электронаў, кагерэнтнае рэнтгенаўскае выпраменьванне ў лазерах на свабодных электронах, параметрычнае рэнтгенаўскае выпраменьванне.

Мэтай дысертацыйнай работы з'яўляецца апісанне эфектаў, якія ўзнікаюць пры ўзаемадзеянні зараджаных часціц і рэзананснага выпраменьвання з рэчывам, у больш шырокай, у параўнанні з даследаванай раней, вобласці змены фізічных параметраў асяроддзя і выпраменьвання.

У дысертацыі атрыманы наступныя новыя вынікі. Праведзены аналіз эфектыўнасці выкарыстання раўнамерна прыдатнага аналітычнага набліжэння операторнага метада для апісання стацыянарных станаў і назіраных характарыстык квантавай мадэлі Рабі па-за рамкамі набліжэння паварочанай хвалі. Апісаны новы "паляронны" эфект генерацыі звязанага стану атама і поля ў асноўным стане сістэмы, абумоўлены контрапаваротнымі ўкладамі ў зыходным гамільтониане. Паказана, што пры змене адлегласці паміж двума кубітамі пры ўзаемадзеянні з рэзанансным аднамодавым квантавым полем ў рэзанатары ў рэжыме ультра-моцнай сувязі назіраныя характарыстыкі сістэмы істотна змяняюцца, што дазваляе ажыццяўляць кіраванне гэтымі характарыстыкамі, і можа быць выкарыстана для запісу і перадачы квантавай інфармацыі. Пабудавана квантавае апісанне эфекту каналіравання рэлятывісцкіх зараджаных часціц у выгнутых крышталях. Знойдзеныя хвалевыя функцыі квазістацыянарных станаў часціц, захопленых у каналы. Акрамя таго, паказана, што ўласнае электрамагнітнае поле перыядычна модуляванага па шчыльнасці згустку ультрарэлятывісцкіх электронаў можна разглядаць як пучок эквівалентных фатонаў з вострымі пікамі ў спектральнай шчыльнасці.

Асноўныя вынікі дысертацыі звязаны з тэарэтычным аналізам умоў, пры якіх выяўляюцца квантавыя і непертурбатывныя эфекты ў некаторых сістэмах квантавай оптыкі і фізікі кандэнсаваных асяроддзяў. Яны могуць быць выкарыстаны пры пастаноўцы новых эксперыментаў для назірання і практычнага прымянення гэтых эфектаў. Метады і вынікі, апісаныя ў дысертацыі могуць быць выкарыстаны ў спецкурсах па прыкладных праблемах квантавай тэорыі.

SUMMARY

Nguyen Quang San

Nonperturbative calculation of quantum effects in the interaction of charged particles and resonance radiation with matter

Key words: Rabi model, two-level system, operator method, ultrastrong coupling, channeling, bent crystal, critical radius, self-modulation of the electron bunch, coherent X-ray radiation from the X-ray free electron laser, parametric X-ray radiation.

The goal of the dissertation is to describe the effects arising from the interaction of charged particles and resonance radiation with matter, in a wider range of changes in the physical parameters of the medium and radiation compared to the previously studied one.

In the dissertation, the following new results were obtained. An analysis of the efficiency of using a uniformly available analytical approximation of the operator method for describing stationary states and observable characteristics of the quantum Rabi model outside the framework of the rotating wave approximation is carried out. A new “polaron” effect of the formation of a bound state of an atom and a field in the ground state of the system is described, which is caused by the anti-rotational terms in the initial Hamiltonian. It is shown that when the distance between two qubits changes when interacting with a resonant single-mode quantum field in a resonator in the ultra-strong coupling mode, the observed characteristics of the system change significantly, which makes it possible to control these characteristics, and can be used for recording and transmitting quantum information. A quantum description of the phenomenon of channeling of relativistic charged particles in bent crystals is constructed. The wave functions of quasi-stationary states of particles trapped in channels are found. In addition, it is shown that the intrinsic electromagnetic field of a periodically density-modulated bunch of ultrarelativistic electrons can be considered as a beam of equivalent photons with sharp peaks in the spectral density.

The main results of the dissertation are related to a theoretical analysis of the conditions under which quantum and nonperturbative effects appear in some systems of quantum optics and condensed matter physics. They can be used when setting up new experiments to observe and apply these effects in practice. The methods and results described in the dissertation can be used in special courses on applied problems of quantum theory.

НГУЕН КУАНГ ШАН

**НЕПЕРТУРБАТИВНОЕ ОПИСАНИЕ КВАНТОВЫХ
ЭФФЕКТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РЕЗОНАНСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Подписано в печать «04» января 2022 г. Формат 60 × 90 1/16.

Бумага–офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.5

Учетн. изд. л. 1.0 . Тираж 60 экз. Заказ № 3

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА НАН БЕЛАРУСИ,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68.

Отпечатано на ризографе Института физики имени Б.И. Степанова НАН
Беларуси.