**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН А. Е. Бондарь

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов** Учебно-методический комплекс

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 2, семестр 3**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

**Новосибирск 2018**

Учебно-методический комплекс «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов» предназначен для студентов магистратуры физического факультета НГУ, разработан в 2018 согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018). В состав комплекса включены рабочая программа дисциплины «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов», банк обучающих материалов, банк контролирующих материалов, фонд оценочных средств.

УМК одобрен на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: д.ф.-м.н. Я.С. Гринберг

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Ответственный за образовательную программу

заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН А. Е. Бондарь

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов** Рабочая программа дисциплины

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 2, семестр 3**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Семестр** | **Общий**  **объем** | **Виды учебных занятий (в часах)** | | | | | **Промежуточная аттестация**  **(в период сессии) (в часах)** | | | | |
| Контактная работа обучающихся  с преподавателем | | | | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа  обучающихся с  преподавателем | | | |
| Лекции | Семинары | Практические занятия | Лабораторные занятия | Консультации | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 2 | 72 | 16 | 16 |  |  | 18 | 18 | 2 |  |  | 2 |
| Всего 72 часа / 2 зачетные единицы  из них:  - контактная работа 36 часов  - в интерактивных формах 16 часов | | | | | | | | | | | |
| Компетенции ПК-1,ПК-2 | | | | | | | | | | | |

**Новосибирск 2018**

Рабочая программа дисциплины «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов», предназначена для магистрантов физического факультета НГУ, разработана в 2018 году согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018).

Место дисциплины в структуре учебного плана

Б.1 «Вариативная часть».

Рабочая программа дисциплины одобрена на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: д.ф.-м.н. Я.С. Гринберг

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Ответственный за образовательную программу

заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**Содержание**

[Аннотация 6](#_Toc536133162)

[1. Цели освоения дисциплины 7](#_Toc536133163)

[2. Место дисциплины в структуре образовательной программы 7](#_Toc536133164)

[3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины 7](#_Toc536133165)

[4. Структура и содержание дисциплины «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов» 9](#_Toc536133166)

[5. Образовательные технологии 10](#_Toc536133167)

[Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. 11](#_Toc536133168)

[7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания 11](#_Toc536133169)

[8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины 11](#_Toc536133170)

[9. Материально-техническое обеспечение дисциплины: 11](#_Toc536133171)

[III. Банк контролирующих материалов 13](#_Toc536133172)

# Аннотация

Программа курса **«Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов»** составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки магистра по направлению подготовки 03.04.02 Физика (уровень магистратуры), а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) кафедрой квантовой электроники. Дисциплина изучается студентами второго курса магистратуры физического факультета.

В результате освоения курса у обучающегося должны быть сформированы профессиональные компетенции ПК-1 и ПК-2.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинары, контрольные работы, домашние задания, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос, контрольные.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

* занятия лекционного типа – 20 часа;
* занятия семинарского типа – 12 часов;
* самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
* промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультация и экзамен) – 22 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 16 часов.

# 1. Цели освоения дисциплины

Цели курса – овладение основными представлениями квантовой электроники сверхпроводящих систем и их применением в квантовых информационных технологиях.

# 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов» является дисциплиной специализации в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть годового цикла и необходим для овладения основными представлениями об элементной базе современных квантовых процессоров.

Курс относится к циклу фундаментальных общефизических дисциплин. В результате прохождения курса у студентов физического факультета должно сформироваться представление о фундаментальных физических принципах реализации кубитов на основе переходов Джозефсона в сверхпроводниках. Необходимые предпосылки для успешного освоения курса перечислены далее. В цикле математических дисциплин: знание линейной алгебры, математического анализа, функционального анализа и умение применять эти знания при решении задач. В цикле физических дисциплин: знание общей физики (включая физику твердого тела) и квантовой механики. Необходимость владения указанными выше математическими дисциплинами обусловлена тем обстоятельством, что они составляют основу математического аппарата квантовой физики. Выбор физических дисциплин, знание которых необходимо для освоения курса, обусловлен тем, что изучение физики сверхпроводящих переходов Джозефсона и их приложений в квантовой информатике требует знания квантовой механики, электродинамики и физики твердого тела.

Данный курс является специальным, предназначенным для освоения представлений о квантовой электродинамике джозефсоновских кубитов, что в дальнейшем позволит выпускникам магистрантуры вести исследовательскую деятельность в данном направлении.

# 3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

**научно-исследовательская деятельность:**

ПК-1: способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта, в том числе:

ПК 1.1: знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области физики сверхпроводников, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в области физики сверхпроводников.

ПК 1.2: уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий.

ПК 1.3: владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований.

**научно-инновационная деятельность:**

ПК-2: способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов.

ПК-2.1: знать основы физики сверхпроводников, включая переходы Джозефсона, особенности различных схем реализации кубитов на сверхпроводниках, основные применения сверхпроводящих кубитов для создания квантовых процессоров.

ПК-2.2: уметь применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов;

ПК-2.3: владеть базовыми принципами приготовления и управления квантовыми состояниями сверхпроводящих квантовых систем, основными физическими моделями сверхпроводящих переходов Джозефсона, основными принципами резонаторной квантовой электродинамики, описаниями динамики сверхпроводящих кубитов.

# 4. Структура и содержание дисциплины «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых джозефсоновских кубитов»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **п/п** | **Раздел**  **дисциплины** | **Неделя семестра** | **Всего** | **Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)** | | | **Промежуточная аттестация (в период сессии)**  **(в часах)** |
| Аудиторные часы | | Сам. работа в течение сем-ра (не включая период сессии) |
| Лекции  (кол-во часов) | Семинары  (кол-во  часов) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Эффект Джозефсона и макроскопические квантовые явления  *Промежуточный контроль – домашнее задание* | 1 | 4 | 2 |  | 2 |  |
| 2 | Сверхпроводниковые устройства с джозефсоновскими контактами  *Промежуточный контроль – выборочный опрос* | 2-3 | 6 | 4 |  | 2 |  |
| 3 | Макроскопические квантовые эффекты в джозефсоновских переходах ультрамалых размеров  *Промежуточный контроль – выборочный опрос* | 4 - 6 | 8 | 2 | 4 | 2 |  |
| 4 | Квантовая электродинамика сверхпроводниковых волноводных структур в микроволновом диапазоне частот  *Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача и разбор домашнего задания* | 7 - 10 | 10 | 4 | 4 | 2 |  |
| 5 | Описание процессов релаксации и декогерентности в твердотельных кубитах  *Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача домашнего задания* | 11-13 | 10 | 2 | 4 | 4 |  |
| 6 | Экспериментальное определение основных параметров джозефсоновских кубитов  *Домашняя контрольно-графическая работа, разбор домашнего задания* | 14-15 | 8 | 2 | 2 | 4 |  |
| 7 | Контрольная работа | 16 | 4 |  | 2 | 2 |  |
| 8 | Групповая консультация | 17 | 2 |  |  |  | 2 |
| 10 | Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену |  | 18 |  |  |  | 18 |
| 11 | Экзамен |  | 2 |  |  |  | 2 |
| **Всего** | | | **72** | **16** | **16** | **18** | **22** |

**Программа курса лекций**

1. Эффект Джозефсона и макроскопические квантовые явления.
   1. Джозефсоновские соотношения между током и фазой.
   2. Стационарный эффект Джозефсона
   3. Нестационарный эффект Джозефсона
   4. Характеристики Джозефсоновского контакта
   5. Джозефсоновская генерация.
   6. Резистивная модель Джозефсоновского контакта
2. Сверхпроводниковые устройства с Джозефсоновскими контактами
   1. Сверхпроводящее кольцо с одним Джозефсоновским контактом
   2. Сверхпроводящее кольцо с двумя Джозефсоновскими контактами
   3. Сверхпроводящее кольцо с тремя Джозефсоновскими контактами. Потоковый кубит.
   4. Фазовый кубит
   5. Трансмон
3. Макроскопические квантовые эффекты в Джозефсоновских переходах ультрамалых размеров.
   1. Заряд и фаза как квантовые переменные
   2. Кулоновская блокада
   3. Зарядовый кубит и его свойства.
4. Квантовая электродинамика сверхпроводниковых волноводных структур в микроволновом диапазоне частот
   1. Взаимодействие микроволновых фотонов с кубитами в одномерных твердотельных структурах
   2. Гамильтониан взаимодействия. Модель Джейнесса-Камингса.
   3. Кубит в закрытом резонаторе. Суперпозиционное состояние кубита с фотоном. Вакуумные Раби колебания.
   4. Кубит в резонаторе с конечной добротностью. Спонтанное излучение кубита.
   5. Кубит в дисперсионном режиме. Гамильтониан взаимодействия.
5. Описание процессов релаксации и декогерентости в твердотельных кубитах
   1. Выражение однокубитных состояний в терминах матрицы плотности.
   2. Кинетическое уравнение для матрицы плотности. Оператор Линдблада.
   3. Коэффициент прохождения микроволнового сигнала через однокубитную структуру в однофотонном приближении. Уравнение Омельянчука.
6. Экспериментальное определение основных параметров Джозефсоновских кубитов
   1. Спектрокопия энергетических уровней потокового кубита
   2. Измерение времени релаксации кубита. Затухающие Раби колебания.
   3. Измерение времени декогеренции кубита. Интерференция Рамсея.
7. Заключение
   1. Типы сверхпроводниковых кубитов и их сравнительные характеристики.
   2. Существующие квантовые процессоры на основе сверхпроводниковых кубитов
   3. Дальнейшие перспективы развития применения сверпроводниковых кубитов в квантовых технологиях

# 5. Образовательные технологии

1. Лекции с использованием презентации PowerPoint
2. Самостоятельная подготовка доклада с презентацией.

# 6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Имеется (в электронной форме) конспект лекций по курсу и доступная учебно-научная литература.

# 7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Оценочным средством для текущего контроля успеваемости в части самостоятельной работы является регулярная сдача-приемка домашних заданий и написание контрольной работы. Оценочным средством окончательного контроля является экзамен. Освоение компетенций оценивается по способности проводить самостоятельные исследования в области квантовых информационных технологий и владению современным состоянием дел в этой области.

Освоение компетенций оценивается по пятибалльной шкале. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции сформированы не ниже порогового уровня в полном объеме в той части, которая соответствует содержанию дисциплины.

## Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература

1. **Е. В. Ильичев, Я. С. Гринберг** Квантовая информатика и квантовые биты на основе сверхпроводниковых Джозефсоновских структур, Новосибирск, Изд-во НГТУ. 2013.-172 стр. (Серия «Учебники НГТУ»
2. **А. Н. Омельянчук, У. В. Ильичев, С. Н. Шевченко** Квантовые когерентные явления в Джозефсоновских кубитах.-Киев.-Наукова Думка. 2013.-168 стр.

**8.1. Программное обеспечение для лиц с ограниченными возможностями здоровья**

Таблица 8.2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование ПО** | **Назначение** | **Место размещения** |
| 1 | Jaws for Windows | Программа экранного доступа к системным и офисным приложениям, включая интернет-обозреватели. Информация с экрана считывается вслух, обеспечивая возможность речевого доступа к самому разнообразному контенту. Jaws также позволяет выводить информацию на обновляемый дисплей Брайля. JAWS включает большой набор клавиатурных команд, позволяющих воспроизвести действия, которые обычно выполняются только при помощи мыши. | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ, компьютерные классы (сетевые лицензии) |
| 2 | Duxbury Braille Translator v11.3 для Брайлевского принтера | Программа перевода текста в текст Брайля, и печати на Брайлевском принтере | Ресурсный центр |
| 3 | "MAGic Pro 13" (увеличение+речь) | Программа для людей со слабым зрением и для незрячих людей. Программа позволяет увеличить изображение на экране до 36 крат, есть функция речевого сопровождения | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |

## Материально-техническое обеспечение дисциплины

Требуется аудитория с использованием мультимедийного проектора

Оборудование, обеспечивающее адаптацию электронных и печатных образовательных ресурсов для обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья

Таблица 9.1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование оборудования** | **Назначение** | **Место размещения** |
|  | Принтер Брайля | Печать рельефно-точечным шрифтом Брайля | Ресурсный центр |
|  | Увеличитель Prodigi Duo Tablet 24 | Устройство для чтения и увеличения плоскопечатного текста | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Специализированное мобильное рабочее место «ЭлНот 311» | Мобильный компьютер с дисплеем брайля | Ресурсный центр |
|  | Портативный тактильный дисплей Брайля “Focus 40 Blue” | Навигация в операционных системах, программах и интернете с помощью отображения рельефно-точечным шрифтом Брайля получаемой информации | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Устройство для печати тактильной графики «PIAF» | Печать тактильных графических изображений | Ресурсный центр |
|  | Портативный видео-увеличитель RUBY XL HD | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Складной настольный электронный видео-увеличитель «TOPAZ PHD 15» | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Электронный ручной видео-увеличитель ONYX Deskset HD 22” | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Смартфон EISmart G3 | Смартфон клавишным управлением и озвученным интерфейсом, обучение спутниковой навигации. | Ресурсный центр |
|  | FM-система «Сонет-РСМ» РМ-3-1 | Звуковая FM-система для людей с нарушением слуха, улучшающая восприятие голосовой информации | Большая физическая аудитория главного корпуса НГУ |

**II. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы студентов, выполнению курсовых проектов и лабораторных работ**

ЗАДАЧИ

1. Нарисуйте качественный график зависимости фазы на Джозефсоновском контакте при изменении тока, протекающего через контакт при I<IC.

2. Покажите, что автономный Джозефсоновский контакт обладает нелинейной индуктивностью .

3. Сверхпроводящий ток куперовских пар JS записывается через волновую функцию сверхпроводящего конденсата Ψ в отсутствие магнитного поля следующим образом . Как преобразуется это выражение при наличии магнитного поля? Как из этого преобразованного выражения следует квантование магнитного потока в многосвязном сверхпроводнике?

4. Качественно объясните эффект кулоновской блокады. Оцените емкость контакта, при которой этот эффект будет проявляться.

5. Пусть имеется двухямный потенциал, характеризующейся небольшой асимметрией, описываемой параметром ε0 и параметром Δ, описывающим взаимодействия между основными состояниями в этих ямах. Состояния системы в левой и правой ямах будем характеризовать волновыми функциями |L> и |R>, соответственно. Запишите гамильтониан этой системы через матрицы Паули. Найдите стационарные волновые функции и соответствующие им энергии.

6. Пусть двухямная система из предыдущей задачи в начальный момент времени находится в левой яме. Какова вероятность обнаружить систему в этой же левой яме в произвольный момент времени t?

7. Двухкубитная система описывается гамильтонианом . Найдите волновые функции и уровни энергии этой системы. Как структура уровней зависит от знака J?

8. Что такое вакуумные Раби осцилляции? Почему это чисто квантовый эффект, который не имеет места в классическом случае?

9. Для того, чтобы квантовая система могла играть роль кубита, она должна быть сильно ангармонической. Почему?

10. В закрытом резонаторе имеется пять одномодовых фотона и кубит, чья энергия близка к энергии фотонов. С помощью гамильтониана Джейнесса-Камингса найдите стационарные энергии этой системы.

11. Показать, что гамильтониан Джейнесса-Камингса сохраняет число возбуждений в системе .

12. Как из гамильтониана Джейнесса- Камингса получить выражение для гамильтониана в дисперсионном режиме?

13. Нарисуйте качественно структуру уровней для гамильтониана в диспрерсионном режиме.

14. Как по вольтпотоковой характеристике потокового кубита определить энергию возбуждения кубита?

# III. Банк контролирующих материалов

Вопросы к экзамену:

1. Явление сверхпроводимости. Основные свойства сверхпроводников. Критический ток. Критическое магнитное поле. Эффект Мейснера-Оксенфельда. Квантование магнитного потока в многосвязных сверхпроводниках.

2. Переход Джозефсона. Основные характеристики Джозефсоновского контакта. Соотношение между током и фазой. Стационарный эффект Джозефсона.

3. Нестационарный эффект Джозефсона. Резистивная модель Джозефсоновского контакта. Джозефсоновская генерация. Вольтамперная характеристика Джозефсонолвского контакта.

4. Сверхпроводящее кольцо с одним Джозефсоновским контактом. Потенциальная кривая. Зависимость внутреннего магнитного потока от внешнего. Двухямный потенциал. Низколежащие квантовые уровни.

5. Сверхпроводящее кольцо с двумя Джозефсоновскими контактами. Ток- фазовые соотношения. Гамильтониан.

6. Сверхпроводящее кольцо с тремя Джозефсоновскими контактами. Потенциальный рельеф. Гамильтониан. Низколежащие квантовые уровни. Величина расщепления.

7. Основные типы сверхпроводниковых кубитов и их свойства. Потоковый кубит. Зависимость энергетических уровней потокового кубита от смещения постоянным магнитным полем. Фазовый кубит. Трансмон.

8. Заряд и фаза Джозефсоновмкого контакта как квантовые переменные. Кулоновская блокада. Зарядовый кубит и его свойства.

9. Взаимодействие электромагнитного поля с электрическим диполем. Вывод Гамильтониана взаимодействия в терминах операторов рождения и уничтожения. Гамильтониан Джейнесса-Камингса.

10. Энергетические уровни гамильтониана Джейнесса-Камингса. Одетые состояния. Расщепление уровней в пределе слабой и сильной связи.

11. Кубит в закрытом резонаторе. Суперпозиционное состояние кубита с фотоном Вакуумные Раби колебания.

12. Кубит в резонаторе с конечной добротностью. Спонтанное излучение кубита в волновод. Эффект Парселла. Затухающие Раби колебания.

13. Кубит в дисперсионном режиме. Гамильтониан взаимодействия. Уровни энергии системы кубит+электромагнитное поле.

14. Кинетическое уравнение для матрицы плотности кубита с учетом процессов декогеренции и релаксации. Оператор Линдблада.

15. Коэффициент прохождения микроволнового сигнала через резонатор с кубитом в однофотонном приближении.

16. Определение энергетических уровней потокового кубита. Протокол измерений.

17. Определение времени релаксации потокового кубита. Протокол измерений.

18. Интерференция Рамсея. Определение времени декогеренции кубита. Протокол измерений.

19. Вольтпотоковая характеристика потокового кубита. Протокол измерений.