**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.

**Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов**

Учебно-методический комплекс

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 1, семестр 1**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

**Новосибирск 2018**

Учебно-методический комплекс «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов» 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 «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов», 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. О.Н. Прудников

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.

**Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов**

Рабочая программа дисциплины

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 1, семестр 1**

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 |
| 1 | 36 | 16 | |  |  |  | 18 |  |  |  | 2 |  |
| Всего 36 часов / 1 зачетная единица  из них:  - контактная работа 18 часов | | | | | | | | | | | | |
| Компетенции | | | ПК-1, ПК-2 | | | | | | | | | |

**Новосибирск 2018**

Рабочая программа дисциплины «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов», предназначенная 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. О.Н. Прудников

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**Содержание**

Аннотация ..6

1. Цели освоения дисциплины 6

2. Место дисциплины в структуре ООП 6

3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины 7

4. Структура и содержание дисциплины 7

5. Образовательные технологии ….9

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов...10

7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения

дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые

контрольные задания………………………………………………………….10

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература к теоретическому курсу 10

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины 11

**Аннотация**

Программа курса **«Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов»** 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 первого 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, решение задач, самостоятельная работа студента, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос, проверка решения задач.

Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

* занятия лекционного типа – 16 часа;
* занятия практического типа – 16 часов;
* самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 38 часов;
* промежуточная аттестация (сдача дифференцированного зачета) – 2 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, занятия практического типа, дифференцированный зачет) составляет 18 часов.

## Цели освоения дисциплины

Цели курса – овладение базовыми принципами и физическими механизмами контролируемого приготовления и опроса квантовых состояний ультрахолодных атомов, использования их для построения атомно-оптических интерферометров и высокочувствительных квантовых сенсоров на их основе.

## Место дисциплины в структуре образовательной программы:

Курс «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на основе ультрахолодных атомов» является дисциплиной специализации в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть семестрового цикла и необходим для овладения основными представлениями схем построения современных сверхчувствительных квантовых сенсоров.

Для успешного освоения курса необходимо знание линейной алгебры и математического анализа и умение применять эти знания при решении задач, так как они составляют основу математического аппарата квантовой физики, знание основ электромагнитной теории света и квантовой механики, так как исследуемые вопросы опираются на квантовые свойства физических систем, т.е. волновые свойства материи, а контроль и манипуляция атомными системами производится резонансным электромагнитным полем.

1. **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 квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов 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 квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов, принципы действия, функциональные и метрологические возможности современной аппаратуры для физических исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

ПК 1.2: уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий.

ПК 1.3: владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов 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 в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

ПК-2.1 Знать: области применений квантовых сенсоров на основе атомно-отических интерферометров, основные принципы атомной интерферометрии, основные принципы построения стандартов частоты и квантовых сенсоров на основе холодных атомов, включая спектроскопию Раби, Рэмси спектроскопия, основы интерферометра Рамси – Борде, схемы построения и принципы работы атомно-оптических интерферометров (гравиметра, гироскопа).

ПК-2.2 Уметь применять полученные знания при решении задач и чтении оригинальных статей в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов;

ПК-2.3 Владеть базовыми принципами приготовления и манипуляции контролируемых состояний атомной системы основами теории лазерного охлаждения нейтральных атомов; математическими подходами для описания кинетики ультрахолодных атомов в атомно-оптических интерферометрах, проводить оценки физических параметров различных интерферометрических систем.

1. **Структура и содержание дисциплины «Квантовые стандарты частоты и квантовые сенсоры на базе ультрахолодных атомов»**

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 семестра (не включая период сессии) |
| Лекции  (кол-во часов) | Семинары  (кол-во  часов) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Введение  *Форма контроля: выборочный опрос.* | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |  |
| 2 | Математические подходы описания открытых квантовых систем.  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 2-3 | 4 | 2 | 2 | 4 |  |
| 3 | Механическое действие света на атомы  *Форма контроля: выборочный опрос и проверка решения задач* | 4 –5 | 4 | 2 | 2 | 4 |  |
| 4 | Основы лазерного охлаждения  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 6–9 | 8 | 4 | 4 | 8 |  |
| 5 | Ловушки для нейтральных атомов и ионов  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 10-12 | 6 | 3 | 3 | 6 |  |
| 6 | Физическая реализация контролируемой манипуляции квантовыми состояниями атомной системы  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 13 | 2 | 1 | 1 | 2 |  |
| 7 | Физические принципы и схемы реализаций атомных интерферометров  *Форма контроля: выборочный опрос, проверка решения задач* | 14-16 | 6 | 3 | 3 | 6 |  |
| 8 | Дифференцированный зачет | 17 | 2 | 2 |  | 6 |  |
| **Всего** | | | **36** | **18** | **16** | **38** |  |

**Программа курса лекций**

* 1. Введение.
  2. История развития работ в области ультрахолодных атомов.
  3. Основные достижения и физико-технические приложения лазерно охлажденных атомов.
  4. Области применений квантовых сенсоров на основе атомно-отических интерферометров

1. Математические подходы описания открытых квантовых систем.
   1. Два подхода для описания эволюции квантовых систем.
   2. Формализм матрицы плотности.
   3. Эквивалентность двух подходов.
   4. Оператор спонтанной релаксации для атомной матрицы плотности.
2. Механическое действие света на атомы
   1. Электродипольное приближение для описания взаимодействия света с атомами в резонансном приближении
   2. Эффект отдачи при взаимодействии света с атомами
   3. Сила спонтанного и вынужденного светового давления
3. Основы лазерного охлаждения
   1. Вигнеровское представление для атомной матрицы плотности
   2. Математический аппарат редукции квантово-кинетического уравнения к уравнению Фоккера-Планка ля квазиклассического описания кинетики атомной системы
   3. Механизмы доплеровского лазерного охлаждения.
   4. Пределы лазерного охлаждения
   5. Лазерное охлаждение в полях с неоднородной пространственной поляризацией
4. Ловушки для нейтральных атомов и ионов
   1. Магнитооптическая ловушка
   2. Ловушка Паули для ионов.
   3. Уравнения Матьё.
   4. Секулярное и микродвижение ионов в радиочастотной ловушке.
   5. Зоны устойчивости.
   6. Эффективный потенциал. Глубина радиочастотной ловушки.
   7. Лазерное охлаждение ионов.
5. Физическая реализация контролируемой манипуляции квантовыми состояниями атомной системы
   1. Решение динамической задачи эволюции квантовых состояний атома в электромагнитном поле, осцилляции Раби.
   2. Манипуляция квантовыми состояниями атомной системы с помощью резонансного электромагнитного поля.
6. Физические принципы и схемы реализаций атомных интерферометров
   1. Основные принципы атомной интерферометрии
   2. Спектроскопия Раби.
   3. Рэмси спектроскопия.
   4. Интерферометр Рамси – Борде.
   5. Оптические стандарты частоты. Девиация Алана.
   6. Рамановские переходы в трехуровневой схеме, эффективная частота Раби.
   7. Атомный интерферометр трехимпульсная схема.
   8. Эволюция квантовых состояний во внешнем поле сил.
   9. Гравиметр на основе атомного интерферометра.
   10. Лагранжиан частицы во вращающейся системе. Классическое действие во вращающейся системе. Гироскоп на основе атомного интерферометра

# Образовательные технологии

1. Мультимедийное представление лекционного материала в среде PowerPoint.
2. Реферирование публикаций на английском языке
3. Самостоятельная подготовка доклада с презентацией.

# Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

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

# 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 проверка решения задач и выборочные опросы. Оценочным средством окончательного контроля является дифференцированный зачет. Освоение компетенций оценивается по степени владения аппаратом теоретической физики в данной области, способностью решения базовых задач в области квантовых стандартов частоты и квантовых сенсоров на базе ультрахолодных атомов.

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

Основная литература

1. **Ф. Риле,** Стандарты частоты: принципы и приложения, М.: Физматлит, 2009 (электронные ресурсы, издательство "Лань").

Дополнительная литература

1. **H.J. Metcalf, P. van der Straten,** Laser cooling and trapping, 2-d edition, Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 2002.
2. **В.Г. Миногин, В.С. Летохов,** Давление лазерного излучения на атомы, М: Наука, 1986.
3. **А.П. Казанцев, Г.И. Сурдутович, В.П. Яковлев,** Механическое действие света на атомы, М: Наука, 1991.
4. **Pippa Storey and Claude Cohen-Tannoudji**, *The Feynman path integral approach to atomic interferometry. A tutorial, J. Phys. II France 4, 1999-2027 (1994)*
5. **Ch. J. Bordé**, *Atomic Interferometry and Laser Spectroscopy,* in Laser Spectroscopy X, World Scientific (1991)
6. **Paul R. Berman, Vladimir S. Malinovsky**, Principles of laser Spectroscopy and Quantum Optics, Princeton University Press . Princeton And Oxford (2011)

**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. Записать оптические уравнения Блоха для двухуровневого атома с замкнутым оптическим переходом в резонансном световом поле. Найти стационарное решение.
2. Показать, что состояние описываемое матрицей плотности rho = ½(1,-I; I,1) может описываться в терминах волновой функции. Найти данную функцию.
3. Показать, что состояние описываемое матрицей плотности rho = (2/3,I 2/15; -I 2/15,1/3) не может описываться в терминах волновой функции.
4. Состояние описывается суперпозицией частиц 

показать, что состояние каждой из частиц нельзя описать волновой функцией.

1. Провести оценку силы светового давления на атомы рубидия в поле резонансном замкнутому оптическому переходу λ = 780 нм, (естественная ширина перехода γ = 5.98 МГц). Провести оценку интервала скоростей эффективного действия доплеровских сил в процессе лазерного охлаждения атомов рубидия, скорости лазерного охлаждения и оценку температуры в рамках доплеровского предела.
2. Описать пространственной поляризационную конфигурацию поля стоячей волны получаемой в результате сложения двух встречных волн: (а) с противоположными круговыми поляризациями -  конфигурация светового поля; с ортогональными линейными поляризациями -  конфигурация светового поля
3. Получить оператор эволюции квантовых состояний двухуровневого движущегося атома взаимодействующего с полем бегущей волны с учетом эффектов отдачи.
4. Оценить энергию отдачи атома Ca взаимодействующего с полем резонансным интеркомбинационному переходу 1S0-3P1 (λ = 657 нм, γ = 2320 s-1).
5. Показать, что в четырех-импульсной схеме атомно-оптического интерферометра Рамси-Борде измеряемый сигнал не зависит от времени между вторым и третьим импульсами при достаточно малых временах.
6. Имеется генератор частоты с линейным дрейфом. Показать, что линейный дрейф частоты приводит к девиации Аллана, линейно зависящей от времени измерения.
7. Получить выражения для квантового пропагатора и классического действия: (а) свободной частицы; (б) частицы в однородном гравитационном поле.
8. Получить выражения для классического действия частицы во вращающейся системе.

# III. Банк контролирующих материалов

**Контрольные вопросы по курсу**

1. Уравнения для матрицы плотности двухуровневого атома в поле резонансном монохроматическом электромагнитном поле. Резонансное приближение.
2. Решение динамической задачи эволюции квантовых состояний двухуровневого атома в электромагнитном поле бегущей волны с учетом эффектов отдачи. Эффективная частота Раби с учетом эффектов отдачи.
3. Сила спонтанного светового давления. Оценки, основные свойства и явное выражение в поле бегущей волны.
4. Решение динамической задачи эволюции квантовых состояний двухуровневого атома в электромагнитном поле, осцилляции Раби. Спектроскопия Раби. Рэмси спектроскопия.
5. Сила вынужденного светового давления. Оценки, основные свойства и явное выражение в поле стоячей волны – логарифмический оптический потенциал.
6. Интерферометр Рамси – Борде. Влияние эффекта отдачи на регистрируемый сигнал.
7. Доплеровский механизм лазерного охлаждения двухуровневых атомов. Трение и диффузия. Доплеровский предел температуры охлаждения.
8. Рамановские переходы в трехуровневой схеме, эффективная частота Раби.
9. Субдоплеровское лазерное охлаждение атомов. Примеры световых волн с неоднородной пространственной поляризацией.
10. Трехимпульсная схема атомно-оптического интерферометра. Эволюция квантовых состояний в таком интерферометре.
11. Принципы работы магнитооптической ловушки. Магнитооптический потенциал для атомов с замкнутым оптическим переходом Fg=0→Fe=1.
12. Стандарты частоты на основе холодных атомов как оптический интерферометр квантовых состояний. Резонансы Рамси в оптическом стандарте частоты на холодных свободных атомах (Ca, Mg).
13. Ловушка Паули для ионов. Уравнения Матьё. Секулярное и микродвижение ионов в радиочастотной ловушке. Эффективный потенциал. Глубина радиочастотной ловушки. Лазерное охлаждение ионов.
14. Классическое действие во вращающейся системе. Принцип построения гироскопа на основе атомно-оптического интерферометра.
15. Эволюция квантовых состояний в поле внешних сил. Принцип работы гравиметра на основе атомного интерферометра.
16. Уравнения Блоха для атомной матрицы плотности.
17. Переход от квантового кинетического уравнения для матрицы плотности атомов к уравнению типа Фоккера-Планка для вигнеровской функции распределения атомов.
18. Физические принципы атомного интерферометра**.** Схема Рамси-Борде. Резонансы Рамси в оптическом стандарте частоты на холодных свободных атомах (Ca, Mg).
19. Элементы атомной интерферометрии. Манипуляция квантовыми состояниями атомной системы с помощью резонансного электромагнитного поля.
20. Описание открытой квантовой системы в терминах волновой функции (квантовый подход Монте-Карло для волновой функции). Квантовые скачки. Оператор релаксации для атомной матрицы плотности.