

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное учреждение  
высшего профессионального образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



подписано электронно-цифровой подписью

**Программа дисциплины**  
Квантовая оптика М2.В.2

Направление подготовки: 011200.68 - Физика

Профиль подготовки: Физика атомов и молекул

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Калачев А.А.

**Рецензент(ы):**

Гайнутдинов Р.Х.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Салахов М. Х.

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_ от "\_\_\_\_" \_\_\_\_ 201\_\_\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК № \_\_\_\_ от "\_\_\_\_" \_\_\_\_ 201\_\_\_\_ г

Регистрационный № 6107414

Казань

2014

## **Содержание**

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) Калачев А.А. , AAKalachev@kpfu.ru

## **1. Цели освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины квантовая оптика являются:

- ознакомление с основами нерелятивистской квантовой теории света и взаимодействия света с веществом;
- ознакомление с историей развития и введение в современные проблемы квантовой оптики;
- освоение наиболее известных теоретических методов, используемых при решении задач квантовой оптики.

## **2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования**

Данная учебная дисциплина включена в раздел " М2.В.2 Профессиональный" основной образовательной программы 011200.68 Физика и относится к вариативной части. Осваивается на 2 курсе, 3 семестр.

Данная учебная дисциплина включена в раздел " М2.В.2 Профессиональный" основной образовательной программы 011200.68 Физика и относится к вариативной части. Осваивается на 2 курсе, 3 семестр.

Дисциплина М2.Р.2 "Квантовая оптика" является базовой частью программы для магистратуры по направлению 510402 "Физика атомов и молекул" (блок М2).

Изучение данной дисциплины базируется на вузовской подготовке студентов по высшей математике, общей физике и теоретической физике (разделы: "Квантовая механика", "Оптика", "Атомная физика", "Статистическая физика").

Основные положения дисциплины должны быть использованы в дальнейшем при подготовке магистерских диссертаций.

## **3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля**

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-1 (общекультурные компетенции)	способностью демонстрировать углубленные знания в области математики и естественных наук
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью свободно владеть фундаментальными разделами физики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач (в соответствии со своей магистерской программой)
ПК-2 (профессиональные компетенции)	способностью использовать знания современных проблем физики, новейших достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности
ПК-7 (профессиональные компетенции)	способностью свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-9 (профессиональные компетенции)	способностью организовать и планировать физические исследования
ПК-10 (профессиональные компетенции)	способностью организовать работу коллектива для решения профессиональных задач

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-8 (профессиональные компетенции)	способностью проводить свою профессиональную деятельность с учетом социальных, этических и природоохранных аспектов

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

- основные достижения и современные направления исследований в области квантовой оптики;
- основы нерелятивистской квантовой теории света;
- основные приближения и модели, используемые при теоретическом описании явлений квантовой оптики;
- принципиальные различия между классическими и квантовыми состояниями электромагнитного поля;
- особенности проведения экспериментов по квантовой оптике

2. должен уметь:

применять основные теоретические методы квантовой оптики

3. должен владеть:

навыками анализа оптических явлений с точки зрения квантовой механики

4. должен демонстрировать способность и готовность:

Демонстрировать способность использовать в познавательной и профессиональной деятельности базовые знания в области математики и естественных наук и навыки работы с информацией из различных источников, а также способность понимать и излагать получаемую информацию и представлять результаты физических исследований.

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных(ые) единиц(ы) 72 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет в 3 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
	Тема 1. Квантование 1.электромагнитного поля	3	1-3	2	2	0	

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
2.	Тема 2. Квантовые состояния электромагнитного поля	3	4-6	2	2	0	
3.	Тема 3. Взаимодействие атомов с полем	3	7-10	4	2	0	
4.	Тема 4. Фотодетектирование	3	11-13	2	2	0	
5.	Тема 5. Квантовая интерференция	3	14-18	4	4	0	
.	Тема . Итоговая форма контроля	3		0	0	0	зачет
	Итого			14	12	0	

## 4.2 Содержание дисциплины

### Тема 1. Квантование электромагнитного поля

#### лекционное занятие (2 часа(ов)):

Уравнения Максвелла в импульсном представлении. Канонические уравнения движения. Каноническое квантование свободного электромагнитного поля. Операторы рождения и уничтожения. Квантовые уравнения Максвелла.

#### практическое занятие (2 часа(ов)):

Решение задач (векторный анализ, тензорные соотношения для поляризационных компонент поля, вывод уравнений движения)

### Тема 2. Квантовые состояния электромагнитного поля

#### лекционное занятие (2 часа(ов)):

Фоковские состояния. Представление чисел заполнения. Состояния с определенной фазой. Когерентные состояния. Представление по когерентным состояниям. Вакуумные флуктуации. Сжатые состояния. Оператор сжатия. Сжатый вакуум и сжатые когерентные состояния. Методы получения квантовых состояний света.

#### практическое занятие (2 часа(ов)):

Решение задач (теоремы операторной алгебры, дисперсия чисел фотонов в различных квантовых состояниях, свойства оператора смещения, разложение по базису когерентных состояний)

### Тема 3. Взаимодействие атомов с полем

#### лекционное занятие (4 часа(ов)):

Двухуровневый атом. Энергетический спин. Гамильтониан взаимодействия атома с электромагнитным полем. Дипольное приближение.  $dE$ - и  $rA$ -формы гамильтониана. Взаимодействие одиночного атома с одномодовым полем. Осцилляции Раби. Релаксация атома, взаимодействующего с полевым резервуаром. Спонтанное излучение. Лэмбовский сдвиг. Атом в резонаторе и эффект Парсела. Резонансная флуоресценция. Одетые состояния. Полуклассическое приближение и оптические уравнения Блоха. Векторная модель взаимодействия двухуровневого атома с когерентным полем.

#### практическое занятие (2 часа(ов)):

Решение задач (вычисление операторов эволюции, вычисление собственных значений и собственных векторов гамильтонианов)

### Тема 4. Фотодетектирование

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

Идеальный фотодетектор. Вероятность фотоотсчета и корреляционная функция первого порядка. Вероятность совместного фотоотсчета и корреляционная функция второго порядка. Свойства корреляционных функций и степеней когерентности. Статистика фотоэлектрического счета. Интерферометр Хенберри Брауна ? Твисса. Корреляции и антикорреляции фотоотсчетов. Группировка и антигруппировка фотонов.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Решение задач (вычисление автокорреляционных функций для различных состояний поля)

**Тема 5. Квантовая интерференция****лекционное занятие (4 часа(ов)):**

Матрицы рассеяния для основных элементов оптических цепей (светофильтров, поляризаторов, фазовращателей). Однофотонная и двухфотонная интерференция. Квантовые неразрушающие измерения. Методы повышения точности интерференционных измерений, основанные на использовании сжатого света.

**практическое занятие (4 часа(ов)):**

Решение задач (вычисление скоростей однофотонного и двухфотонного счета для различных схем наблюдения квантовой интерференции)

**4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)**

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Кvantование электромагнитного поля	3	1-3	Работа с литературой	6	Отчет или сообщение по теме
2.	Тема 2. Квантовые состояния электромагнитного поля	3	4-6	Работа с литературой	8	Отчет или сообщение по теме
3.	Тема 3. Взаимодействие атомов с полем	3	7-10	Работа с литературой	12	Отчет или сообщение по теме
4.	Тема 4. Фотодетектирование	3	11-13	Работа с литературой	10	Отчет или сообщение по теме
5.	Тема 5. Квантовая интерференция	3	14-18	Работа с литературой	10	Отчет или сообщение по теме
Итого					46	

**5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения**

С целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся, в рамках учебного курса предусмотрена самостоятельная работа, включающая в себя не только решение задач, сформулированных на лекциях, но и изучение некоторых вопросов по литературе, в том числе на английском языке, с последующим выступлением перед аудиторией.

**6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов**

## **Тема 1. Квантование электромагнитного поля**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Примерные темы для самостоятельных работ: Собственные моды для полей различной симметрии и для различных граничных условий. Коммутационные соотношения для параксиального приближения. (ОК-1, ПК-1)

## **Тема 2. Квантовые состояния электромагнитного поля**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Примерные темы для самостоятельных работ: Методы получения квантовых состояний света. Основные эксперименты в этой области. (ПК-2, ПК-7)

## **Тема 3. Взаимодействие атомов с полем**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Примерные темы для самостоятельных работ: Распространение света в резонансных средах. Квантование поля в среде с дисперсией. Коллективное спонтанное излучение. (ОК-1, ПК-1)

## **Тема 4. Фотодетектирование**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Примерные темы для самостоятельных работ: Основные направления разработок в области создания однофотонных детекторов. (ПК-2, ПК-7, ПК-9, ПК-8)

## **Тема 5. Квантовая интерференция**

Отчет или сообщение по теме, примерные вопросы:

Примерные темы для самостоятельных работ: Квантово-оптические эксперименты по проверке основ квантовой механики. (ПК-2, ПК-7, ПК-9, ПК-10)

## **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к зачету:

Контрольные вопросы:

1. Каноническое квантование свободного электромагнитного поля. Уравнения движения для операторов рождения и уничтожения.
2. Пространственно-временные коммутационные соотношения для операторов поля
3. Когерентные состояния электромагнитного поля. Оператор смещения. Распределение чисел фотонов в когерентном состоянии.
4. Когерентные состояния как базис. Неортогональность и переполненность.
5. Сжатые состояния электромагнитного поля. Оператор сжатия. Двухфотонные когерентные состояния. Идеальные сжатые состояния. Дисперсии квадратурных компонент. Параметр и коэффициент сжатия.
6. Представление по когерентным состояниям. Функции Вигнера, Хушими и Глаубера-Сударшана.
7. Оператор фазы Дирака. Операторы косинуса и синуса фазы электромагнитного поля. Состояния с определенной фазой и оператор фазы в теории Пегга-Барнетта.
8. Гамильтониан минимального взаимодействия. Дипольное приближение. Мультипольный гамильтониан (преобразование Гепперт-Мейер).
9. Взаимодействие двухуровневого атома в одномодовым квантованным электромагнитным полем. Квантовые осцилляции Раби. Коллапс и возрождение инверсии.
10. Взаимодействие двухуровневого атома с вакуумным резервуаром (теория спонтанного излучения Вайскопфа-Вигнера)
11. Вероятность однофотонного детектирования. Идеальный фотодетектор. Скорость однофотонного счета. Субпуассоновский и суперпуассоновский свет.
12. Интерферометр Хенберри Брауна - Твисса. Корреляции и антикорреляции фотоотсчетов.
13. Матрица рассеяния светоделителя. Двухфотонная интерференция. Эффекты квантовой интерференции на примере интерферометра Маха-Цендера

14. Балансное гомодинное детектирование. Стандартный квантовый предел и гейзенберговский предел точности измерения фазы.

### **7.1. Основная литература:**

- 1) Салех, Бахаа Е. А. Оптика и фотоника. Принципы и применения: [учебное пособие: в 2 томах] / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В. Л. Дербова. - Долгопрудный: Интеллект, 2012. Т. 1. - 2012. - 759 с., [4] л. ил. : ил.
- 2) Салех, Бахаа Е. А. Оптика и фотоника. Принципы и применения: [учебное пособие: в 2 томах] / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В. Л. Дербова. - Долгопрудный: Интеллект, 2012. Т. 2. - 2012. - 780 с. : ил.
- 3) Ахманов С.А. Статистическая радиофизика и оптика / С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. - М.: Физматлит, 2010 - 423 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=48263](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=48263)
- 4) Белинский А.В. Кvantовые измерения / А.В. Белинский. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012 - 182 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=4386](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=4386)

### **7.2. Дополнительная литература:**

- 1) Новотный, Л. Основы нанооптики: перевод с английского / Л. Новотный, Б. Хехт; Пер. с англ. А. А. Коновко, О. А. Шутовой; Под ред. В. В. Самарцева. ? М.: Физматлит, 2009. ? 484 с.: ил.
- 2) Боголюбов Н.Н. Квантовые поля / Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. - 3-е изд., доп. - М.: Физматлит, 2005 - 384 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=2117](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2117)
- 3) Колобов М.И. Квантовое изображение / под ред. М.И. Колобова; Перевод с англ. Т.Ю. Голубевой; А.С. Чиркина. - М.: Физматлит, 2009 - 524 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=48273](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=48273)

### **7.3. Интернет-ресурсы:**

Архив препринтов - <http://arxiv.org/>

Введение в квантовую оптику - <http://gerdbreitenbach.de/gallery/>

Лекция нобелевского лауреата Роя Глаубера - <http://www.youtube.com/watch?v=dQmaJPVP0hE>

Энциклопедия лазерной физики и технологии - <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Энциклопедия по квантовой информатике - <http://www.quantiki.org/>

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)**

Освоение дисциплины "Квантовая оптика" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Лекционная аудитория со стандартным проекционным оборудованием

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 011200.68 "Физика" и магистерской программе Физика атомов и молекул .

Автор(ы):

Калачев А.А. \_\_\_\_\_  
"\_\_\_" 201 \_\_\_ г.

Рецензент(ы):

Гайнутдинов Р.Х. \_\_\_\_\_  
"\_\_\_" 201 \_\_\_ г.