

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

### **УТВЕРЖДЕНО**

приказом ФИЦ КазНЦ РАН

от 01.03.2019 № 9-А

Разработано и рекомендовано к утверждению  
Ученым советом

КФТИ - обособленного структурного  
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН

28 ноября 2018 г., протокол № 33

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«Квантовая оптика»**

Уровень высшего образования

Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки

### **03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ**

Направленность подготовки:

01.04.05 – Оптика

Квалификация выпускника:

Исследователь. Преподаватель-исследователь

### **Содержание:**

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения.
2. Перечень планируемых результатов обучения.
3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.
4. Трудоемкость дисциплины.
5. Содержание дисциплины.
6. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, фонд оценочных средств.
7. Перечень учебной литературы и ресурсов сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины.
8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины.

## **1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения**

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия 1 зачетная единица труда (36 часов), самостоятельная работа 6 зачетных единиц труда (216 часов), всего 7 зачетных единиц труда (252 часа).

Форма проведения аудиторных занятий – лекции и семинары.

В рамках часов самостоятельной работы по указанию преподавателя аспиранты прорабатывают темы и осваивают теоретические вопросы, излагаемые в лекционном курсе, а также самостоятельно изучают другие вопросы программы.

## **2. Перечень планируемых результатов обучения**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

### ***универсальных***

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научнообразовательных задач (УК-3);

### ***общепрофессиональных***

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

### ***профессиональных***

- способность проводить самостоятельные исследования природы света и явлений при его распространении и взаимодействии с веществом, владеть современными методами оптической спектроскопии, а также разрабатывать новые оптические методы исследования фундаментальных свойств материи, новые коммерческие/промышленные оптические технологии и методы диагностики природных либо техногенных объектов и процессов (ПК-1);
- способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области оптики (ПК-3).

В результате освоения дисциплины аспирант должен

### **Знать:**

- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики (*шифр формируемого результата обучения З(УК-1)-1*);
- роль и место квантовой оптики в формировании современной физической картины мира, стадии ее эволюции и взаимосвязь с другими разделами физики (*шифр формируемого результата обучения З(УК-2)-2*);
- особенности научной терминологии, понятийный аппарат квантовой оптики, используемые при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме (*шифр формируемого результата обучения З(УК-3)-1*);
- основы нерелятивистской квантовой теории света и взаимодействия света с веществом (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-1)-1*);
- фундаментальные закономерности, связанные с распространением квантовых состояний электромагнитного поля в веществе, с процессами поглощения, излучения и рассеяния света, а также нелинейно-оптическими явлениями, которые описываются в формализме квантовой теории излучения (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-1)-1*);
- существующие методы и методические подходы в научных исследованиях в области квантовой оптики и возможные способы их развития (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-3)-1*);

### **Уметь:**

- анализировать альтернативные варианты решения практических задач квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (*шифр формируемого результата обучения У(УК-1)-1*);
- выбирать и применять при решении задач квантовой оптики адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования (*шифр формируемого результата обучения У(ОПК-1)-1*);

### **Владеть:**

- навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области квантовой оптики (*шифр формируемого результата обучения В(ОПК-1)-1*);
- навыками проведения базовых квантовооптических экспериментов с использованием современной аппаратуры и методов интерпретации экспериментальных результатов (*шифр формируемого результата обучения В(ПК-1)-1*).

## **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

**Целью** дисциплины «Квантовая оптика» является формирование у аспирантов базы знаний в области фундаментального раздела современной физики – квантовой оптики.

**Задачами** курса являются:

- изучение основ нерелятивистской квантовой теории света и взаимодействия света с веществом,
- освоение наиболее известных теоретических методов, используемых при решении задач квантовой оптики,
- изучение фундаментальных закономерностей, связанных с распространением квантовых состояний электромагнитного поля в веществе, с процессами поглощения, излучения и рассеяния света, а также нелинейно-оптическими явлениями, которые описываются в формализме квантовой теории излучения;
- приобретение навыков проведения базовых квантовооптических экспериментов, знакомство с современной аппаратурой и методами интерпретации экспериментальных результатов;
- развитие у аспирантов навыков к выбору адекватных подходов при решении задач квантовой оптики.

Дисциплина относится к *дисциплинам по выбору*, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к вариативной части ОПОП аспирантуры по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (профиль) 01.04.05 «Оптика». Индекс (по учебному плану) – **Б1.В.ОД2**. Дисциплина изучается в 3 и 4 семестрах.

Актуальность курса обусловлена большой ролью современной квантовой оптики в исследовании фундаментальных проблем квантовой механики и в развитии квантовых информационных технологий.

Материал, изучаемый в ходе освоения дисциплины, является обязательной составляющей экзамена кандидатского минимума по специальности 01.04.05 «Оптика». Изучение данной дисциплины базируется на вузовской подготовке студентов по высшей математике, общей физике и теоретической физике (разделы: «Квантовая механика», «Оптика», «Атомная физика», «Статистическая физика»).

#### 4. Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц, в том числе 1 ЗЕ аудиторных занятий и 6 ЗЕ самостоятельной работы.

№	Дисциплина	Курс	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
1	Квантовая оптика	2	20	12	4	216

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1 Лекционные занятия

(аудиторная нагрузка 20 часов, самостоятельная работа 120 часов)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
1.	Квантование электромагнитного поля	Основные уравнения. Интегралы движения. Переход в импульсное представление. Нормальные переменные. Каноническое квантование свободного электромагнитного поля. Коммутационные соотношения для полевых операторов. Квантовые уравнения Максвелла.
2.	Квантовые состояния электромагнитного поля	1. Собственные энергетические состояния. Представление чисел заполнения. Когерентные состояния. Представления по когерентным состояниям. Сжатые состояния. Оператор сжатия. Сжатый вакуум и сжатые когерентные состояния. Проблема фазы в квантовой оптике. Вакуумные флуктуации и сила Казимира. 2. Однофотонные и бифотонные волновые пакеты. Перепутанные состояния поля. Критерии перепутанности. Разложение Шмидта. Меры перепутанности. Двухмодовый сжатый вакуум. 3. Состояния поля с отличным от нуля угловым моментом.
3.	Взаимодействие атомов с полем.	1. Двухуровневый атом. Энергетический спин. Гамильтониан взаимодействия атома с электромагнитным полем. Дипольное приближение. $dE$ - и $pA$ -формы гамильтониана. 2. Модель Джейнса-Каммингса. Осцилляции Раби. Коллапс и возрождение инверсии. Теория спонтанного излучения Вайскопфа-Вигнера. Лэмбовский сдвиг. Резонансная флуоресценция. Одетые состояния. Дисперсионное взаимодействие. Эксперименты с ридберговскими атомами. 3. Полуклассическое приближение и оптические уравнения Блоха. Векторная модель взаимодействия двухуровневого атома с когерентным полем. Трёхуровневые атомы и эффекты квантовой интерференции. Расщепление Аутлера-Таунса. Когерентное пленение населённостей. STIRAP.

4.	Открытые квантовые системы	<p>1. Обобщённое основное кинетическое уравнение. Основное кинетическое уравнение Паули. Уравнение Фоккера–Планка. Квантовые траектории. Уравнение Гейзенберга–Ланжевена.</p> <p>2. Связанные резонаторы. Формализм входа–выхода. Квантовые уравнения Ланжевена для открытого резонатора. Атом в открытом резонаторе и эффект Парсела.</p> <p>3. Квантовые отображения и квантовые каналы. Представление Крауса. Декогеренция. Прямые и косвенные квантовые измерения. Неразрушающие квантовые измерения.</p>
5.	Фотодетектирование. Статистика фотонов и фотоотсчётов.	<p>Методы фотодетектирования. 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. Формула Мандела. Интерферометр Хенберри Брауна – Твисса. Корреляции и антикорреляции фотоотсчетов. Группировка и антигруппировка фотонов.</p>
6.	Квантовая интерференция. Теорема Белла.	<p>Матрицы рассеяния для основных элементов оптических цепей (светоделитель, поляризатор, фазовая пластина). Интерферометр Брауна и Твисса. Интерферометр Хонга–Оу–Мандела. Интерферометр Маха–Цендера. Измерение без взаимодействия. Балансное гомодинное детектирование. Повышение точности интерференционных измерений за счёт использования сжатых состояний. Квантовая литография. Интерферометр Франсона. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена. Локальный реализм. Теорема Белла. Равенство Гринбергера–Хорна–Цайлингера.</p>

## 5.2. Лабораторные занятия

(аудиторная нагрузка 4 часа, самостоятельная работа 24 часа)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Примеры выполняемых экспериментальных работ
1	Статистика фотонов и фотоотсчётов	Интерферометр Брауна и Твисса
2	Квантовые состояния поля	Корреляции фотонов в поле спонтанного параметрического рассеяния

## 5.3. Практические занятия

(аудиторная нагрузка 12 часов, самостоятельная работа 72 часа)

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Тематика семинаров
1.	Квантование электромагнитного поля	Квантование поля в среде с дисперсией.
2.	Квантовые состояния электромагнитного поля	Квантовая томография
3.	Взаимодействие атомов с полем	Быстрый и медленный свет. Нелинейная квантовая оптика
4.	Открытые квантовые системы	Коллективное спонтанное излучение.

## 6. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, фонд оценочных средств

Текущий контроль освоения дисциплины проводится регулярно, начиная со второй недели обучения, в форме контроля посещаемости, устного опроса по теме, анализа результатов решения практических задач и выполненных лабораторных работ.

Промежуточный контроль подразумевает проведение коллоквиума по учебному материалу нескольких тем.

Формой итогового контроля по дисциплине является зачет.

### 6.1. Текущий контроль: Контрольные темы и вопросы для проведения текущего и итогового контроля по дисциплине «Квантовая оптика»:

#### Тема 1 Квантование электромагнитного поля:

Уравнения Максвелла–Лоренца. Полная энергия. Полный импульс. Полный момент импульса. Переход в импульсное представление. Нормальные переменные. Каноническое квантование свободного электромагнитного поля. Коммутационные соотношения для полевых операторов. Квантовые уравнения Максвелла.



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

Собственные энергетические состояния. Представление чисел заполнения. Когерентные состояния. Представления по когерентным состояниям. Сжатые состояния. Оператор сжатия. Сжатый вакуум и сжатые когерентные состояния. Проблема фазы в квантовой оптике. Вакуумные флуктуации и сила Казимира. Однофотонные и бифотонные волновые пакеты. Перепутанные состояния поля. Критерии перепутанности. Разложение Шмидта. Меры перепутанности. Двухмодовый сжатый вакуум. Состояния поля с отличным от нуля угловым моментом.

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

Двухуровневый атом. Энергетический спин. Гамильтониан взаимодействия атома с электромагнитным полем. Дипольное приближение.  $dE$ - и  $pA$ -формы гамильтониана. Модель Джейнса–Каммингса. Осцилляции Раби. Коллапс и возрождение инверсии. Теория спонтанного излучения Вайскопфа–Вигнера. Лэмбовский сдвиг. Резонансная флуоресценция. Одетые состояния. Дисперсионное взаимодействие. Эксперименты с ридберговскими атомами. Полуклассическое приближение и оптические уравнения Блоха. Векторная модель взаимодействия двухуровневого атома с когерентным полем. Трёхуровневые атомы и эффекты квантовой интерференции. Расщепление Аутлера-Таунса. Когерентное пленение населённостей. STIRAP.

## **Тема 4 Открытые квантовые системы:**

Обобщённое основное кинетическое уравнение. Основное кинетическое уравнение Паули. Уравнение Фоккера–Планка. Квантовые траектории. Уравнение Гейзенберга–Ланжевена. Связанные резонаторы. Формализм входа-выхода. Квантовые уравнения Ланжевена для открытого резонатора. Атом в открытом резонаторе и эффект Парсела. Квантовые отображения и квантовые каналы. Представление Крауса. Декогеренция. Прямые и косвенные квантовые измерения. Неразрушающие квантовые измерения.

## **Тема 5 Фотодетектирование. Статистика фотонов и фотоотсчётов:**

Методы фотодетектирования. 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. Формула Манделя. Интерферометр Хенберри Брауна–Твисса. Корреляции и антикорреляции фотоотсчетов. Группировка и антигруппировка фотонов.

## **Тема 6 Квантовая интерференция. Теорема Белла:**

Матрицы рассеяния для основных элементов оптических цепей (светоделитель, поляризатор, фазовая пластина). Интерферометр Брауна и Твисса. Интерферометр Хонга–Оу–Манделя. Интерферометр Маха–Цендера. Измерение без взаимодействия. Балансное гомодинное детектирование. Повышение

точности интерференционных измерений за счёт использования сжатых состояний. Квантовая литография. Интерферометр Франсона. Парадокс Эйнштейна–Подольского–Розена. Локальный реализм. Теорема Белла. Равенство Гринбергера–Хорна–Цайлингера.

## 6.2. Критерии оценки и шкала оценивания результатов освоения

дисциплины:

№ п/п	Результат освоения дисциплины	Балл	Показатели оценивания
<b>Знание</b>			
1.	методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
2.	роли и места квантовой оптики в формировании современной физической картины мира, стадии ее эволюции и взаимосвязи с другими разделами физики	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
3.	особенностей научной терминологии, понятийного аппарата квантовой оптики, используемых при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
4.	основ нерелятивистской квантовой теории света и взаимодействия света с веществом	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
5.	фундаментальных закономерностей, связанных с распространением квантовых состояний электромагнитного поля в веществе, с процессами поглощения, излучения и рассеяния света, а также нелинейно-	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания

	оптическими явлениями, которые описываются в формализме квантовой теории излучения		
б.	существующих методов и методических подходов в научных исследованиях в области квантовой оптики и возможных способов их развития	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
<b>Умение</b>			
1.	анализировать альтернативные варианты решения практических задач квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	1	не умеет
		2	частично освоенное умение
		3	сформированное умение
2.	выбирать и применять при решении задач квантовой оптики адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования	1	не умеет
		2	частично освоенное умение
		3	сформированное умение
<b>Владение</b>			
1.	навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области квантовой оптики	1	не владеет
		2	частично освоенные навыки
		3	сформированные навыки
2.	навыками проведения базовых квантовооптических экспериментов с использованием современной аппаратуры и методов интерпретации экспериментальных результатов	1	не владеет
		2	частично освоенные навыки
		3	сформированные навыки
<b>Итого баллов</b>		20–30	<b>«зачтено»</b>
		менее 20	<b>«не зачтено»</b>

## 7. Перечень учебной литературы и ресурсов сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины

### 7.1. ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Клаудер Дж., Сударшан Э. Основы квантовой оптики. – М.: Мир, 1970.

2. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2000.
3. Скалли М., Зубайри С. Квантовая оптика. – М.: Физматлит, 2003.

## **7.2. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику: учеб. пособие. – М.: Наука, 1981.
2. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. Прикладная нелинейная оптика, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2004.
3. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. – М.: Физматгиз, 1962.
4. Калачев А.А., Самарцев В.В. Когерентные явления в оптике. – Казань: КГУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2003.
5. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Наука, 1989.

## **7.3. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ»**

- <http://arxiv.org/> – Архив препринтов
- <http://gerdbreitenbach.de/gallery/> – Введение в квантовую оптику
- <http://steck.us/teaching> – D.A. Steck. Quantum and atom optics
- <http://www.youtube.com/watch?v=dQmaJPVP0hE> – Лекция нобелевского лауреата Роя Глаубера
- <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html> – Энциклопедия лазерной физики и технологии
- <http://www.quantiki.org/> – Энциклопедия по квантовой информатике

## **8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины**

Обучение по дисциплине ведётся с применением как традиционных методов (лекции, практические занятия, лабораторные работы), так и с использованием инновационных подходов: активное участие аспирантов в научных семинарах подразделений КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН по профилю подготовки, представление докладов на научной конференции молодых ученых КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН и молодежных научных школах, подготовка научных статей, подготовка презентаций по литературе для дополнительного изучения.

Аудиторные занятия, целью которых является освоение теоретических основ дисциплины, проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного оборудования. Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал

занятия. Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала.

Практические занятия (семинары) имеют своей целью освоение расчетно-теоретических методов, используемых при решении задач квантовой оптики, а также развития навыков рационального выбора методов решения.

В ходе лабораторных занятий аспирантам предоставляется возможность на практике освоить технику проведения базовых квантовооптических экспериментов, изучить специфику экспериментальных исследований в области квантовой оптики, познакомиться с принципами работы и возможностями экспериментальной аппаратуры и оборудования, используемого при проведении научных исследований в области квантовой оптики, а также методами интерпретации экспериментальных результатов.

Самостоятельная работа аспирантов подразумевает углубленное освоение теоретического материала, выполнение индивидуальных заданий, подготовку к текущему, промежуточному и итоговому контролю успеваемости. В целях формирования способности к критическому анализу информации и поиску путей решения поставленных задач в дальнейшей профессиональной деятельности используется технология проблемного обучения, требующая значительных временных ресурсов, что предусмотрено структурой дисциплины, и предполагает самостоятельную проработку учебно-проблемных задач аспирантами, выполняемую с привлечением основной и дополнительной литературы; поиск необходимой научно-технической информации в открытых источниках, консультации с преподавателем.

Самостоятельная работа аспирантов осуществляется: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на персональных рабочих местах аспирантов с доступом к ресурсам «Интернет», в научных подразделениях КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН с доступом к лабораторному оборудованию и приборам.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, ресурсы «Интернет».

#### **Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

- библиотека с читальным залом, книжный фонд которой составляет специализированная методическая и учебная литература, научная периодика;
- зал, оснащённый стационарным проектором, экраном и обычной доской – для проведения лекционных занятий;
- учебная аудитория, оснащенная переносными проектором и экраном для проведения практических занятий;
- индивидуальные рабочие места аспирантов, оснащенные персональным компьютерами с доступом к сети «Интернет», локальной сети и электронной информационно-образовательной среде ФИЦ КазНЦ РАН.

В учебном процессе аспиранты используют современное научное оборудование профильных подразделений КФТИ – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН:

➤ центра коллективного пользования лаборатории быстропротекающих молекулярных процессов – лазерные системы, спектрометры, детекторы оптического излучения и наборы оптических элементов, позволяющие комбинировать различные оптические схемы;

➤ лаборатории нелинейной оптики – измерительный комплекс для исследования корреляционных функций второго и четвертого порядка в схеме интерферометра интенсивностей Брауна–Твисса.