

## Рабочая программа дисциплины

- 1. Название дисциплины:** Основы квантовой оптики
- 2. Уровень высшего образования** – магистратура
- 3. Направление подготовки:** 03.04.02 Физика (магистратура)

### **4. Аннотация:**

Курс «Основы квантовой оптики» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку студентов в области описания приготовления, преобразования и измерения квантовых состояний света с целью использования их в задачах квантовых вычислений, квантовой связи и квантовой метрологии. Особое внимание уделяется описанию однофотонных, двухфотонных и сжатых состояний света, которые лежат в основе большинства приложений квантовой оптики.

### **5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):**

Объем дисциплины составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часа, из которых 54 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (24 часа занятия лекционного типа, 26 часов занятия семинарского типа, 4 часа коллоквиумов), 54 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

### **6. Формируемые компетенции и входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:**

#### НАЗВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ:

СПК-1 Способность свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики.

СПК-2 Способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации в области квантовой оптики.

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования.

## ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Для того чтобы формирование данных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению образовательной программы, должен:

- **ЗНАТЬ:** основные методы научно-исследовательской деятельности.
- **УМЕТЬ:** выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач.
- **ВЛАДЕТЬ:** навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования.

Для освоения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые в рамках дисциплин общей физики «Оптика», «Электромагнетизм» и теоретической физики «Электродинамика», «Квантовая механика», а также математических дисциплин «Математический анализ», «Теория функций комплексной переменной», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения».

### 7. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них	Самостоятельная работа обучающегося, часы из них

		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
<b>1. Основы статистической оптики</b> Аналитический сигнал. Приближением медленно меняющихся амплитуд. Временная и пространственная когерентность. Объем когерентности, объем детектирования. Теорема Виннера-Хинчина, Теорема Ван Циттерта – Цернике. Роль времени усреднения.	4	1	1		2	2 час Решение задач по определению корреляционных характеристик различных источников света		2
<b>2. Квантование электромагнитного поля</b> Уравнения Максвелла, разложение по модам, обобщенные координаты поля. Операторы рождения и уничтожения. Оператор числа фотонов.	4	2			2	2 час Повторение лекционного материала по теме «Квантование электромагнитного поля»		2
<b>3. Примеры квантовых состояний и способы их описания</b>	17	6	5		11	6 часа Решение задач по теме «Примеры		6

<p><b>3.1. Фоковские состояния</b>  Определение фоковских состояний и их эволюция во времени. Вектор состояния и матрица плотности в фоковском базисе. Распределение по числу фотонов. Производящая функция. Моменты поля. Многомодовые состояния. Статистика фотоотчетов и ее связь со статистикой фотонов. Измерение корреляционных функций.</p> <p><b>3.2. Когерентные состояния</b>  Определение когерентных состояний и их эволюция во времени. Оператор сдвига. <math>P</math>-функция глаубера. <math>Q</math>-функция Хусими. Признаки неклассического света.</p> <p><b>3.3. Квадратурный базис</b>  Квадратурные распределения и их измерение. Функция Вигнера. Сжатые состояния света. Оператор сжатия.</p> <p><b>3.4. Смешанные состояния света</b>  Тепловое состояние. Расфазированное когерентное состояние.</p>						<p>квантовых состояний и способы их описания»</p>		
<p><b>4. Преобразование мод</b>  Светоделитель. Гамильтониан светоделителя. Интерференция Хонга-Оу-Манделя. Общий случай многомодового светоделителя. Преобразование когерентных состояний. Преобразование фоковских состояний. Реализация оператора уничтожения.</p>	17	3	2	<p>2 часа  Коллоквиум по темам «Примеры квантовых состояний и способы их описания» и «Преобразование мод»</p>	7	<p>2 час  Решение задач по теме «Преобразование мод»</p> <p>8 часов  Подготовка к коллоквиуму</p>		10

<p><b>5. Однофотонный кубит и кудит</b></p> <p><b>5.1. Однофотонный источник</b></p> <p><b>5.2. Поляризационный кубит</b> Сфера Пуанкаре и сфера Блоха. Приготовление, преобразование и измерение поляризационного кубита. Томография поляризационного кубита. Протокол BB84.</p> <p><b>5.3. Dual-rail-кубит</b> Приготовление, преобразование, измерение, Dual-rail-кубита. Обобщение на многомерный случай.</p> <p><b>5.4. Фазовый кубит</b> Приготовление, преобразование, измерение, фазового кубита. Обобщение на многомерный случай.</p> <p><b>5.5. Кубиты и кудиты на основе когерентных состояний</b></p>	13	4	4		8	5 часа Решение задач по теме «Однофотонный кубит и кудит»		5
<p><b>6. Перепутанные состояния света</b></p> <p><b>6.1. Условное перепутывание однофотонных кубитов</b></p> <p><b>6.2. Спонтанное параметрическое рассеяние света</b> Фазовый синхронизм. Типы синхронизма. Частотно-угловой спектр. Корреляции по частоте и по углу.</p> <p><b>6.3. Поляризационные кубиты и кутриты</b> Приготовление, преобразование, измерение в базисе факторизованных состояний, измерение в базисе Белловских состояний. Неравенства Белла. Квантовая плотная кодировка, квантовая телепортация, квантовый повторитель.</p> <p><b>6.4. Пространственный спектр СПР</b></p>	29	10	10		20	9 часов Решение задач по теме «Перепутанные состояния света»		9

<p>Корреляции в ближней и дальней зоне. Скрытые изображения. Сверхразрешение. Моды Шмидта. Соотношение Федорова. Управление пространственными корреляциями – перепутанные пространственные кудиты.</p> <p><b>6.5. Частотно-временной спектр СПР</b> Связь между частотными и временными корреляциями. Измерение корреляционных характеристик: провал Манделя, генерация суммарной частоты. Устойчивость по отношению к дисперсии. Квантовая оптическая когерентная томография. Управление частотными кудитами. Мультиплексирование.</p> <p><b>6.6. Генерация сжатых состояний</b> Генерация одномодового сжатого света. Метрологические приложения. Коты Шредингера. Двумодовый сжатый свет – корреляции по числу фотонов и по квадратурам. Поляризационное сжатие. Многомодовый сжатый свет – кластерные состояния.</p> <p><b>6.7. Условный источник единичных фотонов</b> Реализация оператора рождения фотона.</p> <p><b>6.8. Альтернативные источники пар фотонов</b></p> <p><b>6.9. Генерация многофотонных состояний</b></p>							
<b>Промежуточная аттестация - экзамен</b>	24		4		4	20 часов Подготовка к промежуточной аттестации (экзамену).	20
<b>Итого</b>	<b>108</b>	26	26	2	54		54

\* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме обсуждения.

## 8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:

8.1 Основная и дополнительная литература доступная студентам через Интернет или по запросу лектору.

8.2 Электронные презентации основных тем дисциплины доступные через сайт ЦКТ ФФ МГУ

## 9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Параметры оптических схем для исследования корреляционных характеристик различных источников света
2. Связь операторов рождения, уничтожения, числа фотонов, обобщенных координат с классическими характеристиками поля
3. Переходы между базисами фоковских, когерентных и квадратурных состояний
4. Определение распределений различных наблюдаемых для различных квантовых состояний
5. Влияние параметров детекторов на измеряемые величины
6. Сравнение различных Функций квазивероятности. Изображение графиков различных квантовых состояний
7. Проверка критериев неклассичности для различных квантовых состояний

Типовые вопросы к зачету:

1. Понятие когерентности. Понятие оптической моды. Связь между частотной, временной, пространственной и угловой когерентностью. Объем когерентности и объем детектирования.
2. Связь операторов рождения, уничтожения, числа фотонов, обобщенных координат с классическими характеристиками поля
3. Базис фоковских состояний и его свойства. Примеры чистых и смешанных состояний в фоковском базисе.
4. Распределения по числу фотонов и их характеристики для различных одномодовых и многомодовых состояний света.
5. Базис когерентных состояний и его свойства. Оператор сдвига. Переход к базису фоковских состояний.
6. Функции квазивероятности. Связи между ними. Связь с наблюдаемыми. Критерии неклассичности. Примеры функций квазивероятности для различных квантовых состояний.
7. Базис квадратурных состояний и его свойства. Квадратурно сжатые состояния. Переход между квадратурным базисом и базисами фоковских и когерентных состояний.
8. Преобразования операторов и состояний в линейно-оптических схемах. Интерференция Хонга-Оу-Манделя
9. Типы детекторов света и их характеристики. Гомодинное детектирование.
10. Типы однофотонных и двухфотонных источников света.
11. Поляризационный кубит: приготовление, преобразование, измерение. Сфера Пуанкаре.
12. Dual-rail и фазовый кубиты: приготовление, преобразование, измерение, обобщение на многомерный случай
13. Кубиты и кудиты на основе когерентного состояния: приготовление, преобразование, измерение.
14. Условное перепутывание однофотонных кубитов

15. Источники перепутанных состояний света: двухфотонных, многофотонных, квадратурно-сжатых.
16. Спонтанное параметрическое рассеяние света: типы синхронизмов. Частотно-угловой спектр.
17. Поляризационные кубиты и кутриты: приготовление, преобразование, измерение, проверка неравенств Белла.
18. Измерение в базисе Белловских состояний. Квантовая плотная кодировка, квантовая телепортация, квантовый повторитель.
19. Перепутывание по пространственным и частотным переменным. Соотношение Федорова, число Шмидта, управление частотно-временным и пространственным состоянием
20. Применение бифотонных полей в метрологических задачах
21. Одномодовое и двухмодовое квадратурное сжатие: приготовление, характеристика, использование. Многомодовое сжатие и кластерные состояния

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

ВЛАДЕТЬ: профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики (В1, СПК-1).

ВЛАДЕТЬ: навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовой оптики (В2, СПК-2).

ВЛАДЕТЬ: навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовой оптики (В3, СПК-3).

УМЕТЬ: анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).

УМЕТЬ: осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовой оптики (У2, СПК-2).

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3).

ЗНАТЬ: методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики (З1, СПК-1).



ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовой оптики (32, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области квантовой оптики, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3).

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики (B1, СПК-1).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовой оптики
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовой	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовой оптики	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовой оптики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовой оптики	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовой оптики

оптики (В2, СПК-2).					
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовой оптики (В3, СПК-3).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовой оптики	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовой оптики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовой оптики	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовой оптики
<i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).	Отсутствие умения	Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	Успешное и систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области квантовой оптики и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов

<p><i>УМЕТЬ:</i> осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовой оптики (У2, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовой оптики</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовой оптики</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовой оптики</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовой оптики</p>
<p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>

<p><b>ЗНАТЬ:</b> методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики (31, СПК-1)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области квантовой оптики</p>
<p><b>ЗНАТЬ:</b> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовой оптики (32, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовой оптики</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовой оптики</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовой оптики</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовой оптики</p>

<b>ЗНАТЬ:</b> методы организации и планирования исследований в области квантовой оптики, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (ЗЗ, СПК-3)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области квантовой оптики, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области квантовой оптики, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области квантовой оптики, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области квантовой оптики, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования
---	-------------------	---	---	---	--

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

1. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. Москва: Физматлит, 2000. 896 p.
2. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая Оптика. Москва: Физматлит, 2003. 512 p.
3. Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. Наука. Москва: Наука, 1980. 177 p.
4. Баумейстер Д. et al. Физика квантовой информации. Постмаркет. Москва, 2002. 376 p.

### Дополнительная литература

5. Клышко Д.Н. Неклассический свет // УФН. 1996. Vol. 166, № 6.
6. Катамадзе К.Г., Кулик С.П. Управление спектром бифотонного поля // ЖЭТФ. 2011. Vol. 139, № 1. P. 26–45.
7. Eisaman M.D. et al. Invited Review Article: Single-photon sources and detectors // Rev. Sci. Instrum. 2011. Vol. 82, № 7. P. 071101.

8. Lvovsky A.I., Raymer M.G. Continuous-variable optical quantum-state tomography // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81, № 1. P. 299–332.

**11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:**

**12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Для большей части тем курса имеются электронные презентации, выложенные на сайте ЦКТ ФФ МГУ. Рекомендуется перед лекцией скачать соответствующую презентацию и иметь ее на интерактивном занятии на ноутбуке или планшете в режиме off-line или в распечатанном виде, используя как основу конспекта для собственных пометок и комментариев.

**13. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости):**

При реализации учебной работы в рамках дисциплины «Квантовая оптика» используются средства дистанционного сопровождения учебного процесса в форме сайтов с материалами лекций и семинарских занятий. Курс имеет электронные версии (презентации) лекций. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

**14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Любая аудитория, оснащенная проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку, экраном, и учебной доской.