

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
в городе Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор филиала МГУ в г.Сарове
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

Квантовая оптика и квантовая информация

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Экстремальные электромагнитные поля, релятивистская плазма
и аттосекундная физика

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Авторы–составители:

д.ф.-м.н., Профессор физического факультета МГУ С.П.Кулик

Аннотация к рабочей программе дисциплины

«Квантовая оптика и квантовая информация»

В курсе изучаются основы квантовой оптики. Рассматриваются необходимые основы статистической оптики, примеры квантовых состояний и способы их описания. Рассматриваются вопросы 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.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Квантовая оптика и квантовая информация» реализуется на 2-ом курсе в 4-ом семестре и относится к вариативной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «Квантовая оптика и квантовая информация» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электромагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
• Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области квантовой оптики и квантовой информации в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области квантовой оптики и квантовой информации. УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний области квантовой оптики и квантовой информации, определять возможные направления научных исследований. ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования в области квантовой оптики и квантовой информации.
• Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований области квантовой оптики и квантовой информации и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).	ЗНАТЬ базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании области квантовой оптики и квантовой информации. УМЕТЬ используя знания области квантовой оптики и квантовой информации проводить научные исследования. ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.
• Способность определять основные направления внедрения научных результатов области квантовой оптики и квантовой информации (СПК-3).	ЗНАТЬ основные направления инновационного развития области квантовой оптики и квантовой информации. УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций области квантовой оптики и квантовой информации для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов. ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений области квантовой оптики и квантовой информации.

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

Тема 1. Основы статистической оптики

Аналитический сигнал. Приближением медленно меняющихся амплитуд. Временная и пространственная когерентность. Объем когерентности, объем детектирования. Теорема Виннера-Хинчина, Теорема Ван Циттерта – Цернике. Роль времени усреднения.

Тема 2. Квантование электромагнитного поля

Уравнения Максвелла, разложение по модам, обобщенные координаты поля. Операторы рождения и уничтожения. Оператор числа фотонов.

Тема 3. Основы квантовой теории информации

Чистые и смешанные состояния. Энтропия фон Неймана. Случаи чистых и смешанных состояний. Вычисление энтропии фон Неймана и Шеннона для двухуровневой системы. Композиционные системы. Различие между классической и квантовой информацией. Достижимая информация. Теорема о запрете клонирования квантовых состояний. Ее связь с достижимой информацией. Передача (transposition) квантовой информации. Понятие квантового канала связи. Точность воспроизведения информации (fidelity). Теорема Б.Шумахера о кодировании при отсутствии шума.

Тема 4. Примеры квантовых состояний и способы их описания

Фоковские состояния. 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 фотоотсчетов и ее связь со статистикой фотонов. Измерение корреляционных функций.

Когерентные состояния. Определение когерентных состояний и их эволюция во времени. Оператор сдвига. P-функция глаубера. Q-функция Хусими. Признаки неклассического света. *Квадратурный базис.* Квадратурные распределения и их измерение. Функция Вигнера. Сжатые состояния света. Оператор сжатия.

Смешанные состояния света Тепловое состояние. Расфазированное когерентное состояние.

Тема 5. Преобразование мод

Светоделитель. Гамильтониан светоделителя. Интерференция Хонга-Оу-Манделя. Общий случай многомодового светоделителя. Преобразование когерентных состояний. Преобразование фоковских состояний. Реализация оператора уничтожения.

Тема 6. Однофотонный кубит и кудит

Однофотонный источник. Поляризационный кубит. Сфера Пуанкаре и сфера Блоха. Приготовление, преобразование и измерение поляризационного кубита. Томография поляризационного кубита. Протокол BB84. Dual-rail-кубит. Приготовление, преобразование, измерение, Dual-rail-кубита. Обобщение на многомерный случай. Фазовый кубит. Приготовление, преобразование, измерение, фазового кубита. Обобщение на многомерный случай. Кубиты и кудиты на основе когерентных состояний

Тема 7. Перепутанные состояния света

Условное перепутывание однофотонных кубитов. *Спонтанное параметрическое рассеяние света*. Фазовый синхронизм. Типы синхронизма. Частотно-угловой спектр. Корреляции по частоте и по углу. *Поляризационные кубиты и кутриты*. Приготовление, преобразование, измерение в базисе факторизованных состояний, измерение в базисе Белловских состояний. Неравенства Белла. Квантовая плотная кодировка, квантовая телепортация, квантовый повторитель. *Пространственный спектр СПР*. Корреляции в ближней и дальней зоне. Скрытые изображения. Сверхразрешение. Моды Шмидта. Соотношение Федорова. Управление пространственными корреляциями – перепутанные пространственные кудиты. *Частотно-временной спектр СПР*. 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. *Генерация сжатых состояний*. 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. *Условный источник единичных фотонов*. Реализация оператора рождения фотона. *Альтернативные источники пар фотонов*. *Генерация многофотонных состояний*.

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Семинаров	
			Общая аудиторная	Лекций	Семинаров		
Квантовая оптика и квантовая информация	2	72	34	17	17	38	

8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Квантовая оптика и квантовая информация» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Основы статистической оптики	6	2	-	2	4	Собеседование, опрос
2	Квантование электромагнитного поля	8	2	-	2	3	
3	Основы квантовой теории информации	6	2	-	1	3	
4	Примеры квантовых состояний и способы их описания	12	3	-	3	6	
5	Преобразование мод	12	3	-	3	6	
6	Однофотонный кубит и кудит	12	3	-	3	6	
7	Перепутанные состояния света	12	2	-	3	6	
	Промежуточная аттестация	6		-		4	зачет в устной форме
ИТОГО:		72	17	-	17	38	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Квантовая оптика и квантовая информация» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «Квантовая оптика и квантовая информация» проводится в форме зачета. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: Основы квантовой оптики и квантовой информации ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний квантовой оптики и квантовой информации	В целом успешные, но не систематические знания квантовой оптики и квантовой информации	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания квантовой оптики и квантовой информации	Успешные и систематические знания квантовой оптики и квантовой информации

<p>УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования ОПК-3.Б У-6</p>	<p>Отсутствие 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 умение 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 умение 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 умение организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовой оптики, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>
<p>ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета конкретных задач квантовой оптики и квантовой информации ОПК-3.Б В-6</p>	<p>Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета конкретных задач квантовой оптики и квантовой информации</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета конкретных задач квантовой оптики и квантовой информации</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета конкретных задач квантовой оптики и квантовой информации</p>	<p>Успешное и систематическое владение методами описания и расчета конкретных задач квантовой оптики и квантовой информации</p>

12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

Пример:

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

13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:

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

14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

Основная литература.

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

Дополнительная литература.

1. Клышко Д.Н. Неклассический свет // УФН. 1996. 166, № 6.
2. Катамадзе К.Г., Кулик С.П. Управление спектром бифотонного поля // ЖЭТФ. 2011. Vol. 139, № 1. с. 26–45.
3. Eisaman M.D. et al. Invited Review Article: Single-photon sources and detectors // Rev. Sci. Instrum. 2011. Vol. 82, № 7. P. 071101.
4. Lvovsky A.I., Raymer M.G. Continuous-variable optical quantum-state tomography // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81, № 1. P. 299–332.

Интернет-ресурсы.

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуются аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.