

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

Квантовая оптика

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Профиль подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ОПК-2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;

– ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИОПК-2.2. Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования;

– ИПК-1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить математический аппарат квантовой оптики и базовые модели описания квантовых свойств света.

– Научиться применять понятийный аппарат квантовой механики и квантовой оптики для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору "Оптика и спектроскопия".

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 7, зачет.

Семестр 8, экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Математический анализ, Квантовая механика, Теория симметрии, Электродинамика.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 з.е., 180 часов, из которых:

– лекции: 72 ч.;

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Волновые и корпускулярные свойства света.

Фотоэлектрический эффект. Эффект Комптона. Эффект Доплера. Эффект отдачи атомов при излучении. Давление света.

Тема 2. Фурье-преобразования уравнений Максвелла.

Переход от классического описания к квантовому. Квантование электромагнитного поля. Канонические переменные поля. Квантовый осциллятор. Коммутаторы операторов поля. Вакуумное состояние. Нулевые моды. Представления Шредингера, Гейзенберга и взаимодействия.

Тема 3. Фотоны в квантовой теории.

Плоские, сферические и цилиндрические волны. Волновые функции и матрицы плотности. Спин фотона. Параметры Стокса. Угловой момент и чётность фотона. Калибровочные преобразования. Волновые пакеты. «Закрученные» фотоны с орбитальным угловым моментом и их приложения. Оптические пинцеты.

Тема 4. Представление чисел заполнения.

Когерентные состояния. Волновые пакеты с минимальной неопределённостью. Сжатые состояния света. Вакуумный шум. Свойства оператора сдвига. Средние значения операторов в когерентных состояниях. Эффект Казимира. Приложения сжатого света.

Тема 5. Приготовление квантовых состояний и квантовые измерения.

Запутанные состояния. Ловушка Пауля. Лазерное охлаждение атомов и изменение функции распределения атомов по скоростям.

Тема 6. Оптическая интерферометрия.

Интерферометр Маха-Цендера и его модификации. Делители пучков. Параметрическая даун-конверсия фотонов. Квантовая запутанность и телепортация. ЭПР-парадокс и неравенства Белла. Обзор современных экспериментов в оптике.

Тема 7. Современные опыты и приложения: радиационное охлаждение атомов, оптические пинцеты, оптические ловушки, световой парус и т.д.

Тема 8. Функции Вигнера в фазовом пространстве и её альтернативы: Q- и P-функции. Примеры: тепловой источник, когерентные состояния, сжатые состояния и др.

Тема 9. «Неклассический» свет и реализация «кота Шредингера» в оптике. Квантовая томография. Преобразование Радона. Обзор современных экспериментов.

Тема 10. Основы КЭД.

Взаимодействие излучения со свободными электронами и атомами. Лагранжиан и гамильтониан взаимодействия. Уравнение Дирака. Инвариантная теория возмущений. Сечение рассеяния. Квантовый расчёт эффекта Комптона. Получение жестких фотонов в обратном комптоновском рассеянии.

Тема 11. Атом во внешнем поле.

Гамильтониан атома в поле. Теория возмущений для излучения. Дипольное приближение. Излучение атома водорода. Естественная ширина линий. Эффекты Зеемана и Штарка во внешних полях [кратко].

Тема 12. Рассеяние фотонов атомами.

Резонансная флуоресценция и её спектр в присутствии внешнего поля. Частота Раби. Триплет Моллоу в спонтанном испускании.

Тема 13. Вынужденное испускание и поглощение излучения.

Лазер: полуклассическая и квантовая теории [квантовая подробнее, если остаётся время].

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения практических работ и тестов по лекционному материалу и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в первом семестре ставится по результатам текущего контроля по дисциплине.

Экзамен во втором семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа. Каждый билет содержит по два устных вопроса, проверяющих усвоение тем образовательной программы и формирование компетенций в соответствии с п.1.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен

1. Свободное электромагнитное поле как совокупность гармонических осцилляторов
2. Вторичное квантование электромагнитного поля, фотоны
3. Представление чисел заполнения
4. Квантованное свободное электромагнитное поле, гамильтониан, временная эволюция
5. Взаимодействие излучения и среды – классическая электродинамика
6. Взаимодействие излучения и среды – полуклассическая электродинамика
7. Взаимодействие излучения и среды – квантовая электродинамика
8. Когерентные состояния, свойства
9. Представление когерентных состояний, соотношения неопределенности
10. Представления матрицы плотности в когерентных состояниях
11. Статистика фотоотсчетов
12. Проявление квантовых свойств электромагнитного поля
13. 2-уровневая система в классическом поле. Инверсия населенностей
14. Полуклассическая теория лазера
15. 2-уровневая система в квантованном поле. Одномодовое поле, гамильтониан взаимодействия
16. Эволюция системы «атом + поле». Метод амплитуд вероятности
17. Эволюция системы «атом + поле». Представление Гейзенберга. Оператор эволюции.
18. Спонтанное излучение 2-уровневого атома.
19. Атомная когерентность и интерференция
20. Электромагнитно-индуцированная прозрачность
21. Лазерная генерация без инверсии
22. Квантовая теория релаксации: атом и тепловой резервуар
23. Квантовая теория релаксации: поле и тепловой резервуар
24. Уравнение Фоккера-Планка
25. Решение уравнения Фоккера-Планка для поля в когерентном состоянии
26. Квантовая теория лазера

Перечень вопросов, выносимых на практические занятия

1. Свободное электромагнитное поле как совокупность гармонических осцилляторов
2. Вторичное квантование электромагнитного поля, фотоны
3. Представление чисел заполнения

4. Квантованное свободное электромагнитное поле, гамильтониан, временная эволюция
5. Взаимодействие излучения и среды – классическая электродинамика
- 6 Взаимодействие излучения и среды – полуклассическая электродинамика
- 7 Взаимодействие излучения и среды – квантовая электродинамика
8. Когерентные состояния, свойства
9. Представление когерентных состояний, соотношения неопределенности
- 10 Представления матрицы плотности в когерентных состояниях
- 11 Проявление квантовых свойств электромагнитного поля

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» ставится при условии выполнения всех практических заданий по текущему контролю и дачи правильных ответов по всем вопросам билета. Оценка «хорошо» ставится при условии выполнения всех практических заданий по текущему контролю и дачи правильного ответа хотя бы одному вопросу билета. Оценка «удовлетворительно» ставится при условии выполнения всех практических заданий по текущему контролю. Оценка «неудовлетворительно» ставится при условии невыполнения практических заданий по текущему контролю.

11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=22001>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине размещены в электронном университете «Moodle».

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература

- [1] В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, Квантовая электродинамика, М.: Физматлит, 2002.
- [2] М.О. Скалли, М.С. Зубайри, Квантовая оптика, М.: Физматлит, 2003.

б) дополнительная литература:

- [3] В.П. Быков, Лазерная электродинамика, М.: Физматлит, 2006.
- [4] М. Fox, Quantum optics. An introduction. Oxford Uni. Press, 2006.
- [5] В.П. Шляйх, Квантовая оптика в фазовом пространстве, М.: Физматлит, 2005.
- [6] Л. Мандель, Э. Вольф, Оптическая когерентность и квантовая оптика, М.: Физматлит, 2000.

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
- публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

15. Информация о разработчиках

Мерзликин Борис Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, Томский государственный университет, кафедра оптики и спектроскопии, доцент.