

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Введение в квантовую теорию излучения и квантовую оптику
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра нанооптики и спектроскопии
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Ю.Г. Вайнер, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры нанооптики и спектроскопии 20.08.2024

Аннотация

Курс направлен на ознакомление студентов с основными понятиями и явлениями в квантовой теории излучения и квантовой оптике.

Содержание курса рассчитано на студентов, специализирующихся в области оптики и спектроскопии, нанооптики, лазерной физики, а также физики взаимодействия излучения с веществом. Изложение курса будет опираться на базовые основы оптики, электродинамики и квантовой механики. Вводятся основные понятия, принципы и аппарат квантовой электродинамики, обсуждаются основные эффекты взаимодействия света с веществом. Рассмотрены эффекты вакуумных флуктуаций электромагнитного поля и их проявления в спектроскопии. Для закрепления теоретического материала будет предложено несколько задач для домашней работы. Успешное освоение материалов данной дисциплины должно позволить студентам ориентироваться в современной квантовой оптике и нанооптике, а также разбираться в основных подходах и концепциях, используемых для интерпретации оптических эффектов. Освоение курса потребует от слушателей хорошего знания курсов электродинамики и квантовой механики на уровне, соответствующего преподаванию этих дисциплин в МФТИ.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Цель курса заключается в том, чтобы дать студентам знания об основных понятиях и эффектах квантовой электродинамики и квантовой оптики. По окончании учебного курса студенты должны знать основные понятия и методы квантовой теории излучения и квантовой оптики. Целью дисциплины “Квантовая теория излучения и квантовая оптика” является изучение физических основ, математического аппарата квантовой электродинамики и квантовой оптики и теории основных явлений взаимодействия излучения с веществом. Важность данного курса продиктована необходимостью в подготовке для высшей школы, научных учреждений и промышленности высококвалифицированных специалистов в области современной оптики и спектроскопии.

Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области квантовой теории излучения и квантовой оптики;
- приобретение основных теоретических знаний в области спектроскопии и оптики;
- оказание консультаций и помощи студентам в решении конкретных теоретических задач в области спектроскопии и нанооптики;
- приобретение навыков самостоятельной работы в области спектроскопии и квантовой оптики.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации

ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- базовые концепции и методы квантовой электродинамики, квантовой оптики и физики оптических явлений;
- современные проблемы и актуальные темы в области квантовой электродинамики, квантовой оптики и физики оптических явлений;
- основы физики взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, имеющие общефизическое значение и применяемые в различных физических дисциплинах;
- теорию основных оптических эффектов;

уметь:

- правильно выбирать подходящие физические модели для решения исследовательских и прикладных задач в области квантовой оптики и нанооптики;
- проводить на основе выбранных моделей аналитические и численные расчеты;
- анализировать экспериментальные данные в области квантовой оптики;
- интерпретировать спектры отражения, прохождения, и комбинационного рассеяния света;
- производить расчёт различных оптических эффектов;
- критически оценивать применимость применяемых методик и методов

владеть:

- навыками работы с современной научной литературой по тематике квантовая теория излучения и квантовая оптика;
- методами решения по тематике квантовая теория излучения и квантовая оптика;
- теоретическими основами оценок эффектов взаимодействия излучения с веществом.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост.

		лекции	семинары	лаборат. работы	работа
1	Квантовая теория свободного электромагнитного поля	4			10
2	Различные квантовые состояния электромагнитного поля. Фазы квантованного поля	4			10
3	Соотношение неопределенностей для компонент напряженности электромагнитного поля	4			10
4	Свойства фотонов	3			10
5	Вторичное квантование	4			10
6	Квантовая теория взаимодействия излучения с веществом	4			8
7	Вакуумные флуктуации электромагнитного поля и электрон-позитронных пар	4			8
8	Проявление слабого взаимодействия в оптике	3			9
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Квантовая теория свободного электромагнитного поля

Основные постулаты квантовой теории. Принцип соответствия Бора. Квантование свободного электромагнитного поля. Представление чисел заполнения. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Коммутационные соотношения для числа фотонов и напряженностей поля. Нулевые колебания электромагнитного поля.

2. Различные квантовые состояния электромагнитного поля. Фазы квантованного поля

Свойства когерентных состояний. Сжатые состояния. Измерение фазы. Проблема оператора фазы. Неадекватность подхода с использованием фазы и числа частиц как сопряженных переменных. “Тригонометрические” операторы фазы. Оператор фазы Пегга-Барнетта. Соотношение неопределенностей фаза-число фотонов и его физическая иллюстрация.

3. Соотношение неопределенностей для компонент напряженности электромагнитного поля

Работа Ландау и Пайерлса и дискуссия о локальном описании квантованного поля. Анализ измерения напряженностей поля и соотношения неопределенностей для компонент напряженности электромагнитного поля в работах Бора и Розенфельда.

4. Свойства фотонов

Момент. Четность. Поляризация. Частичная поляризация. Параметры Стокса.

5. Вторичное квантование

Неустойчивость и перестройка вакуума при заряде ядра, большем критического. Электрон-позитронный вакуум (теория Дирака). Рождение пар в сильных полях. Вторичное квантование.

6. Квантовая теория взаимодействия излучения с веществом

Взаимодействие излучения с веществом. Теория возмущений. Диаграммы Фейнмана. Испускание и поглощение фотонов. Спонтанные и индуцированные процессы. Естественная ширина спектральных линий (полуфеноменологический подход). Резонансная флуоресценция. Рассеяние света. Комбинационное рассеяние. Резонансное комбинационное рассеяние. Оптические свойства бозе-конденсата атомов в ловушках. Уравнение Брейта.

7. Вакуумные флуктуации электромагнитного поля и электрон-позитронных пар

Лэмбовский сдвиг. Теория и эксперимент. Радиационное затухание. Расходимости в квантовой электродинамике и процедура их устранения. Перенормировка массы и заряда.

8. Проявление слабого взаимодействия в оптике

Основы единой теории электромагнитного и слабого взаимодействия. Слабое взаимодействие и оптическое проявление несохранения четности в атомах и молекулах. Несохранение четности и анапольные (тороидальные) моменты.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Для проведения занятий используются доска и проектор.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Квантовая электродинамика [Текст] : учеб. пособие для студентов физ. спец. ун-тов / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. — 4-е изд., испр. — М. : Физматлит, 1989, 2001, 2002, 2006. — 720 с.
2. Квантовая электродинамика [Текст]/В. Н. Грибов, -М. ; Ижевск, Регулярная и хаотическая динамика, 2001
3. Квантовые поля [Текст] / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков - М.Физматлит,1980
4. Квантовая электродинамика для радиофизиков [Текст]/Б. А. Гришанин, -М, Изд-во МГУ, 1981
5. Квантовая теория поля [Текст]. В 2 т. Т. 1/К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер , -М., Мир, 1984
6. Введение в статистическую радиофизику и оптику [Текст] / С. А. Ахманов, Ю. Е. Дьяков, А. С. Чиркин - М.Наука,1981
7. Оптическая когерентность и квантовая оптика [Текст] = Optical coherence and quantum optics/Л. Мандель, Э. Вольф , -М., Физматлит, 2000

Дополнительная литература

1. Квантовая теория света [Текст] / Р. Лоудон ; пер. с англ. А. А. Колоколова ; под ред. Г. В. Скроцкого - М.Мир,1976
2. Теория фундаментальных процессов [Текст]/Р. Фейнман , -М., Наука, 1978
3. Фотоны и нелинейная оптика [Текст]/Д. Н. Клышко, -М., Наука, 1980
4. Лептоны и кварки [Текст]/Л. Б. Окунь, -М., Наука, 1981
5. Вероятностные и статистические аспекты квантовой теории [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / А. С. Холево. — М. : Наука, 1980. — 320 с.
6. Принципы нелинейной оптики [Текст]/И. Р. Шен , -М., Наука, 1989
7. Собрание научных трудов [Текст]. В 4-х т. Т. 3. Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики 1901-1955/А. Эйнштейн , под ред. И. Е. Тамма, Я. А. Смородинского, Б. Г. Кузнецова , -М., Наука, 1966

8. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике [Текст]/Л. И. Мандельштам, -М., Наука, 1972
9. Статистические свойства рассеянного света [Текст]/Б. Кросиньяни, П. Ди Порто, М. Бертолотти, -М., Наука, 1980
10. Когерентные переходные процессы в оптике [Текст], [монография]/И. В. Евсеев, Н. Н. Рубцова, В. В. Самарцев, -М., Физматлит, 2009

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://lib.mipt.ru/catalogue/1447/?t=764> – электронная библиотека Физтеха, раздел «Оптика».
<http://lib.mipt.ru/catalogue/94/?t=748> – электронная библиотека Физтеха, раздел «Физика».
<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
<http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
<http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. Системы скайп и Zoom для дистанционного обучения и вебинаров.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- систематической самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра нанооптики и спектроскопии
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Разработчик: Ю.Г. Вайнер, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в квантовую теорию излучения и квантовую оптику» обучающийся должен:

знать:

- базовые концепции и методы квантовой электродинамики, квантовой оптики и физики оптических явлений;
- современные проблемы и актуальные темы в области квантовой электродинамики, квантовой оптики и физики оптических явлений;
- основы физики взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, имеющие общефизическое значение и применяемые в различных физических дисциплинах;
- теорию основных оптических эффектов;

уметь:

- правильно выбирать подходящие физические модели для решения исследовательских и прикладных задач в области квантовой оптики и нанооптики;
- проводить на основе выбранных моделей аналитические и численные расчеты;
- анализировать экспериментальные данные в области квантовой оптики;
- интерпретировать спектры отражения, прохождения, и комбинационного рассеяния света;
- производить расчёт различных оптических эффектов;
- критически оценивать применимость применяемых методик и методов

владеть:

- навыками работы с современной научной литературой по тематике квантовая теория излучения и квантовая оптика;
- методами решения по тематике квантовая теория излучения и квантовая оптика;
- теоретическими основами оценок эффектов взаимодействия излучения с веществом.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В начале каждого занятия, за исключением первого, студенты пишут контрольную работу длительностью 10 минут, на которой отвечают на 4 вопроса по материалам предыдущего занятия. Пользоваться конспектами и другими материалами в течение контрольной работы студентам запрещается.

Примеры вопросов контрольной работы:

1. Запишите формулу для гамильтониана взаимодействия излучения с веществом в нерелятивистском и релятивистском подходе.
2. Какие правила отбора для поглощения и комбинационного рассеяния света? С чем связано альтернативное правило запрета?

Примеры задач из домашнего задания и на семинарах:

1. Оценить вклад вакуумных флуктуаций электромагнитного поля в лэмбовский сдвиг, исходя из простой модели дрожания электрона в поле флуктуирующего электромагнитного поля в вакуумном состоянии. Сравнить оценку со строгим подходом Бете.
2. Нарисуйте фейнмановские диаграммы второго порядка в квантовой электродинамике и поясните их физический смысл
3. Рассчитать вклад поляризации вакуума в лэмбовский сдвиг .

Оценка за каждую правильно решённую задачу ставится по двухбалльной шкале: 2 балла – если дано верное решение, 1 балл – если решение частично верно, 0 баллов – если решения нет или оно неверно. Оценка по итогам текущего контроля во 2-м (весеннем) семестре вычисляется как среднее арифметическое оценок за все задания, приведенная к 10-балльной шкале и округленная до целого числа баллов.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Промежуточная аттестация по дисциплине “Квантовая теория излучения и квантовая оптика” осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится устно.

Примерный перечень контрольных вопросов:

1. Гамильтонова форма классической теории излучения.
2. Квантование свободного электромагнитного поля. Представление чисел заполнения.
3. Проблема квантовой фазы.
4. Когерентные состояния.
5. Соотношение неопределенностей для компонент напряженности электромагнитного поля
6. Вакуумные колебания электромагнитного поля.
7. Уравнение Дирака и его свойства. Шредингеровское “дрожание” электрона.
8. Парадокс Клейна.
9. Вторичное квантование. Частицы и античастицы.
10. Квантовая теория взаимодействия излучения с веществом.
11. Испускание и поглощение фотонов.
12. Радиационная ширина спектральных линий.

13. Резонансная флуоресценция.
14. Рассеяние света. Комбинационное рассеяние. Резонансное комбинационное рассеяние.
15. Диаграммы Фейнмана
16. Уравнение Брейта.
17. Лэмбовский сдвиг. Теория и эксперимент.
18. Расходимости в квантовой электродинамике и процедура их устранения. Перенормировка массы и заряда.
19. Квантовая электродинамика в микрополости. Управление спонтанным излучением..
20. Управление лэмбовским сдвигом в микрополости.
21. Статический эффект Казимира.
22. Динамический эффект Казимира.
23. Слабое взаимодействие и оптическое проявление несохранения четности в атомах и молекулах.
24. Несохранение четности и тороидальные моменты.

Примеры контрольных заданий:

1. Оценить вклад вакуумных флуктуаций электромагнитного поля в лэмбовский сдвиг, исходя из простой модели дрожания электрона в поле флуктуирующего электромагнитного поля в вакуумном состоянии. Сравнить оценку со строгим подходом Бете.
2. Рассчитать вклад поляризации вакуума в лэмбовский сдвиг .

Примеры экзаменационных билетов

1. Когерентные состояния.
2. Уравнение Дирака и его свойства. Шредингеровское “дрожание” электрона.
3. Лэмбовский сдвиг. Теория и эксперимент.

Критерии оценивания

Оценка за экзамен в конце семестра выставляется как доля экзаменационных вопросов, на которые студент дал правильный ответ, приведенная к 10-балльной шкале и округленная до целого числа баллов. Итоговая оценка вычисляется как сумма оценки по итогам текущего контроля и оценки за экзамен. Если сумма больше 10, то итоговая оценка равна 10.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен в конце семестра проводится в устной форме по заранее сформулированным вопросам. Каждый студент получает случайный экзаменационный билет. После 30 минут подготовки студент должен устно отвечать на полученные им вопросы, время ответа не должно превышать один астрономический час. При подготовке ответов студент может пользоваться своими конспектами.