

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра квантовой оптики**



Рабочая программа дисциплины

НЕЛИНЕЙНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения

Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к итоговой аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	72	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Ответственный за образовательные программы
д.ф.-м.н., проф.

С.В. Цыбуля

Новосибирск 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	4
5. Перечень учебной литературы.....	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. 7	
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине.....	8

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина (курс) «Нелинейная спектроскопия» имеет своей целью дать обучающимся знания о базовых понятиях, моделях и методах нелинейной лазерной спектроскопии, понимание основных типов нелинейных резонансов в газовых средах.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных исследований в избранной области.</p> <p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Знать понятие матрицы плотности атомов, понятие двухуровневого атома как основной модели нелинейной спектроскопии, основные принципы возникновения нелинейных спектроскопических резонансов в сильном и пробном поле, основы нелинейной спектроскопии при большом доплеровском уширении, основные идеи применения нелинейно-спектроскопических методов;</p> <p>Уметь решать простейшие задачи нелинейной спектроскопии, делать оценки в простейших экспериментальных ситуациях;</p> <p>Владеть аппаратом квантовой механики для описания взаимодействия излучения с квантовыми объектами, в частности, владеть аппаратом матрицы плотности; навыками работы с современными источниками в области нелинейной и лазерной спектроскопии.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Курс «Нелинейная спектроскопия» является базовой дисциплиной в образовательной бакалаврской программе по оптике; изложение материала опирается на знание студентами общей физики, основ электромагнитной теории света и квантовой механики; обеспечена логическая связь «Нелинейной спектроскопии» с курсами «Физика лазеров» и «Физическая оптика». Курс является естественной ступенью к курсу «Кинетические проблемы нелинейной спектроскопии», читаемому в магистратуре.

Курс предназначен для бакалавров, область будущей профессиональной деятельности которых включает:

- исследования процессов взаимодействия оптического излучения с веществом;
- научные исследования и метрология с использованием лазерного излучения и нелинейно-спектроскопических методов;

- разработку, исследование, модификацию и применение лазерных систем, а также устройств для управления лазерным излучением;
- научная, техническая, технологическая и инженерная деятельность в области квантовой и нелинейной оптики.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Итоговая аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к итоговой аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	72	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения;
- итоговая аттестация: экзамен.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов.

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

Дисциплина представляет собой полугодовой курс, читаемый в восьмом семестре физического факультета НГУ. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 2 зачётные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)	Про-меж-улки
-------	-------------------	-----------------	--	--------------

1	2	3	Всего	Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	8
				Лекции	Практические занятия		
1.	Взаимодействие монохроматического излучения с двухуровневой квантовой системой. Аппарат амплитуд вероятностей <i>Форма контроля: выборочный опрос.</i>	1,2,3,4	11	9		2	
2.	Аппарат матрицы плотности <i>Форма контроля: выборочный опрос.</i>	5,6,7,8	13	7		6	
3.	Спектроскопия пробного поля <i>Форма контроля: выборочный опрос.</i>	9,10,11	9	5		4	
4.	Нелинейная спектроскопия в условиях большого доплеровского уширения <i>Форма контроля: выборочный опрос.</i>	12,13	8	4		4	
5.	Спектры спонтанного испускания <i>Форма контроля: выборочный опрос.</i>	14,15	6	4		2	
6.	Спектроскопия на переходах с вырожденными уровнями	16	3	3		0	
7.	Консультации		2				2
8.	Самостоятельная работа в период подготовки к итоговой аттестации		18				18
9.	Экзамен		2				2
Итого:			72	32	0	18	22

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Раздел 1. Взаимодействие монохроматического излучения с двухуровневой квантовой системой. Аппарат амплитуд вероятностей (9 часов)

Уравнения для амплитуд вероятностей. Резонансное приближение.

Полевое расщепление уровней (динамический эффект Штарка). Динамика радиационных переходов. Частота Раби.

пр-импульсы, самоиндуцированная прозрачность. Адиабатическое инвертирование.

Вероятность поглощения и излучения. Работа поля

Раздел 2. Аппарат матрицы плотности (7 часов)

Усреднение по моментам возбуждения. Релаксационные процессы. Заселённости уровней и недиагональные элементы матрицы плотности. Эффект насыщения в монохроматическом поле.

Нелинейное поглощение (усиление) и нелинейная дисперсия. Формула Карплюса-Швингера для работы поля.

Раздел 3. Спектроскопия пробного поля (5 часов)

Трёхуровневые системы. Дисперсия и спектр поглощения (усиления). Проявление эффектов насыщения, нелинейных интерференционных эффектов и полевого расщепления уровней.

Оптическая накачка, когерентное пленение заселённостей и «чёрный резонанс» в трёхуровневых системах.

Спектроскопия пробного поля в двухуровневых системах. Усиление без инверсии, дисперсия без поглощения. Параметрические процессы.

Раздел 4. Нелинейная спектроскопия в условиях большого доплеровского уширения (4 часа)

Распределение по скоростям. Беннетовские структуры в случае бегущей и стоячей волн.

Нелинейный резонанс в работе поля стоячей волны.

Простейшая модель одномодового лазера. Провал Лэмба.

Анизотропия формы нелинейных резонансов в трёхуровневых системах.

Спектроскопия двухфотонного поглощения и вынужденного резонансного комбинационного рассеяния, свободная от доплеровского уширения. Нелинейные резонансы в двухуровневых системах.

Раздел 5. Спектры спонтанного испускания (4 часа)

Спонтанное испускание как результат взаимодействия квантовой системы с нулевыми колебаниями вакуума. «Классический» рецепт описания спонтанного испускания.

Спектр резонансного комбинационного рассеяния. Спектр резонансной флуоресценции.

Раздел 6. Спектроскопия на переходах с вырожденными уровнями (3 часа)

Взаимодействие с излучением простой поляризации. Произвольная поляризация излучения, большие значения угловых моментов. Квазиклассическое приближение по вращательному движению.

Самостоятельная работа студентов (36 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	9
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	9
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

5.1. Основная литература

Ландау, Лев Давидович. Теоретическая физика : учебное пособие для студентов физических специальностей университетов : [в 10 т.] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Москва : Наука, 19 -22 см

Раутиан С.Г., Смирнов Г.И., Шалагин А.М. Нелинейные резонансы в спектрах атомов и молекул. Новосибирск: Наука, 1979.

5.2. Дополнительная литература

Шалагин А.М. Основы нелинейной спектроскопии. Новосибирск: НГУ, 2006

Лазерная спектроскопия атомов и молекул. Под ред. **Вальтера Г., М.:** Мир, 1979.

Демтрёдер В. Лазерная спектроскопия. М.: Наука, 1985

Летохов В.С., Чеботаев В.П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. Москва, Наука, 1990

Rautian S.G., Shalagin A.M. Kinetic Problems of Non-Linear Spectroscopy. North-Holland. 1991.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Необходимости в дополнительных учебно-методических материалах нет.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Нелинейная спектроскопия» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Реализация дисциплины может осуществляться с применением электронного обучения на платформе Zoom с использованием презентаций.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и итоговой аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости студента проводится следующими видами контроля: задания для самостоятельного решения с последующим разбором на занятиях.

Итоговая аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области нелинейной лазерной спектроскопии в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда

все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение итоговой аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать понятие матрицы плотности атомов, понятие двухуровневого атома как основной модели нелинейной спектроскопии, основные принципы возникновения нелинейных спектроскопических резонансов в сильном и пробном поле, основы нелинейной спектроскопии при большом доплеровском уширении, основные идеи применения нелинейно-спектроскопических методов.	Проведение контрольных работ, экзамен.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь решать простейшие задачи нелинейной спектроскопии, делать оценки в простейших экспериментальных ситуациях.	Проведение контрольных работ, экзамен.
ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	Владеть аппаратом квантовой механики для описания взаимодействия излучения с квантовыми объектами, в частности, владеть аппаратом матрицы плотности; навыками работы с современными источниками в области нелинейной и лазерной спектроскопии.	Проведение контрольных работ, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Нелинейная спектроскопия».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6

Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.2 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Примеры задания для самостоятельного решения

1. Получить формулу для самоиндуцированной прозрачности при произвольной временной форме (но с постоянной фазой) импульса возбуждающего излучения.
2. Вычислить спектр поглощения пробного поля в Λ -схеме в отсутствие релаксации нижних уровней при различных отстройках частоты сильного поля.
3. Выявить условия, при которых в Λ -схеме работа пробного поля как функция его частоты знакопеременна.
4. Вычислить работу пробного поля, резонансного тому же переходу, что и сильное (двухуровневая система).
5. Получить выражение для спектральной плотности спонтанного испускания на том же переходе, которому резонансно сильное поле, в условиях, когда есть промежуточный уровень.

- Доказать, что коэффициент усиления пробного поля меньше такового для сильного поля, если частота пробного поля близка к частоте сильного (двухуровневая система)

Вопросы, выносимые на экзамен

- Уравнения для амплитуд вероятности. Резонансное приближение.
- Нелинейные резонансы в работе пробного поля при большом доплеровском уширении: двухуровневая система, случай $\mathbf{k}_\mu \uparrow \downarrow \mathbf{k}$ и $\mathbf{k}_\mu \uparrow \uparrow \mathbf{k}$.
- Полевое расщепление уровней (динамический эффект Штарка).
- Нелинейные резонансы в спектре спонтанного испускания при большом доплеровском уширении.
- Осцилляции Раби. Самоиндуцированная прозрачность и $N\pi$ -импульсы.
- Нелинейные резонансы в трехуровневых системах при большом доплеровском уширении. Приближение первых нелинейных поправок. Случай $\Omega \leq k \bar{v}$.
- Адиабатическое инвертирование.
- Взаимодействие с излучением на переходах с вырожденными уровнями. Простые поляризации.
- Аппарат матрицы плотности. Усреднение по моментам возбуждения.
- Взаимодействие с бегущей монохроматической волной при большом доплеровском уширении. Провал и пик Беннета. Работа поля.
- Матрица плотности: монохроматическое возмущение, стационарные условия. Заселенности уровней и работа поля.
- Нелинейные резонансы в трехуровневых системах при большом доплеровском уширении и при большом значении Ω ($\Omega \gg k \bar{v}$).
- Спектроскопия пробного поля: трехуровневая система, низкая интенсивность сильного поля.
- Взаимодействие со стоячей волной при большом доплеровском уширении. Распределение заселенностей по скоростям, провалы Беннета, провал Лэмба в спектре работы поля.
- Поглощение из основного состояния. Оптическая накачка. Оптическая ориентация и оптическое выстраивание в системе магнитных подуровней.
- Простейшая модель газового лазера. Лазер с нелинейной поглощающей ячейкой.
- Когерентное пленение населенностей (Λ -схема). «Темный» резонанс, пик «аномального» поглощения в сугубо нерезонансных условиях.
- Квазиклассическое описание взаимодействия с квантовыми системами с большим значением угловых моментов J энергетических уровней.
- Спектроскопия пробного поля в трехуровневой системе: дисперсия и поглощение в случае предельно высокой интенсивности сильного поля.

20. Компенсация остаточного доплеровского уширения в трехуровневых Λ -системах за счет интенсивности сильного поля ($\Omega \gg k\bar{v}$, $\mathbf{k}_\mu \uparrow \uparrow \mathbf{k}$).
21. Спектроскопия пробного поля в двухуровневой системе (предельно высокие интенсивности сильного поля). Усиление без инверсии, дисперсия без поглощения.
22. Нелинейный резонанс в спектре пробного поля в двухуровневой системе при $\Omega \gg k\bar{v}$, $\mathbf{k}_\mu \uparrow \uparrow \mathbf{k}$. Спектроскопия пробного поля в двухуровневой системе на переходе из основного состояния.
23. Спектроскопия пробного поля в трехуровневой системе. Получение и анализ общей формулы для поляризации среды на частоте пробного поля: эффект насыщения, нелинейный интерференционный эффект, полевое расщепление уровней, интегральная по частоте работа пробного поля.
24. Оптическая ориентация и оптическая накачка в системе магнитных подуровней. Аналогии с эффектом когерентного пленения населенностей.
25. Общий анализ формулы для нелинейной восприимчивости пробного поля в двухуровневой системе: интегральное по частоте значение, соотношение между коэффициентами поглощения (усиления) для сильного и пробного полей.
26. Спектр спонтанного испускания. Вывод уравнений для матрицы плотности, общая формула и предельные случаи.
27. Нелинейный резонанс в работе пробного поля в двухуровневых системах при $\mathbf{k}_\mu \uparrow \downarrow \mathbf{k}$ и относительно высокой интенсивности сильного поля (большое доплеровское уширение)

Пример экзаменационного билета

1. Когерентное пленение населенностей (Λ -схема). «Темный» резонанс, пик «аномального» поглощения в сугубо нерезонансных условиях (на компетенцию ПК-1).
2. Квазиклассическое описание взаимодействия с квантовыми системами с большим значением угловых моментов J энергетических уровней (на компетенцию ПК-2).

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

<p>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</p> <p><i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования</i></p> <p><i>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»</i></p> <p><i>(Новосибирский государственный университет, НГУ)</i></p> <p>Физический факультет</p>
<p>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</p>
<p>1</p>

2

Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/
(подпись)

«___» _____ 20 г.

Форма экзаменационного билета

Оценочные материалы по итоговой аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Нелинейная спектроскопия»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного