

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук» (ИПФ РАН)**

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

\_\_\_\_\_ М.Ю. Глявин

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## **Рабочая программа дисциплины**

### **Микроволновая спектроскопия**

---

Уровень высшего образования  
Подготовка кадров высшей квалификации

---

Направление подготовки / специальность  
03.06.01 Физика и астрономия

---

Направленность образовательной программы  
01.04.03 Радиофизика

---

Квалификация (степень)  
Исследователь. Преподаватель-исследователь.

---

Форма обучения  
очная

---

Нижний Новгород

20\_\_

## 1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Микроволновая спектроскопия» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является дисциплиной по выбору аспиранта, преподается на втором году обучения в четвертом семестре.

Освоение дисциплины опирается на знания, умения, навыки и компетенции, сформированные на двух предшествующих уровнях образования. В частности, на знания, умения и навыки, полученные в ходе освоения таких дисциплин, как «Теория колебаний и волн», «Электродинамика», «Электромагнитные волны» и т.п.

### Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у аспирантов современного представления о природе и свойствах молекулярных спектров, физических основах исследования спектров в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, основных типах спектрометров и их характеристиках;
- формирование у аспирантов профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.03 «Радиофизика»

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Таблица 1:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

| Формируемые компетенции  | Планируемые результаты обучения по дисциплине   |
|--|---|
| <b>ПК-2</b><br><i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта</i><br>(этап освоения - базовый) | <i>З1 (ПК-2) Знать основные принципы квантово-механического описания внутреннего движения молекул, использования вариационного и ab initio методов для расчёта энергетических уровней молекул, структуру спектров основных молекул, представляющих интерес для радиоастрономии и физики атмосферы, основные механизмы межмолекулярных взаимодействий, влияющих на форму наблюдаемых профилей спектральных линий и полос: эффектов однородного и неоднородного уширения профилей линий, сдвига центральной частоты, столкновительной связи, природе нерезонансного (континуального) поглощения</i><br><i>У1 (ПК-2) Уметь использовать современные методы исследования молекулярных спектров с помощью видеоспектрометра, спектрометра с радиоакустическим детектированием поглощения, спектрометра на базе резонатора Фабри-Перо</i><br><i>В1 (ПК-2) Владеть современными методами анализа наблюдаемых в эксперименте профилей с помощью известных модельных профилей, на основе полученных экспериментальных данных определять параметры спектральных линий: интенсивность, центральную частоту, коэффициент уширения, коэффициент столкновительной связи</i> |
| <b>ПК-3</b><br><i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)</i><br>(этап освоения - базовый)  | <i>З1 (ПК-3) Знать основные разделы микроволновой спектроскопии, необходимые для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач.</i><br><i>У1 (ПК-3) Уметь применять полученные в области микроволновой спектроскопии знания для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач.</i><br><i>В1 (ПК-3) Владеть навыками решения практических задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</i>   |

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (36 часов занятия лекционного типа, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 70 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2:

Структура дисциплины

| Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине | Всего (часы) | В том числе   |                           |            |       | Самостоятельная работа обучающегося, часы |
|---|--------------|---|---------------------------|------------|-------|---|
|   |              | Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы |                           |            | Всего |   |
|   |              | Занятия лекционного типа  | Занятия семинарского типа | из них     |       |   |
| Общие принципы спектроскопии. Молекулярная газовая спектроскопия. Методы микроволновой спектроскопии      | 10           | 2   |                           | 2          | 8     |   |
| Вращательные и колебательные спектры молекул  | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Основы теоретического расчета спектров молекул  | 8            | 1   | 1                         | 2          | 6     |   |
| Однородное и неоднородное уширение профиля линии. Столкновительные эффекты                                | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Спектры атмосферных газов – молекулярного кислорода и водяного пара                                       | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Источники излучения. Методики стабилизации частоты  | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Методики экспериментального исследования спектров   | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Устройство и принцип работы спектрометра РАД  | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Устройство и принцип работы резонаторного спектрометра  | 12           | 2   | 2                         | 4          | 8     |   |
| Практическое применение точных лабораторных данных  | 4            | 1   | 1                         | 2          | 2     |   |
| в т.ч. текущий контроль   |              |   | 4                         |            |       |   |
| Аттестация по дисциплине – зачет  | 2            |   |                           | 2          |       |   |
| <b>Итого</b>  |              |   |                           | <b>108</b> |       |   |

#### Содержание разделов дисциплины

##### Раздел 1. Общие принципы спектроскопии. Молекулярная газовая спектроскопия. Методы микроволновой спектроскопии

История исследований взаимодействия излучения с веществом. Взаимодействие излучения с веществом с точки зрения квантовой механики. Энергетические уровни и переходы между ними, энергия кванта. Закон Бугера-Ламберта-Бера, коэффициент поглощения. некогерентные и когерентные источники излучения для исследования спектров.

## **Раздел 2. Вращательные и колебательные спектры молекул**

Вращательное движение молекулы: квантование момента импульса и энергии вращения молекулы. Правила отбора для вращательных переходов. Колебательное движение молекулы. Правила отбора для колебательных и колебательно-вращательных переходов. Примеры спектров.

## **Раздел 3. Основы теоретического расчета спектров молекул**

Решение уравнение Шредингера для внутреннего движения молекулы. Расчет поверхности потенциальной энергии. Вариационный и *ab initio* методы расчета

## **Раздел 4. Однородное и неоднородное уширение профиля линии. Столкновительные эффекты**

Форма наблюдаемого в эксперименте профиля линии. Доплеровское уширение. Эффект Дикке. Уширение столкновениями. Учёт скорости взаимодействующих молекул. Матрица столкновительной релаксации и эффект столкновительной связи линий. Модельные профили линий и извлечение параметров линий.

## **Раздел 5. Спектры атмосферных газов – молекулярного кислорода и водяного пара**

Спектр молекулярного кислорода: вращательные уровни, уровни тонкой структуры. Вращательные переходы, переходы тонкой структуры, нерезонансные переходы. Учёт столкновительной связи линий в спектре кислорода. Спектр водяного пара: линии молекулы воды в мм/СубММ-диапазоне. Континуальное поглощение и способы его описания.

## **Раздел 6. Источники излучения. Методики стабилизации частоты**

Лампа обратной волны (ЛОВ), принцип действия. ММ/СубММ-синтезаторы на базе ЛОВ. Система фазовой автоподстройки частоты. Управление частотой ЛОВ. Влияние опорного сигнала на спектральную чистоту стабилизируемого источника излучения.

## **Раздел 7. Методики экспериментального исследования спектров**

Общие принципы наблюдения спектров. Видеоспектрометр СубММ-диапазона с гелиевым болометром. Измерение центральных частот линий методом провала Лэмба. Фурье-спектрометр.

## **Раздел 8. Устройство и принцип работы спектрометра РАД**

Идея наблюдения изменения свойств вещества, взаимодействующего с излучением. Устройство радиоакустического детектора поглощения. Модуляция параметров излучения для повышения точности измерений. Учёт аппаратной функции. Обработка экспериментальных данных.

## **Раздел 9. Устройство и принцип работы резонаторного спектрометра**

Устройство резонатора Фабри-Перо. Собственные моды и добротность резонатора. Связь коэффициента поглощения с добротностью. Частотный и временной режим работы спектрометра. Методика вариации длины резонатора для измерения поглощения в водяном паре. Учёт аппаратной функции. Обработка экспериментальных данных.

## **Раздел 10. Практическое применение точных лабораторных данных**

Определение свойств и строения вещества, количественный анализ состава веществ. Зондирование атмосферы: дистанционное измерение температуры, давления, влажности, концентрации малых составляющих по спутниковым данным. Радиоастрономия и астрофизика.

## **4. Образовательные технологии**

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Микроволновая спектроскопия» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта.

## 5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе аудиторных занятий по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

## 6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

### 6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

### 6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме зачета. Зачет состоит из индивидуального собеседования и решения практических контрольных заданий. Критерии оценок выполнения задания:

|            |   |
|------------|---|
| Зачтено    | В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования, возможно с небольшими неточностями; допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов. |
| Не зачтено | Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки.  |

### 6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

**Вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

Для оценки сформированности компетенций ПК-2, ПК-3:

1. Взаимодействие излучения с веществом с точки зрения квантовой механики. Энергетические уровни и переходы между ними, энергия кванта.
2. Закон Бугера-Ламберта-Бера, коэффициент поглощения.
3. Вращательное движение молекулы: квантование момента импульса и энергии вращения молекулы. Правила отбора для вращательных переходов.
4. Колебательное движение молекулы. Правила отбора для колебательных и колебательно-вращательных переходов.
5. Решение уравнение Шредингера для внутреннего движения молекулы. Расчет поверхности потенциальной энергии.
6. Вариационный и *ab initio* методы расчета спектров молекул.
7. Доплеровское уширение. Эффект Дике.
8. Уширение столкновениями. Учёт скорости взаимодействующих молекул.
9. Матрица столкновительной релаксации и эффект столкновительной связи линий.
10. Форма наблюдаемого в эксперименте профиля линии. Модельные профили линий и

извлечение параметров линий.

11. Спектр молекулярного кислорода: вращательные уровни, уровни тонкой структуры. Вращательные переходы, переходы тонкой структуры, нерезонансные переходы. Учёт столкновительной связи линий в спектре кислорода.
12. Спектр водяного пара: линии молекулы воды в мм/СубММ-диапазоне.
13. Континуальное поглощение и способы его описания.
14. Лампа обратной волны (ЛОВ), принцип действия. Система фазовой автоподстройки частоты. Управление частотой ЛОВ.
15. Общие принципы наблюдения спектров. Разновидности спектрометров.
16. Видеоспектрометр СубММ-диапазона с гелиевым болометром. Измерение центральных частот линий методом провала Лэмба.
17. Устройство радиоакустического детектора поглощения. Обработка экспериментальных данных, полученных на РАД-спектрометре.
18. Устройство резонатора Фабри-Перо. Собственные моды и добротность резонатора. Связь коэффициента поглощения с добротностью.
19. Частотный и временной режим работы спектрометра. Вариация длины резонатора для измерения поглощения в водяном паре. Обработка экспериментальных данных, полученных на резонаторном спектрометре.
20. Определение свойств и строения вещества, количественный анализ состава веществ методами спектроскопии.
21. Зондирование атмосферы: дистанционное измерение температуры, давления, влажности, концентрации малых составляющих по спутниковым данным.
22. Применение спектроскопии в радиоастрономии и астрофизике.

## **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

а) основная литература:

1. М.Ю. Третьяков, «Высокочастотная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн», Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2016 – 7 экз.
3. Золотарев В.М., Никоноров Н.В., Игнатьев А.И. Современные методы исследования оптических материалов Учебное пособие. Учебные издания Санкт-Петербургского национально-исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1015.pdf>

б) дополнительная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т.7: Электродинамика сплошных сред – 4 экз.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 10: Физическая кинетика. – 4 экз.
2. Ч. Таунс, А.Шавлов, «Радиоспектроскопия», М.: ИЛ, 1989 – 1 экз.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);

- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.03 Радиофизика.

Автор \_\_\_\_\_ М.Ю.Третьяков

Ответственный за направление подготовки \_\_\_\_\_ Вл.В. Кочаровский

Рецензент \_\_\_\_\_

Программа принята на заседании Ученого совета Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОФПиЭБМ \_\_\_\_\_ О.С. Моченева

Программа принята на заседании Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОГГиЦГ \_\_\_\_\_ М.В. Шаталина

Программа принята на заседании Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОНДиО \_\_\_\_\_ А.В. Коржиманов

**Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина**

**ПК-2** Способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

| Индикаторы компетенций   | Критерии оценивания результатов обучения  |  |
|--|---|--|
|  | Зачтено   | Не зачтено   |
| <u>Знания:</u><br>Знать основные принципы квантово-механического описания внутреннего движения молекул, использования вариационного и ab initio методов для расчёта энергетических уровней молекул, структуру спектров основных молекул, представляющих интерес для радиоастрономии и физики атмосферы, основные механизмы межмолекулярных взаимодействий, влияющих на форму наблюдаемых профилей спектральных линий и полос: эффектах однородного и неоднородного уширения профилей линий, сдвига центральной частоты, столкновительной связи, природе нерезонансного (континуального) поглощения | Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины                                       | Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения  |
| <u>Умения:</u><br>Уметь использовать современные методы исследования молекулярных спектров с помощью видеоспектрометра, спектрометра с радиоакустическим детектированием поглощения, спектрометра на базе резонатора Фабри-Перо  | Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины                                       | Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата |
| <u>Навыки:</u><br>Владеть современными методами анализа наблюдаемых в эксперименте профилей с помощью известных модельных профилей, на основе полученных экспериментальных данных определять параметры спектральных линий: интенсивность, центральную частоту, коэффициент уширения, коэффициент столкновительной связи  | Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях | Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения |
| Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий   | 50 – 100%   | 0 – 50 %   |

**ПК-3** Способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

| Индикаторы компетенций   | Критерии оценивания результатов обучения  |  |
|--|---|--|
|  | Зачтено   | Не зачтено   |
| <u>Знания:</u><br>Знать основные разделы микроволновой спектроскопии, необходимые для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач          | Успешная демонстрация знаний по базовым разделам дисциплины                                       | Отсутствие знаний или фрагментарные знания без положительного результата применения  |
| <u>Умения:</u><br>Уметь применять полученные в области микроволновой спектроскопии знания для решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач. | Успешная демонстрация умений по базовым разделам дисциплины                                       | Отсутствие умений или фрагментарное присутствие умений без положительного результата |
| <u>Навыки:</u><br>Владеть навыками решения практических задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.                                   | Успешная демонстрация навыков решения задач на базе полученных в ходе освоения дисциплины знаниях | Отсутствие навыков или фрагментарные навыки без положительного результата применения |
| Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий   | 50 – 100%   | 0 – 50 %   |