



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль  
01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

## **Правительство Российской Федерации**

### **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"**

#### **Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре**

Авторы программы:  
Макаров Александр Аркадьевич,  
д.ф.м.н. , e-mail: [amakarov@isan.troitsk.ru](mailto:amakarov@isan.troitsk.ru)

Москва - 2017

*Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения разработчика программы.*



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

## 1. Цель и задачи программы

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям аспиранта по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» профиля 01.04.05 «Оптика» и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для преподавателей, ведущих данную дисциплину, и аспирантов направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 «Оптика».

Программа разработана в соответствии с:

Образовательным стандартом НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия»;

Образовательной программой «Физика и астрономия» подготовки аспиранта.

Учебным планом подготовки аспирантов по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», профиль 01.04.05 «Оптика», утвержденным в 2017.

В основу Программы положена Программа-минимум кандидатского экзамена по специальности 01.04.02 «Оптика» по физико-математическим и техническим наукам, разработанная экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике.

2. Цели освоения дисциплины:

- получение фундаментальных знаний в области оптической спектроскопии атомов, ионов и молекул;
- углубление представлений о физике процессов поглощения, излучения и рассеяния света квантовыми системами;
- ознакомление с современными методами спектроскопии с использованием лазеров, - с акцентом на те методы, которые до появления лазеров были невозможны;
- ознакомление с многочисленными достижениями лазерной спектроскопии в исследованиях свойств атомов и молекул, а также в практических задачах анализа вещества.

Кроме того, освоение дисциплины должно способствовать формированию профессиональных компетенций, определяемых профилем программы аспирантуры.

## 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

- Знать: основные концепции, лежащие в основе применения лазерного излучения в спектроскопии различных объектов; теорию фундаментальных процессов в спектроскопии; основные методы, демонстрирующие такие качества, как (1) сверхвысокая чувствительность, (2) сверхвысокая селективность, (3) сверхвысокое спектральное разрешение, (4) сверхвысокое временное разрешение.
- Уметь: выбирать адекватный метод для решения конкретной физической задачи; пользоваться математическим аппаратом в той мере, которая позволяет получать решение конкретной практической задачи исходя из первых принципов и основных уравнений фундаментальных дисциплин, - в основном, квантовой механики и электродинамики.
- Иметь навыки (приобрести опыт): работы с современной научной литературой по



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
 Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль  
 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

актуальным разделам атомной и молекулярной спектроскопии.

В результате освоения дисциплины аспирант осваивает следующие компетенции:

Компетенция (указываются в соответствии с ОС НИУ ВШЭ)	Код по ОС НИУ ВШЭ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	УК-1	Демонстрирует способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.	УК-3	Демонстрирует готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	УК-4	Демонстрирует готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность выполнять исследования в области оптической спектроскопии.	ПК-1	Демонстрирует способность выполнять исследования в области оптической спектроскопии.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области оптики с	ОПК-1	Демонстрирует способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
 Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль  
 01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.		оптики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.	
Способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности.	ОПК-2	Демонстрирует способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.

#### 4. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина относится к дисциплинам вариативной части, обязательной для профиля «Оптика».

Изучение данной дисциплины базируется на следующих базовых дисциплинах:

- Атомная спектроскопия
- Молекулярная спектроскопия
- Лазерная спектроскопия

#### 5. Тематический план учебной дисциплины

№	Название темы	Всего часов	Аудиторные часы			Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	Практические занятия	
1	Структура и спектроскопические свойства атомов и ионов	20	6			14
2	Структура и спектроскопические свойства молекул	20	6			14
3	Фундаментальные процессы в спектроскопии	20	6			14
4	Спектроскопия высокой чувствительности	16	4			12
5	Методы высокого спектрального разрешения	16	4			12
6	Эффекты квантовой интерференции в спектроскопии	22	4			18
	<b>Итого</b>	114	30			84



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль  
01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

## 6. Формы контроля знаний аспирантов

Тип контроля	Форма контроля	Полугодие	Параметры
		2	
Текущий	<i>Домашнее задание</i>		Задачи по материалу лекции, выдаваемые студентам на дом в конце лекции. Обсуждение этих задач в начале следующей лекции.
Итоговый по дисциплине	<i>Экзамен</i>		Беседа с преподавателем (всего 1,5-2 часа)

### 6.1 Критерии оценки знаний, навыков

Текущий контроль: за все домашние задания выставляется одна общая оценка по 10-ти балльной шкале, равная доле правильно решенных задач, умноженной на 10.

Экзамен оценивается по 10-ти балльной шкале и состоит из пяти теоретических вопросов. На каждый вопрос даётся десять-пятнадцать минут на подготовку. Студент в очной беседе с преподавателем отвечает на вопросы. Оценка, выставляемая за экзамен, равна количеству правильных ответов, умноженному на два. Время, отводимое на экзамен, — 1½ часа.

### 6.2 Порядок формирования оценок по дисциплине

Оценка за курс является средним арифметическим оценки текущего контроля и оценки за экзамен.

## 7. Содержание дисциплины

### 7.1 Раздел 1. Структура и спектроскопические свойства атомов и ионов

Спектры водорода и гелия. Многоэлектронные оболочки, схемы связи. Эффекты Штарка и Зеемана. Ридберговские состояния. Ионизационный континуум, автоионизация. Отрицательные ионы.

### 7.2 Раздел 2. Структура и спектроскопические свойства молекул

Колебательно-вращательные спектры многоатомных молекул. Точечные группы симметрии. Линейные молекулы. Вращательные состояния, симметрия и спиновая статистика. Молекулы типа симметричного волчка. Кориолисово взаимодействие. Параллельные и перпендикулярные полосы, чередование интенсивностей. Инверсионное удвоение. Молекулы типа асимметричного волчка.

### 7.3 Раздел 3. Фундаментальные процессы в спектроскопии

Спонтанное излучение. Вынужденное излучение и поглощение. Когерентное излучение. Квазиэнергия. Многофотонные процессы. Спонтанное и вынужденное рассеяние. Когерентное рассеяние. КАРС, четырёхволновое смешение. Релаксационные процессы. Фотонное эхо.

### 7.4 Раздел 4. Спектроскопия высокой чувствительности

Флуоресцентная спектроскопия. Фотоионизационная спектроскопия. Абсорбционная спектроскопия. Методы спектроскопии возбуждения: оптоакустический, оптотермический,



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль  
01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

оптогальванический, опторефракционный, фототклонение. Модуляционные методы: штарковская спектроскопия, магнитный резонанс, поляризационная спектроскопия.

### **7.5 Раздел 5. Методы высокого спектрального разрешения**

Линейная спектроскопия: применение атомных и молекулярных пучков, охлажденных молекулярных струй; сужение распределения по скоростям при ускорении пучков; лазерное охлаждение ионов в ловушках; замедление и охлаждение атомных пучков резонансным световым давлением; лазерные ловушки для атомов. Субдоплеровская спектроскопия: узкие резонансы в спектроскопии насыщения; лэмбовский провал; узкий резонанс в стоячей волне на двухфотонном переходе.

### **7.6 Раздел 6. Эффекты квантовой интерференции в спектроскопии**

Квантовые биения. Эффект Ханле. Когерентное пленение населённости. Электромагнитно индуцированная прозрачность. Эффект Ауслера-Таунса. Сверхизлучение Дике. Генерация без инверсии. Создание метастабильных перепутанных состояний в системе из двух атомов.

## **8. Образовательные технологии**

На лекции обсуждаются ключевые понятия и технические выкладки разбираемой темы, даются необходимые определения, разбираются поучительные примеры. Аспирантам на дом даются задачи для самостоятельного разбора, содержащие как упражнения для усвоения пройденного материала, так и нестандартные задачи, позволяющие проверить уровень общего понимания предмета и требующие изучения дополнительного материала. Некоторые задачи предваряют (продолжают) тематику лекций.

## **9. Оценочные средства для текущего контроля и аттестации студента**

### **9.1 Тематика заданий текущего контроля**

Примеры задач домашнего задания :

1. Вывести формулу, описывающую спектр атомного перехода из основного состояния в непрерывный спектр при наличии автоионизационного состояния (антирезонанс Фано).
2. Произвести классификацию колебательных мод молекулы типа  $AR_6$  по типам симметрии; определить, какие моды активны в поглощении, комбинационном рассеянии и гиперкомбинационном рассеянии.
3. Определить динамику и спектр спонтанного излучения при каскадных переходах в трёхуровневой квантовой системе.

### **9.2 Вопросы для оценки качества освоения дисциплины**

Примеры вопросов к экзамену:

1. Механизмы уширения спектральных линий. Сужение Дике.
2. Правила отбора по вращательным квантовым числам для параллельных и перпендикулярных колебательных полос молекул типа симметричного волчка.
3. Субдоплеровская спектроскопия насыщения. Провал Лэмба.

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

### **Основная литература:**

1. Будкер Д., Кимбелл Б., ДеМилль Д. Атомная физика: освоение через задачи. / Пер. с англ. под ред. Е. Б. Александрова. М.: Физматлит, 2009.
2. Собельман И. И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Наука, 1977.
3. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. / Пер. С англ. Под ред. М. А. Ельяшевича. М.: ИЛ, 1949.



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
Программа дисциплины «Оптическая спектроскопия» для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль  
01.04.05 «Оптика» подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

4. Демтрёдер В. Современная лазерная спектроскопия 4-е изд./ Пер. с англ. под ред. Л. А. Мельникова. Долгопрудный: Интеллект, 2014; Demtroder, Wolfgang (2008). Laser Spectroscopy, Vol. 1 (Basic Principles), Vol. 2 (Experimental Technics). Springer, 4-th edition.

**Дополнительная литература:**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теоретическая физика, том III / Квантовая механика (нерелятивистская теория). 3-е изд. М. : Наука, 1974
2. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: УРСС, 2001.
3. Gordy W., Cook R. L.. Microwave molecular spectra. John Wiley & Sons Inc, 1984.
4. Летохов В. С., Чеботаев В. П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М.: Наука, 1990.

5. Shore, Bruce W. (1990), The Theory of Coherent Atomic Excitation (Vol. 1: Simple atoms and fields). New York: Wiley-Interscience.

6. Зельдович Я. Б. «Рассеяние и излучение квантовой системой в сильной электромагнитной волне» // УФН. 1973. Т. 110 (5), с. 139-151.

**Программные средства**

При решении некоторых задач нужно умение пользоваться программой «Математика» либо, что предпочтительнее, уметь программировать на языке «Фортран»

## **11. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Для проведения лекций не используется специальное оборудование, кроме ноутбука и, возможно, компьютерного проектора.