

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Спектроскопия конденсированных сред
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики и техники низких температур
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.Н. Глазков, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и техники низких температур 01.04.2024

## Аннотация

Курс рассчитан на изучение слушателями основных спектроскопических методов, применяемых в исследованиях в физике твёрдого тела (в основном при изучении магнитных явлений): нейтронной дифракции, мессбауэровской спектроскопии, магнитооптических методов и методов магнитного резонанса. Обсуждаются физические принципы этих методов, практические реализации экспериментальных установок для их применения и примеры полученных этими методами экспериментальных результатов.

Курс ориентирован на студентов 5 курса (1 год магистратуры) ЛФИ (ФОПФ) МФТИ.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучить различные спектроскопические методы, применяемые в исследованиях конденсированных сред при низких температурах.

### Задачи дисциплины

- Ознакомление с различными спектроскопическими методами, применяемыми в физике конденсированного состояния.

## 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)
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов
ПК-4 Способность применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для решения прикладных инженерно-технических и конструкторско-технологических задач	ПК-4.1 Владеет современными физическими методами теоретического и экспериментального исследования
	ПК-4.3 Способен планировать и проводить испытания на расчетно-теоретических моделях или экспериментальном оборудовании с применением стандартных и специально разработанных инструментальных и (или) программных средств

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- основные спектроскопические методы изучения конденсированных сред.

уметь:

- выбрать оптимальный спектроскопический метод.

владеть:

- методами анализа спектроскопических данных.

### 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. работа
1	Магнитные возбуждения и спиновые волны. Рассеяние нейтронов.	10	10		15
2	Рассеяние света, и различные виды магнитного резонанса.	10	10		15
3	Спиновый гамильтониан и релаксация магнитных возбуждений.	10	10		15
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Магнитные возбуждения и спиновые волны. Рассеяние нейтронов.

Магнитные возбуждения в конденсированных средах. Спиновые волны. Преобразование Холштейна-Примакова.

Спектр спиновых волн. Экспериментальные методы определения параметров спин-волнового спектра.

Рассеяние нейтронов. Основы метода нейтронной дифракции. Взаимодействие нейтронов с веществом: ядерное и магнитное рассеяние, когерентное и некогерентное рассеяние, упругое и неупругое рассеяние.

Примеры постановки эксперимента по нейтронной дифракции. Трёхосный дифрактометр, малоугловое рассеяние, времяпролётная спектрометрия.

Применение метода дифракции нейтронов. Определение кристаллических и магнитных структур, определение спектров квазичастиц в жидком гелии и в твёрдых телах.

Рассеяние света. Рассеяние света на фононах и магнонах (комбинационное рассеяние). Эффект Керра и эффект Фарадея. Применение оптических методов в спектроскопии конденсированных сред.

## 2. Рассеяние света, и различные виды магнитного резонанса.

Мюонный спиновый резонанс и мессбауэровская спектроскопия. Основы методов, примеры постановки эксперимента и применения в физике конденсированных сред.

Спектроскопия магнитного резонанса. Основы теории магнитного резонанса. Спин в магнитном поле (квантовое рассмотрение), прецессия магнитного момента (классическое рассмотрение).

Непрерывный и импульсный магнитный резонанс. Спиновое эхо. Устройство спектрометров магнитного резонанса (ЭПР и ЯМР).

Электронный парамагнитный резонанс изолированных ионов. Эффекты спин-орбитального взаимодействия: анизотропия g-фактора, одноионная анизотропия.

Спиновый гамильтониан.

Релаксация магнитных возбуждений. Классическая теория релаксации прецессии магнитного момента (уравнения Блоха), продольная и поперечная релаксация. Квантовая теория ширины линии ЭПР.

Флуктуационно-диссипативная теорема. Уширение линии ЭПР диполь-дипольными и анизотропными спин-спиновыми взаимодействиями. Обменное сужение линии ЭПР.

## 3. Спиновый гамильтониан и релаксация магнитных возбуждений.

Магнитный резонанс в упорядоченных средах. Антиферромагнитный и ферромагнитный резонанс. Спин-волновой резонанс. Уокеровские моды. Параметрический резонанс

Примеры применения метода магнитного резонанса. Антиферромагнитный в твёрдом гелии-3. Идентификация магнитных фазовых переходов и спиновых структур в антиферромагнетиках. Определение локальной симметрии магнитных ионов в разбавленном парамагнетике.

Изучение низкоэнергетического спектра возбуждений в квантовых магнетиках (спин-щелевых системах).

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

Аудитория, библиотека.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Введение в физику твердого тела [Текст] : учебник для вузов / Ч. Киттель ; пер. под ред. А. А. Гусева. — 2-е изд., стереотип. / перепеч. с изд. 1978 г. — М. : Медиа Стар, 2006. — 792 с.
2. Квантовая теория твердых тел [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ч. Киттель ; пер. с англ. А. А. Гусева. — М. : Наука, 1967. — 491 с.
3. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев «Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп», Москва «Наука», 1972
4. I.A. Zaliznyak and S.-H. Lee. “Magnetic Neutron Scattering.” In Modern Techniques for Characterizing Magnetic Materials, edited by Y. Zhu (Springer, Heidelberg, 2005).

#### Дополнительная литература

1. G. Khitrova, H. M. Gibbs, F. Jahnke, M. Kira, and S. W. Koch. Nonlinear optics of normal-mode-coupling semiconductor microcavities. Rev. Mod. Phys. 71 (5), 1591 (1999).
2. 4. Hui Deng, Hartmut Haug, and Yoshihisa Yamamoto. Exciton-polariton Bose-Einstein condensation. Rev. Mod. Phys. 82, 1489 (2010).

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

Не используются

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

Для осуществления образовательного процесса по дисциплине необходим ноутбук и медиапроектор. В отдельных случаях обучающиеся могут в рамках самостоятельной работы выполнять расчеты в системах Mathematics, Mathlab, Maple и т.п.

#### **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;
- напряжённой 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.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**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 физики и техники низких температур  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** В.Н. Глазков, канд. физ.-мат. наук

## 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)
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов
ПК-4 Способность применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для решения прикладных инженерно-технических и конструкторско-технологических задач	ПК-4.1 Владеет современными физическими методами теоретического и экспериментального исследования
	ПК-4.3 Способен планировать и проводить испытания на расчетно-теоретических моделях или экспериментальном оборудовании с применением стандартных и специально разработанных инструментальных и (или) программных средств

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Спектроскопия конденсированных сред» обучающийся должен:

**знать:**

- основные спектроскопические методы изучения конденсированных сред.

**уметь:**

- выбирать оптимальный спектроскопический метод.

**владеть:**

- методами анализа спектроскопических данных.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

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

1. Магнитные возбуждения в конденсированных средах. Спиновые волны. Преобразование Холштайна-Примакова.
2. Спектр спиновых волн. Экспериментальные методы определения параметров спин-волнового спектра.
3. Рассеяние нейтронов. Основы метода нейтронной дифракции. Взаимодействие нейтронов с веществом: ядерное и магнитное рассеяние, когерентное и некогерентное рассеяние, упругое и неупругое рассеяние.
4. Примеры постановки эксперимента по нейтронной дифракции. Трёхосный дифрактометр, малоугловое рассеяние, времяпролётная спектрометрия.
5. Применение метода дифракции нейтронов. Определение кристаллических и магнитных структур, определение спектров квазичастиц в жидком гелии и в твёрдых телах.
6. Рассеяние света. Рассеяние света на фононах и магнонах (комбинационное рассеяние). Эффект Керра и эффект Фарадея. Применение оптических методов в спектроскопии конденсированных сред.
7. Мюонный спиновый резонанс и мессбауэровская спектроскопия. Основы методов, примеры постановки эксперимента и применения в физике конденсированных сред.
8. Спектроскопия магнитного резонанса. Основы теории магнитного резонанса. Спин в магнитном поле (квантовое рассмотрение), прецессия магнитного момента (классическое рассмотрение).
9. Непрерывный и импульсный магнитный резонанс. Спиновое эхо. Устройство спектрометров магнитного резонанса (ЭПР и ЯМР).
10. Электронный парамагнитный резонанс изолированных ионов. Эффекты спин-орбитального взаимодействия: анизотропия g-фактора, одноионная анизотропия.
11. Спиновый гамильтониан.
12. Релаксация магнитных возбуждений. Классическая теория релаксации прецессии магнитного момента (уравнения Блоха), продольная и поперечная релаксация. Квантовая теория ширины линии ЭПР.
13. Флуктуационно-диссипативная теорема. Уширение линии ЭПР диполь-дипольными и анизотропными спин-спиновыми взаимодействиями. Обменное сужение линии ЭПР.
14. Магнитный резонанс в упорядоченных средах. Антиферромагнитный и ферромагнитный резонанс. Спин-волновой резонанс. Уокеровские моды. Параметрический резонанс
15. Примеры применения метода магнитного резонанса. Антиферромагнитный в твёрдом гелии-3. Идентификация магнитных фазовых переходов и спиновых структур в антиферромагнетиках. Определение локальной симметрии магнитных ионов в разбавленном парамагнетике.
16. Изучение низкоэнергетического спектра возбуждений в квантовых магнетиках (спин-щелевых системах).

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.



1. Рассеяние нейтронов. Основы метода нейтронной дифракции. Взаимодействие нейтронов с веществом: ядерное и магнитное рассеяние, когерентное и некогерентное рассеяние, упругое и неупругое рассеяние.
2. Спектр спиновых волн. Экспериментальные методы определения параметров спин-волнового спектра.

#### Билет 2.

1. Непрерывный и импульсный магнитный резонанс. Спиновое эхо. Устройство спектрометров магнитного резонанса (ЭПР и ЯМР).
2. Магнитные возбуждения в конденсированных средах. Спиновые волны. Преобразование Холштайна-Примакова.

#### Билет 3.

1. Мюонный спиновый резонанс и мессбауэровская спектроскопия. Основы методов, примеры постановки эксперимента и применения в физике конденсированных сред.
2. Спектроскопия магнитного резонанса. Основы теории магнитного резонанса. Спин в магнитном поле (квантовое рассмотрение), прецессия магнитного момента (классическое рассмотрение).

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Экзамен проводится по билетам. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.