

**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>	Магнетизм
<b>по направлению:</b>	Материаловедение и технологии материалов
<b>профиль подготовки:</b>	Перспективные функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра проблем теоретической физики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: И.В. Колоколов, д-р физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем теоретической физики 01.04.2024

## Аннотация

Курс посвящен преимущественно физике магнитоупорядоченных сред: ферро-, ферри - и антиферромагнетиков. Для них определяются элементарные возбуждения (магноны), изучаются статистическая физика магнонного газа и его взаимодействие с внешними полями. В курсе представлен также формализм среднего поля и методы определения его точности. Изложение ведется на примере магнетиков с сильной одноосной анизотропией (модели Изинга; в этом случае подход имеет название метод Вакса-Ларкина-Пикина). Вместе с тем изучаются также задачи, связанные с динамикой изолированных спинов. В частности, эффект Ландау-Зенера и некоторые эффекты, важные для физики ядерного магнитного резонанса.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение физики магнитоупорядоченных сред: ферро-, ферри - и антиферромагнетиков;
- изучение статистической физики магнонного газа и его взаимодействие с внешними полями; формализма среднего поля и методов определения его точности;
- изучение задач, связанных с динамикой изолированных спинов; эффекта Ландау-Зенера и некоторых эффектов, важных для физики ядерного магнитного резонанса.

#### Задачи дисциплины

- познакомить студентов с основными понятиями и идеями в этой области, с постановкой задач и подходами к их решениям. Предполагается, что прослушав этот курс, студенты смогут читать и понимать текущую научную периодику в этой области.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Способен решать исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области материаловедения
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области материаловедения
	ОПК-1.3 Организует, выполняет экспериментальные исследования на современном уровне и анализировать их результаты
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
	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

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные понятия по теме дисциплины.

уметь:

- пользоваться развитыми в рамках дисциплины методами исследования, решать задачи по теме дисциплины.

владеть:

- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

#### 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	Обменное взаимодействие.	1	2		5
2	Магнитодипольное взаимодействие.	2	1		5
3	Доменная структура ферромагнетиков.	3	1		5
4	Магноны в магнетиках.	3	1		5
5	Низкотемпературная термодинамика ферромагнетиков.	3	2		6
6	Взаимодействие магнонов.	3	2		6
7	Магнетики в переменных внешних полях.	3	1		6
8	Магнетики с сильной одноосной анизотропией.	3	1		6
9	Метод функционального интеграла для квантовых магнетиков.	3	1		6
10	Ферромагнетизм в металлах.	3	1		5
11	Магнитные примеси в металлах.	3	2		5
Итого часов		30	15		60
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. Обменное взаимодействие.

Спиновая природа спонтанной намагниченности (замораживание орбитального момента). Гамильтониан Гайзенберга. Магнитоупорядоченные диэлектрики: ферро-, антиферро- и ферримагнетики.

###### 2. Магнитодипольное взаимодействие.

Размагничивающие факторы. Кристаллографическая анизотропия.

###### 3. Доменная структура в ферромагнетиках.

Оценка размеров полосковых доменов.

#### 4. Магноны в магнетиках.

Роль магнитодипольного взаимодействия в низкочастотной части спектра. Магноны в антиферромагнетиках. Оценка квантовых поправок к спонтанной намагниченности при низких температурах.

#### 5. Низкотемпературная термодинамика ферромагнетиков.

Газ невзаимодействующих магнонов. Статические и динамические продольные и поперечные корреляторы и восприимчивости. Расходимости магнонных чисел заполнения в двумерных магнетиках в отсутствие внешнего поля.

#### 6. Взаимодействие магнонов.

Гамильтониан магнон-магнонного взаимодействия в ферромагнетиках (трех - и четырехчастичные слагаемые).

Кинетическое уравнение и оценка магнонных времен релаксации.

#### 7. Магнетики в переменных внешних полях.

Ферромагнитный резонанс и параметрическая неустойчивость магнонов.

#### 8. Магнетики с сильной одноосной анизотропией.

Классическая модель Изинга. Приближение среднего поля и последовательное вычисление поправок к нему для модели Изинга при конечной температуре в ферромагнитной фазе (подход Вакса-Ларкина).

#### 9. Метод функционального интеграла для квантовых магнетиков.

Изложение метода. Примеры применения.

#### 10. Ферромагнетизм в металлах.

Косвенный обмен: РККИ -- цепочка.

#### 11. Магнитные примеси в металлах.

Высшие порядки теории возмущений в кинетике. Эффект Кондо и оценка температуры перехода в непроводящую фазу.

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

Учебная аудитория, доска, при необходимости медиапроектор, экран.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 9, Ч. 2 : Статистическая физика. Теория конденсированного состояния : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Физматлит, 2000-2005 .— 496 с.
2. Флуктационная теория фазовых переходов [Текст]/А. З. Паташинский, В. Л. Покровский, -М., Наука, 1982

3. Теория магнетизма [Текст] =The theory of magnetism, введение в изучение кооперативных явлений/Д. Маттис , -М., Мир, 1967
4. А.Г.Гуревич, Г.А.Мелков, Магнитные колебания и волны, - М.: Наука, 1994.
5. В.С.Львов, Нелинейные спиновые волны, - М.: Наука, 1987.

#### Дополнительная литература

1. Лекции по магнетизму [Текст] : [учебник для вузов] / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер .— [3-е изд., перераб. и доп.] .— М. : Физматлит, 2005 .— 510 с. : ил. - Библиогр.: с. 503-510. - ISBN 5-9221-0577-9 (в пер.).
2. Квантовая теория магнетизма [Текст] = Quantum theory of magnetism/Р. Уайт , -М., Мир, 1985

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

chair.itp.ac.ru

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

Представление материала на доске и/или при помощи медиапроектора. Решение задач по теме дисциплины для развития и проверки знаний и умений. Возможно использование ПО для символьных и/или численных вычислений.

### **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 дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

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

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Материаловедение и технологии материалов
<b>профиль подготовки:</b>	Перспективные функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра проблем теоретической физики (теоргруппа Горькова)
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	И.В. Колоколов, д-р физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-1 Способен решать исследовательские задачи, на основе фундаментальных знаний в области материаловедения и технологии материалов	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области материаловедения
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области материаловедения
	ОПК-1.3 Организует, выполняет экспериментальные исследования на современном уровне и анализировать их результаты
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
	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

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Магнетизм» обучающийся должен:

### знать:

- основные понятия по теме дисциплины.

### уметь:

- пользоваться развитыми в рамках дисциплины методами исследования, решать задачи по теме дисциплины.

### владеть:

- математическим и понятийным аппаратом и методами исследований, составляющими содержание дисциплины.

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

1. Найти магнитную энергию следующей конфигурации: внутри однородно намагниченного шара выделены две непересекающиеся между собой шаровые же области, в которых намагниченность имеет другие направления. Эти направления и размеры областей являются параметрами задачи.
2. Вычислить спектр двухподрешеточного антиферромагнетика при наличии одноосной анизотропии (типа легкая ось) при малых волновых векторах. В чем качественное отличие влияния анизотропии в сравнении с ферромагнетиком?
3. Вычислить зависимость среднего спина на каком-нибудь узле решетки от температуры в антиферромагнетике в спин-волновом приближении.
4. Пусть монополю Полякова- тХофта с нерелятивистской скоростью  $v$  пролетает через ферромагнитную среду. Для  $v \geq v_{\text{стаг}}$ , где  $v_{\text{стаг}}$  – максимальная фазовая скорость магнонов (достигаемая где-то в середине зоны Бриллюэна), оценить потери энергии в единицу времени монополю за счет черенковского излучения магнонов.
5. Оценить вклад в релаксацию ферромагнитной прецессии за счет электромагнитного излучения (в геометрии шара).

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

1. Обменное взаимодействие. Спиновая природа спонтанной намагниченности (замораживание орбитального момента). Гамильтониан Гайзенберга. Магнитоупорядоченные диэлектрики: ферро-, антиферро- и ферримагнетики.
2. Магнитодипольное взаимодействие в ферро- и ферримагнетиках. Размагничивающие факторы. Кристаллографическая анизотропия.
3. Доменная структура в ферромагнетиках. Структура и энергия доменных стенок.
4. Ферромагнитный резонанс
5. Магноны в ферромагнетиках. Роль магнитодипольного взаимодействия в низкочастотной части спектра. Магноны в антиферромагнетиках. Оценка квантовых поправок к спонтанной намагниченности при низких температурах.
6. Низкотемпературная термодинамика ферромагнетиков (газ невзаимодействующих магнонов). Расходимости магнонных чисел заполнения в двумерных магнетиках в отсутствие внешнего поля.
7. Гамильтониан магнон-магнонного взаимодействия в ферромагнетиках (трех- и четырехчастичные слагаемые). Разные области доминантности магнитодипольных и обменных нелинейностей.
8. Кинетическое уравнение и оценка магнонных времен релаксации.
9. Магнетики в переменных внешних полях. Параметрическая неустойчивость.
10. Магнетики с сильной одноосной анизотропией: классическая модель Изинга. Приближение среднего поля и последовательное вычисление поправок к нему для модели Изинга при конечной температуре в ферромагнитной фазе (подход Вакса-Ларкина).
11. Статические корреляции в двумерном гайзенберговском ферромагнетике при низких температурах (двумерная сигма-модель). Стабилизация дальнего порядка магнитодипольным взаимодействием при низких температурах.

##### Примеры экзаменационных билетов

###### Билет 1.

1. Рассмотрим одномерную цепочку спинов величины  $S$  и антиферро-магнитным взаимодействием ближайших соседей. Можно считать, что  $S \gg 1$ . В отсутствие анизотропии квантовые флуктуации разрушают дальний порядок уже в основном состоянии. Сильная одноосная анизотропия должна привести к Неелевскому упорядочению при нулевой температуре. Проверить это утверждение и оценить значение параметра  $D$ , при котором квантовые флуктуации становятся несущественными.

###### Билет 2.

1. Рассмотрим  $d$ -мерный ферромагнетик в состоянии, когда все спины поляризованы против оси  $z$ , и только спин в точке  $\mathbf{r} = 0$  поляризован против оси  $z$ . Такое нестационарное состояние будет эволюционировать со временем. Найти среднее значение  $z$ -проекции спина в точке  $\mathbf{r} = 0$  как функцию времени.

###### Билет 3.

1. Вычислить магнонный вклад в теплоемкость в ферро- и антиферромагнетике при низких температурах.

###### Билет 4.

1. Вычислить затухание длинноволновых ( $ka \ll 1$ ) магнонов за счет трехчастичных процессов слияния. Угол между волновым вектором и намагниченностью равен нулю.

###### Билет 5.

1. Найти частоту ферромагнитного резонанса в сфере, намагниченность в которой образует тонкие плоскопараллельные домены (диски).



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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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**

При проведении оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.