

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Б1.В.ДВ.02.02 КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ МАГНЕТИЗМА**

Направление подготовки (специальность) 03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Профиль подготовки (специализация)

Форма обучения очная

Год набора 2024

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

Программу составили  
доцент, к.ф.-м.н. Ю.С.Орлов

## 1 Цели и задачи изучения дисциплины

### 1.1 Цель преподавания дисциплины:

Формирование у студентов понимания природы формирования магнитных свойств в разных классах конденсированных сред, навыков самостоятельного исследования теоретических проблем квантовой теории магнетизма и анализа экспериментальных данных.

### 1.2 Задачи изучения дисциплины:

- формирование представления об особенностях возникновения магнитных свойств в различных материалах;
- изучение теоретических концепций и моделей, описывающих магнитных физику явлений, характерных для различных конденсированных состояний вещества;
- освоение основных понятий и методов теоретического описания актуальных проблем квантовой теории магнетизма;
- развитие умения использовать современные вычислительные методики в области квантовой теории магнетизма

1.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы высшего образования:

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине
ПК-3 Способен разрабатывать и применять новые материалы, исследовать их структуру и свойства	
ПК-3.1 Планирует процессы получения материалов и исследования их свойств	знать особенности возникновения магнитных свойств в различных материалах; уметь создавать математические модели типовых профессиональных задач; владеть основными методами решения задач квантовой теории магнетизма
ПК-3.2 Анализирует перспективные материалы и их нано-, микро-, мезо- и макромасштабные свойства	знать теоретические концепции и модели, описывающие физику магнитных явлений, характерные для различных конденсированных состояний вещества

Дисциплина реализуется без применения ЭО и ДОТ

## 2 Объем дисциплины (модуля)

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад.час)	Семестр
		10
<b>Общая трудоемкость дисциплины</b>	4 (144)	4 (144)
<b>Контактная работа с преподавателем:</b>	1,5 (54)	1,5 (54)
занятия лекционного типа	1 (36)	1 (36)
практические занятия	0,5 (18)	0,5 (18)
<b>Самостоятельная работа обучающихся</b>	1,5 (54)	1,5 (54)
<b>Вид промежуточной аттестации (Экзамен)</b>	36	Экзамен

### 3 Содержание дисциплины (модуля)

№ п/п	Вид работ	Темы занятия	Объем часов	Семестр /курс	Часы в эл. формате
<b>Раздел 1. Основные виды магнитного порядка</b>					
1.	Лек	Обменное взаимодействие. Магнитные свойства изолированного атома. Правило Хунда. Гамильтониан Гейзенберга. Модель Хаббарда.	6	10	
2.	Лек	Природа магнетизма металлов. Спиновый парамагнетизм Паули и орбитальный диамагнетизм Ландау. Магнитные примеси в металле.	4	10	
3.	Пр	Обменное взаимодействие через электроны проводимости (РККИ). Эффект Кондо.	2	10	
4.	Пр	Магнитный порядок. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм. Метод среднего поля для ферромагнетика. Доменная структура. Гистерезис ферромагнетиков.	2	10	
5.	Пр	Спиновые волны (магноны). Квантовые флуктуации и спиновые волны в антиферромагнетике.	2	10	
6.	Пр	Вклад магнонов в термодинамику магнетиков. Динамика магнитного момента в ферромагнетике. Уравнение Ландау—Лифшица.	4	10	
7.	Ср	Самостоятельная работа. Решение индивидуального задания	18	10	
<b>Раздел 2. Магнетизм сильнокоррелированных систем</b>					
1.	Лек	Сильные электронные корреляции. Диэлектрики Мотта-Хаббарда.	4	10	
2.	Лек	Специфика электронной структуры сильно коррелированных систем.	4	10	
3.	Лек	Взаимосвязь изменений магнитного порядка и электронных свойств в модели Хаббарда.	4	10	
4.	Лек	Переход Мотта металл-диэлектрик.	4	10	
5.	Ср	Самостоятельная работа. Решение индивидуального задания.	18	10	
<b>Раздел 3. Низкомерный магнетизм</b>					
1.	Лек	Низкомерный магнетизм. Теорема Мермина-Вагнера.	4	10	
2.	Пр	Основное состояние двумерных и одномерных спиновых систем в моделях Изинга и Гейзенберга. Свойства точно решаемых моделей.	2	10	
3.	Пр	Магнитные наноструктуры ферромагнетик/ нормальный металл. Гигантское магнитосопротивление. Основные идеи спинтроники.	2	10	
4.	Ср	Самостоятельная работа. Решение индивидуальных заданий.	9	10	
<b>Раздел 4. Численно точные методы в квантовой теории магнетизма</b>					
1.	Лек	Точная диагонализация многоэлектронных и спиновых гамильтонианов для малых кластеров.	6	10	
2.	Пр	Кластерная теория возмущений	2	10	
3.	Пр	Квантовый метод Монте Карло	2	10	
4.	Ср	Самостоятельная работа. Подготовка к экзамену.	9	10	
<b>Раздел 5. Экзамен</b>					

1.	Экзам ен	Экзамен	36	10	
----	-------------	---------	----	----	--

#### **4 Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

##### **4.1 Печатные и электронные издания:**

1. Дрокин А. И. Квантовая теория магнетизма. Методические указания по спецкурсу:[в 7-ми ч.]. - Симферополь: СГУ, 1987-1989. - 31 с..

2. Ирхин В. Ю., Ирхин Ю. П. Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d- и f-металлах и их соединениях: монография. - Москва: Институт компьютерных исследований, 2008. - 474 с..

3. Волков Н. В., Попков С. И. Магнетизм твердых тел; диа- и парамагнетизм; магнитный порядок (физика магнитных явлений) [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие [для студентов программ 011200.68.02 «Физика конденсированного состояния вещества»; 011200.68.06 «Физика магнитных явлений»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-885602.pdf>.

4. Изюмов Ю. А., Анисимов В. И. Электронная структура соединений с сильными корреляциями: научное издание. - Москва: Регулярная и хаотическая динамика, 2009. - 375 с..

5. Изюмов Ю. А., Курмаев Э. З. Высокотемпературные сверхпроводники на основе FeAs-соединений: монография. - Москва: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. - 334 с..

6. Волков Н. В., Попков С. И. Обменное взаимодействие. Ферромагнетизм. Приближение молекулярного поля [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие [для студентов программ 011200.68.02 «Физика конденсированного состояния вещества»; 011200.68.06 «Физика магнитных явлений»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-029465.pdf>.

7. Катанин А. А., Ирхин В. Ю., Игошев П. А. Модельные подходы к магнетизму двумерных зонных систем: научное издание. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2013. - 175 с..

8. Мазалова В. Л., Кравцова А. Н., Солдатов А. В. Нанокластеры: рентгеноспектральные исследования и компьютерное моделирование: . - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. - 183 с..

9. Александров К. С., Зиненко В. И., Сорокин Б. П., Турчин П. П., Сорокин П. Б., Бурков С. И., Глушков Д. А., Четвергов Н. А., Софронова С. Н., Токарев Н. А. Теоретическая физика твердого тела [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины. - Красноярск: СФУ, 2007. - on-line – Режим доступа: [http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/ELIB\\_DC/UMKD/i-656895.zip](http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/ELIB_DC/UMKD/i-656895.zip).

10. Овчинников С. Г., Орлов Ю. С. Квантовая теория магнетизма [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы [для студентов напр. 010700.62 «Физика», спец. 010701.65 «Физика», 010704.65 «Физика конденсированного состояния вещества»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-165552.pdf>.

11. Волков Н. В. Физика магнитных явлений. Ферромагнетизм [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов (бакалавров), обучающихся по направлению 03.03.02 (011200.62) "Физика" и 14.03.02 (140800.62) "Ядерная физика и технологии". - Красноярск: СФУ, 2015. - 125 с. – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-401851264.pdf>.

##### **4.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства (программное обеспечение, на которое университет имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение):**

1. Adobe Acrobat Reader DC . Программное обеспечение для просмотра и печати файлов PDF.

2. Microsoft Office Professional Plus 2007 Russian Academic. Офисный пакет Microsoft Office.

3. Microsoft Windows Professional 8 Russian. Операционная система Windows.

#### **4.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:**

1. Поисковая машина электронных книг <http://www.poiskknig.ru>
2. Файловый архив для студентов <http://www.studfiles.ru>
3. Электронно-библиотечная система СФУ <http://bik.sfu-kras.ru/>

#### **5 Фонд оценочных средств**

Фонд оценочных средств является приложением к рабочей программе дисциплины (модуля), хранится на кафедре, обеспечивающей преподавание данной дисциплины (модуля).

#### **6 Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория для проведения лекционных, семинарских и практических занятий: Специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

помещение для самостоятельной работы обучающихся: специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, АРМ обучающихся, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

### **ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

По дисциплине (модулю)/ практике

Б1.В.ДВ.02.02 Квантовая теория магнетизма

Направление подготовки/специальность

03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Образовательная программа

03.05.02.30 Фундаментальная и прикладная физика

Красноярск 2025

**1. Перечень компетенций с указанием индикаторов их достижения, соотнесенных с результатами обучения по дисциплине (модулю), практики и оценочными средствами**

Семестр <sup>1</sup>	Код и содержание индикатора компетенции	Результаты обучения <sup>2</sup>	Оценочные средства <sup>3</sup>
ПК-3: Способен разрабатывать и применять новые материалы, исследовать их структуру и свойства			
10	ПК-3.1: Планирует процессы получения материалов и исследования их свойств	знать особенности возникновения магнитных свойств в различных материалах	Индивидуальное задание  Контрольные вопросы к экзамену
		уметь создавать математические модели типовых профессиональных задач	Индивидуальное задание  Контрольные вопросы к экзамену
		владеть основными методами решения задач квантовой теории магнетизма	Индивидуальное задание  Контрольные вопросы к экзамену
10	ПК-3.2: Анализирует перспективные материалы и их нано-, микро-, мезо- и макромасштабные свойства	знать теоретические концепции и модели, описывающие физику магнитных явлений, характерные для различных конденсированных состояний вещества	Индивидуальное задание  Контрольные вопросы к экзамену

<sup>1</sup> Семестры указываются по порядку, для каждого индикатора

<sup>2</sup> Указываются результаты обучения по дисциплине (модулю), практике, соотнесенные с индикатором достижения компетенции.

<sup>3</sup> Указываются оценочные средства для каждого индикатора.

**2. Типовые оценочные средства или иные материалы, с описанием шкал оценивания и методическими материалами, определяющими процедуру проведения и оценивания достижения результатов обучения**

**Варианты индивидуального задания:**

**Вариант 1**

Найти собственные значения и собственные состояния системы (кластера) из трех спинов  $S = 1/2$ , расположенных а) на одной прямой, и б) в вершинах равнобедренного треугольника, описываемой гамильтонианом  $\hat{H} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} J \vec{S}_i \vec{S}_j$ ,  $J > 0$ . Индексы  $i$  и  $j$  нумеруют узлы, в которых расположены спины.

**Вариант 2**

Найти спектр спиновых волн в модели Гейзенберга в присутствии внешнего магнитного поля.

**Вариант 3**

Рассчитать свободную энергию двумерной модели Изинга. Используя выражение для свободной энергии, показать, что вблизи критической температуры зависимость свободной энергии непрерывна, а теплоемкость расходится логарифмически.

**Вариант 4**

Показать, что длинноволновое представление взаимодействия  $V(\mathbf{q})_{q \rightarrow 0} = V(0) - \alpha q^2$  приводит к экспоненциальному спаду его в координатном представлении.

**Вариант 5**

Исходя из определения механического момента  $\mathbf{M} = [\mathbf{r}, \mathbf{p}]$  и коммутационных соотношений для оператора координаты и импульса  $[p_i, x_j] = -i\hbar \delta_{ij}$ , показать, что  $\mathbf{M} = \hbar \mathbf{S}$ , где  $\mathbf{S}$  - оператор спина с коммутационными соотношениями:  
 $S_i^x S_j^y - S_i^y S_j^x = i\delta_{ij} S_i^z$ ,  $S_i^z S_j^x - S_i^x S_j^z = i\delta_{ij} S_i^y$ ,  $S_i^y S_j^z - S_i^z S_j^y = i\delta_{ij} S_i^x$ .

**Вариант 6**

Найти критическую температуру ферромагнетика из условия бозе-конденсации магнонов и сравнить с критической температурой в приближении среднего поля.

### Вариант 7

Получить тензор магнитной восприимчивости в антиферромагнитной модели Гейзенберга в поле произвольного направления.

### Вариант 8

Найти общее выражение для магнитной восприимчивости ферромагнетика через параметр порядка.

### Вариант 9

Найти критическую температуру в модели Стонера ( $T_c \propto E_F$ ), учитывая температурную зависимость химпотенциала  $\mu = E_F - \pi^2 T^2 / 12 E_F$ .

### Вариант 10

Доказать операторные тождества:

$$\begin{aligned} \exp\{-i\varphi a_{i\sigma}^+ a_{i\sigma}\} a_{i\sigma} \exp\{i\varphi a_{i\sigma}^+ a_{i\sigma}\} &= a_{i\sigma} \exp(i\varphi), \\ \exp\{-i\varphi a_{i\sigma}^+ a_{i\sigma}\} a_{i\sigma}^+ \exp\{i\varphi a_{i\sigma}^+ a_{i\sigma}\} &= a_{i\sigma}^+ \exp(-i\varphi). \end{aligned}$$

### Вариант 11

Преобразовать гамильтониан модели Келдыша-Копаева

$$H = \sum_p \xi_p \{a_p^+ a_p + b_p^+ b_p\} + \sum_{p,p'} U_{pp'} a_p^+ b_p^+ b_{p'} a_{p'}$$

в спиновый гамильтониан в соответствии со спиновой аналогией для сверхпроводников, поставив в соответствие операторы дырок ( $b$ ) и электронов ( $a$ ) матрицам Паули:

$$\begin{aligned} \hat{I} - a_p^+ a_p - b_p^+ b_p &= \sigma^z, \\ b_p^+ a_p^+ &= \frac{1}{2}(\sigma^x - i\sigma^y), \\ a_p b_p &= \frac{1}{2}(\sigma^x + i\sigma^y). \end{aligned}$$

### Пример с решением

Найти собственные значения  $E$  и собственные состояния  $|\psi\rangle$  системы (кластера) из двух спинов  $S = 1/2$ , описываемой гамильтонианом  $\hat{H} = J\vec{S}_f \vec{S}_m$ ,  $J > 0$ . Индексы  $f$  и  $m$  нумеруют узлы, в которых расположены спины.

Решение:

$$\hat{H} = J\vec{S}_f \vec{S}_m = J \left[ S_f^z S_m^z + \frac{1}{2}(S_f^+ S_m^- + S_f^- S_m^+) \right].$$

$$S^+ |S, M\rangle = \sqrt{(S-M)(S+M+1)} |S, M+1\rangle,$$

$$S^- |S, M\rangle = \sqrt{(S+M)(S-M+1)} |S, M-1\rangle,$$

$$S^z |S, M\rangle = M |S, M\rangle,$$

$$\bar{S}^2 |S, M\rangle = S(S+1) |S, M\rangle$$

Возможные состояния системы:

$$|\uparrow_f \uparrow_m\rangle = |\uparrow_f\rangle |\uparrow_m\rangle,$$

$$|\downarrow_f \downarrow_m\rangle = |\downarrow_f\rangle |\downarrow_m\rangle,$$

$$|\uparrow_f \downarrow_m\rangle = |\uparrow_f\rangle |\downarrow_m\rangle,$$

$$|\downarrow_f \uparrow_m\rangle = |\downarrow_f\rangle |\uparrow_m\rangle.$$

В базисе этих состояний  $\hat{H}$  имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{4}J & & & \\ & \frac{1}{4}J & & \\ & & -\frac{1}{4}J & \frac{1}{2}J \\ & & \frac{1}{2}J & -\frac{1}{4}J \end{bmatrix}$$

В результате диагонализации, находим:

$$E_1 = E_2 = E_3 = \frac{1}{4}J, |\psi_1\rangle = |\uparrow_f \uparrow_m\rangle, |\psi_2\rangle = |\downarrow_f \downarrow_m\rangle, |\psi_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_f \downarrow_m\rangle + |\downarrow_f \uparrow_m\rangle),$$

$$E_0 = -\frac{3}{4}J, |\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_f \downarrow_m\rangle - |\downarrow_f \uparrow_m\rangle).$$

### Методические рекомендации по решению индивидуального задания:

Каждому студенту выдается одно задание, которое содержит задачу. Задание нужно выполнить самостоятельно и сдать преподавателю во время практических занятий. При решении задачи рекомендуется следовать следующему плану:

1. Изучение теории:

- Ознакомьтесь с основными понятиями и формулами.

2. Постановка задачи:

- Определите, какие параметры и условия вам известны, и что необходимо найти.

3. Анализ задач:

- Разделите задачу на составные части. Определите, какие методы или подходы будут наиболее подходящими для ее решения (например, аналитические методы, численные расчеты).

4. Выбор метода решения:

- Решая задачу, выбирайте подходящие математические модели, которые лучше всего подходят для вашей проблемы.

5. Проведение расчетов:

- При выполнении численных вычислений следите за правильностью подстановок и вычислений. Используйте программное обеспечение для численных методов, если это необходимо.

#### 6. Анализ результатов:

- После получения результатов обязательно проанализируйте их физический смысл. Сравните свои результаты с теоретическими ожиданиями, если это возможно.

#### 7. Оформление работы:

- Структурируйте вашу работу. Используйте графики и таблицы для наглядности, если это необходимо.

#### 8. Проверка и редактирование:

- Внимательно проверьте свою работу на наличие ошибок и опечаток. Убедитесь, что вы четко и логично донесли свои мысли.

#### 10. Соблюдение сроков:

- Планируйте время на выполнение задания, чтобы успеть вовремя сдать его и иметь возможность внести правки при необходимости.

### **Критерии оценки индивидуальных заданий:**

Оценка «**отлично**» выставляется студенту, если решено не менее 90% объема задания, последовательность изложения решения логически стройная и дополнена комментариями, но при этом могут быть допущены незначительные ошибки.

Оценка «**хорошо**» выставляется студенту, если решено не менее 75% объема задания, последовательность изложения решения логически стройная, не допускаются существенных неточностей, правильно применяются теоретические положения.

Оценка «**удовлетворительно**» выставляется студенту, если решено не менее 50% задания, при этом может быть нарушена логическая последовательность изложения решения, допускаются неточности и недостаточно правильные формулировки.

Оценка «**неудовлетворительно**» выставляется студенту, если решено менее 50% задания, допущены существенные ошибки.

### **Контрольные вопросы к экзамену:**

1. Основные виды магнитного упорядочения.
2. Обменное взаимодействие. Правило Хунда.
3. Модель Гейзенберга.
4. Базовые модели квантовой теории магнетизма.
5. Ферромагнетизм в модели Гейзенберга. Основное состояние и спектр спиновых волн.
6. Термодинамика ферромагнитного состояния в модели Гейзенберга.
7. Антиферромагнетизм в модели Гейзенберга. Основное состояние и спектр спиновых волн.
8. Зонная теория магнетизма в проводящих магнетиках.

9. S-d обменная модель Шубина-Вонсовского.
10. Модель Хаббарда. Зонный и атомный пределы. Переход диэлектрик-металл в модели Хаббарда.
11. Магнитные свойства модели Хаббарда.
12. Косвенный обмен Крамерса-Андерсона в p-d модели.
13. Теорема Мермина-Вагнера.
14. Фрустрации в антиферромагнетиках.
15. Природа гигантского магнитосопротивления в наноструктурах ферромагнетик/нормальный металл.
16. Квантовый метод Монте Карло
17. Кластерная теория возмущений.

### **Методические рекомендации по проведению экзамена:**

Экзамен является заключительным этапом изучения учебной дисциплины. Форма проведения экзамена - устный опрос по билетам. В билет включаются два теоретических вопроса из разных разделов программы.

### **Критерии оценивания студентов на экзамене:**

Оценка «**отлично**» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал разнообразных литературных источников, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.

Оценка «**хорошо**» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

Оценка «**удовлетворительно**» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.

Оценка «**неудовлетворительно**» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы.

Разработчик

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ю.С. Орлов', written in a cursive style.

Ю.С. Орлов