

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна
Должность: проректор по образовательной деятельности
Дата подписания: 21.08.2025 10:37:47
Уникальный программный ключ:
6cb002877b2a1ea640fdebb0cc541e4e05322d13

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»



Утверждаю:

Руководитель ООП

А.В. Солнышкин

«24» июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины (с аннотацией)

Магнетизм в конденсированных средах

Направление подготовки

03.04.02 Физика

Направленность (профиль)

Физика конденсированного состояния вещества

Для студентов

1 курса, очной формы обучения

Составитель: к.ф.-м.н., доцент Карпенков А.Ю.

Тверь, 2025

I. Аннотация

1. Цель и задачи дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование у студентов профессиональных компетенций, обеспечивающих решение задач, связанных с профессиональной и инновационной деятельностью по направлению Физика.

Задачами освоения дисциплины являются:

Усвоение современных полуклассических и квантовых законов ферромагнетизма, основ зонной теории металлов, термодинамического подхода к описанию магнитных явлений, современных экспериментальных методик изучения зонной структуры магнетиков, квантовых осцилляционных эффектов.

Изучение трансформированных основных классических законов магнетизма с учетом микромагнитного подхода.

Углубление представлений о микроскопической природе магнетизма, умение при объяснении экспериментальных особенностей магнитных свойств применять современные модели магнетизма.

2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Магнетизм в конденсированных средах» относится к модулю Физика магнитных явлений Блока 1. Дисциплины части учебного плана, формируемой участниками образовательных отношений.

Логически и содержательно она связана с дисциплинами «Дополнительные главы магнетизма», «Магнетизм редкоземельных соединений», «Магнетизм наноразмерных материалов», «Функциональные магнитные материалы». Физика магнитных явлений тесно связана с такими отраслями современной науки как математика, физическая химия, электроника, компьютерные науки и информационные технологии. Эта дисциплина предполагает знание таких разделов физики как механика, термодинамика, электромагнетизм, квантовая и ядерная физика.

3. Объем дисциплины: 4 зачетных единицы, 144 академических часа, в том числе:

контактная аудиторная работа: лекции 30 часов, практические занятия 30 часов;

самостоятельная работа: 84 часа, в том числе контроль 27 часов.

4. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

<i>Планируемые результаты освоения образовательной программы (формируемые компетенции)</i>	<i>Планируемые результаты обучения по дисциплине</i>
ПК-3. Способен выполнять проектирование и разработку продукции в части, касающейся разработки объемных нанометаллов, сплавов и композитов на их основе, а также выбора расходных и вспомогательных материалов.	ПК-3.1. Формулирует рекомендаций по изменению состава, структуры материалов, а также режимов и способов их обработки на основе анализа моделей, характеризующих связь между эксплуатационными, технологическими и инженерными свойствами и параметрами состава и структуры материала; ПК-3.2. Организует процесс измерения и испытания полученных образцов на контрольном, измерительном и испытательном оборудовании; ПК-3.3. Анализирует результаты испытаний образцов материалов.
ПК-5. Осуществление научного руководства проведением исследований по отдельным задачам.	ПК-5.1. Разрабатывает планы и методические программы проведения исследований и разработок по определенной тематике; ПК-5.2. Систематизирует и изучает научно-техническую информацию по теме исследования. ПК-5.3. Проводит анализ и теоретическое обобщение научных данных в соответствии с задачами исследования.

5. Форма промежуточной аттестации и семестр прохождения

Экзамен в 1 семестре.

6. Язык преподавания: русский.

II. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.

1.Для студентов очной формы обучения

Учебная программа – наименование разделов и тем	Всего (час.)	Контактная работа (час.)				Самостоятельная работа, в том числе Контроль (час.)
		Лекции		Практические занятия		
		всего	в т.ч. ПП	всего	в т.ч. ПП	
1. Физическая природа механизма прямого обменного взаимодействия. Модель Гайтлера -Лондона.	8	2		2		4
2. Обобщение выводов модели Гайтлера -Лондона на систему из N-водородоподобных атомов. Модель Френкеля – Гейзенберга. Критерий ферромагнетизма.	8	2		2		4
3. Физическая природа косвенного обменного взаимодействия в 3d переходных и 4f редкоземельных металлах. Модель Шубина -Вонсовского. Модель Кондорского. Критерии ферромагнетизма в этих моделях.	15	4		4		7
4. Физическая природа косвенного обменного взаимодействия в магнитодиэлектриках. Суперобмен. Модель Крамерса -Андерсона. Критерий ферромагнетизма.	8	2		2		4
5. Основы зонной теории ферромагнетизма. Критерий ферромагнетизма в зонной теории.	8	2		2		4
6. Особенности зонной структуры и поверхностей Ферми 3d- и 4f- металлов. Методы расчета электронных энергетических спектров (зонной структуры). Метод ячеек Вигнера-Зейтца, метод ППВ, ОПВ, метод функций Грина, метод псевдопотенциалов.	10	4		4		6
7. Основы теории внутрикристаллического поля. Магнитные свойства ионов в кристаллах. Эффект Яна-Теллера. Замораживание орбитального магнитного момента в 3d – металлах.	8	2		2		4
8. Пара- и диамагнетизм металлов. Уровни Ландау. Парамагнитная восприимчивость Паули. Эффекты Шубникова - Де Гааза и Де Гааза – Ван	8	2		2		4

Альфена.						
9. Низкоэнергетические возбуждения в системе электронных спинов. Теория спиновых волн. Закон Блоха для температурной зависимости намагниченности ферромагнетика.	8	2		2		4
10. Термодинамическая теория ферромагнитного превращения. Метод термодинамических коэффициентов. Фазовые диаграммы для температуры Кюри.	8	2		2		4
11. Термодинамическая теория слабого ферромагнетизма по Дзялошинскому. Явление суперпарамагнетизма.	8	2		2		4
12. Закон Кюри-Вейсса с учетом пространственного квантования магнитного момента для случаев слабого, сильного и промежуточного значений внутрискристаллического поля.	8	2		2		4
13. Экспериментальные методы исследования систем магнитных моментов атомов и атомных ядер.	8	2		2		4
Экзамен	27					27
Итого	144	30		30		84

III. Образовательные технологии

Учебная программа-наименование разделов и тем	Вид занятия	Образовательные технологии
1. Физическая природа механизма прямого обменного взаимодействия. Модель Гайтлера -Лондона.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала</i>
2. Обобщение выводов модели Гайтлера -Лондона на систему из N-водородоподобных атомов. Модель Френкеля – Гейзенберга. Критерий ферромагнетизма.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала</i>
3. Физическая природа косвенного обменного взаимодействия в 3d переходных и 4f редкоземельных металлах. Модель Шубина - Вонсовского. Модель Кондорского. Критерии ферромагнетизма в этих моделях.	<i>Лекции, практические занятия</i>	<i>1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала</i>
4. Физическая природа	<i>Лекции, практические</i>	<i>1.Изложение теоретического</i>

косвенного обменного взаимодействия в магнитодиэлектриках. Суперобмен. Модель Крамерса -Андерсона. Критерий ферромагнетизма.	занятия	материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
5. Основы зонной теории ферромагнетизма. Критерий ферромагнетизма в зонной теории.	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
6. Особенности зонной структуры и поверхностей Ферми 3d- и 4f- металлов. Методы расчета электронных энергетических спектров (зонной структуры). Метод ячеек Вигнера-Зейтца, метод ППВ, ОПВ, метод функций Грина, метод псевдопотенциалов.	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
7. Основы теории внутрикристаллического поля. Магнитные свойства ионов в кристаллах. Эффект Яна-Теллера. Замораживание орбитального магнитного момента в 3d – металлах.	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
8. Пара- и диамагнетизм металлов. Уровни Ландау. Парамагнитная восприимчивость Паули. Эффекты Шубникова - Де Гааза и Де Гааза – Ван Альфена.	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
9. Низкоэнергетические возбуждения в системе электронных спинов. Теория спиновых волн. Закон Блоха для температурной зависимости намагниченности ферромагнетика.	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
10. Термодинамическая теория ферромагнитного превращения. Метод термодинамических коэффициентов. Фазовые диаграммы для температуры Кюри.	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
11. Термодинамическая	Лекции, занятия	практические 1.Изложение теоретического

теория слабого ферромагнетизма по Дзялошинскому. Явление суперпарамагнетизма.	занятия	материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
12. Закон Кюри-Вейсса с учетом пространственного квантования магнитного момента для случаев слабого, сильного и промежуточного значений внутрикристаллического поля.	Лекции, практические занятия	1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала
13. Экспериментальные методы исследования систем магнитных моментов атомов и атомных ядер.	Лекции, практические занятия	1.Изложение теоретического материала (презентация) 2.Решение задач 3.Самостоятельное изучение теоретического материала

IV. Оценочные материалы для проведения текущей и промежуточной аттестации

Форма проведения промежуточного контроля: студенты, освоившие программу курса «Магнетизм в конденсированных средах» могут сдать экзамен по итогам семестровой аттестации согласно «Положению о промежуточной аттестации (экзаменах и зачетах) обучающихся по программам высшего образования ТвГУ» (протокол №11 от 28 апреля 2021 г.).

Для проведения текущей и промежуточной аттестации:

ПК-3. Способен выполнять проектирование и разработку продукции в части, касающейся разработки объемных нанометаллов, сплавов и композитов на их основе, а также выбора расходных и вспомогательных материалов:

ПК-3.1. Формулирует рекомендаций по изменению состава, структуры материалов, а также режимов и способов их обработки на основе анализа моделей, характеризующих связь между эксплуатационными, технологическими и инженерными свойствами и параметрами состава и структуры материала;

ПК-3.2. Организует процесс измерения и испытания полученных образцов на контрольном, измерительном и испытательном оборудовании;

ПК-3.3. Анализирует результаты испытаний образцов материалов.;

Для всех индикаторов одинаковые способ оценки.

Задание:

Провести измерения и проверить асимптотический закон для температурной зависимости спонтанной намагниченности ферромагнетика в области низких ($T \approx 0$ К) и высоких ($T \approx \theta$) температур, используя теорию молекулярного поля Вейсса.

Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

- ответ целостный, верный, теоретически обоснованный. Ключевые понятия и термины полностью раскрыты. Факты и примеры в полном объеме обосновывают выводы –30 баллов;

- теоретическая аргументация неполная или смысл ключевых понятий не объяснен –20 баллов;

- допущены ошибки, приведшие к искажению смысла. терминологический аппарат раскрыт –10 баллов;

- допущены ошибки, свидетельствующие о непонимании темы. Терминологический аппарат не раскрыт –0 баллов;

ПК-5. Осуществление научного руководства проведением исследований по отдельным задачам.

ПК-5.1. Разрабатывает планы и методические программы проведения исследований и разработок по определенной тематике;

ПК-5.2. Систематизирует и изучает научно-техническую информацию по теме исследования.

ПК-5.3. Проводит анализ и теоретическое обобщение научных данных в соответствии с задачами исследования.

Задание: 1. Получить асимптотический закон для температурной зависимости спонтанной намагниченности ферромагнетика в области низких ($T \approx 0$ К) и высоких (T) температур, используя теорию молекулярного поля Вейсса.

2. В теории ферромагнетизма Вонсовского-Зинера принято, что локализованные непарные $3d$ -электроны одного иона «подмагничивают» $4s$ -электроны (электроны проводимости), а эти электроны в свою очередь «подмагничивают» другие ионы. Предположим, что s - d -взаимодействие может быть описано в приближении молекулярного поля и что взаимодействием между $3d$ -электронными оболочками и $4s$ -электронами можно пренебречь. Показать, что если намагниченность ионных остовов подчиняется закону Кюри, то температура Кюри T_c определяется соотношением $T_c = \chi_{пара} C N_w^2$, где $\chi_{пара}$ – паулиевская восприимчивость электронов проводимости, N_w – постоянная молекулярного поля.

3. Показать для простой кубической решетки (в случае двух измерений), что кинетическая энергия свободного электрона в углу первой зоны Бриллюэна в два раза больше, чем в середине бокового ребра зоны.

Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

- ответ целостный, верный, теоретически обоснованный. Ключевые понятия и термины полностью раскрыты. Факты и примеры в полном объеме обосновывают выводы –30 баллов;

- теоретическая аргументация неполная или смысл ключевых понятий не объяснен –20 баллов;

- допущены ошибки, приведшие к искажению смысла. терминологический аппарат раскрыт –10 баллов;

- допущены ошибки, свидетельствующие о непонимании темы. Терминологический аппарат не раскрыт –0 баллов;

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

1) Рекомендуемая литература

а) основная литература:

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 5 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 344 с. — ISBN 978-5-507-49436-1. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/390626>

2. Физика. Электричество и магнетизм. Курс лекций с примерами решения задач : учебное пособие для вузов / Д. Ч. Ким, Н. П. Коновалов, Д. И. Левит, П. Н. Коновалов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 408 с. — ISBN 978-5-507-44381-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/226466>

3. Материаловедение и технология материалов : учебник для вузов / Фетисов Геннадий Павлович [и др.]; Г. П. Фетисов [и др.] ; под редакцией Г. П. Фетисова. - 8-е изд. - Электрон. дан. - Москва : Юрайт, 2024. - 808 с. - (Высшее образование). - URL: <https://urait.ru/bcode/545124>

4. Электричество и магнетизм : учебное пособие / Ш. А. Пиралишвили, Е. В. Шалагина, Н. А. Каляева, Е. А. Попкова. — 2-е изд., доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 160 с. — ISBN 978-5-8114-2430-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/209804>

5. Браун, А. Г. Решение задач по разделам физики "Магнетизм", "Электромагнитные колебания и волны" : учебное пособие / А. Г. Браун, И. Г. Левитина, В. В. Родченкова. — Москва : МАИ, 2022. — 90 с. — ISBN 978-5-4316-1003-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/383108>

б) дополнительная литература:

Пацева Ю. В. Электромагнетизм: лекции по физике / Ю. В. Пацева. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 124 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-4031-9 ; [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=298188>

Музычка А. Ю. Механика и электромагнетизм: тексты лекций по общей физике : лекции / А. Ю. Музычка. - Москва; Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 280 с.

: ил. - (Высшая школа). - ISBN 978-5-4458-9569-5; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=256579>

Кузнецов С. И. Курс физики с примерами решения задач. Ч. II: Электричество и магнетизм. Колебания и волны. - Санкт-Петербург : Лань, 2021. - 416 с. - ISBN 978-5-8114-1718-6. <https://e.lanbook.com/book/168718>

Бирюкова О. В. Физика. Электричество и магнетизм. Задачи с решениями [Электронный ресурс]. - Санкт-Петербург : Лань, 2021. - 180 с. - ISBN 978-5-8114-3164-9. <https://e.lanbook.com/book/169255>

Боровик Е. С. Лекции по магнетизму / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 510 с. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=75475>

Физические свойства материалов: учебное пособие / В. И. Грызунов, Т. И. Грызунова, О. А. Клецова и др. - 2-е изд., стер. - Москва : Флинта, 2015. - 248 с. : схем., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9765-2404-0 ; [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=461082>

2) Программное обеспечение

Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows

Adobe Acrobat Reader

Google Chrome

OpenOffice

Notepad++

Origin 8.1 Sr2

Многофункциональный редактор ONLYOFFICE

VLC media player

3) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1.ЭБС«ZNANIUM.COM» www.znanium.com;

2.ЭБС «Университетская библиотека онлайн» <https://biblioclub.ru/>;

3.ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com>

4) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Научная электронная библиотека eLibrary.ru;

Электронная база данных диссертаций РГБ;

База данных Реферативных журналов ВИНТИ;

Полнотекстовый доступ к журналам AIP (Американский институт физики);

Полнотекстовый доступ к журналам и книгам издательства Springer Verlag;

Полнотекстовый доступ к отдельным журналам и книгам Института инженеров по электротехнике и электронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers);

Реферативная база Inspec (доступ к рефератам и полным текстам монографий и научных статей в области физики, электротехники, электроники, коммуникаций, компьютерных наук и информационных технологий).

VI. Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины

Примеры задач

Задача 1. Доказать, что в интервале температур $0 < T < \dots$ существует устойчивое термодинамическое равновесие системы элементарных магнитных моментов, соответствующее появлению спонтанной намагниченности (ферромагнитному упорядочению магнитных моментов).

Указание: при решении использовать выводы теории молекулярного поля Вейсса.

Задача 2. Получить асимптотический закон для температурной зависимости спонтанной намагниченности ферромагнетика в области низких ($T \approx 0$ К) и высоких ($T \approx \theta$) температур, используя теорию молекулярного поля Вейсса.

Задача 3. Найдите относительную магнитную восприимчивость идеального газа магнитных моментов при нормальных условиях.

Задача 4. Показать, что магнитная восприимчивость порошка, состоящего из ориентированных произвольным образом кристаллов, описывается формулой

$$\chi = \frac{1}{3}(\chi_1 + \chi_2 + \chi_3),$$

χ_1, χ_2, χ_3 – главные восприимчивости кристалла.

Задача 5. Принимая, что молекулярные поля H_{mA} и H_{mB} двухподрешеточного ферримагнетика при $T = 0$ К равны по величине, показать, что

$$M_A(0)/M_B(0) = (N_{AB} + N_{BB})/(N_{AB} + N_{AA})$$

Найти $M_A(0)/M_B(0)$, если производная $dM/dT \rightarrow 0$ по такому же закону, что и $T \rightarrow T_{FN}$.

Задача 6. Показать, что для парамагнетика, подчиняющегося закону Кюри, разность удельных теплоемкостей при постоянной намагниченности и постоянном поле определяется соотношением $C_I - C_H = -\frac{CH^2}{T^2}$, где C – постоянная Кюри.

Задача 7. Используя теорию Ланжевена показать, что выражение для дифференциальной магнитной восприимчивости парамагнетика имеет вид:

$$\chi = \frac{dI}{dH} = \left(\frac{N\mu^2}{3kT} \right) \left[1 - \frac{1}{5} \left(\frac{\mu H}{kT} \right)^2 + \dots \right].$$

Задача 8. Рассмотреть парамагнитный газ, состоящий из одинаковых молекул, в предположении, что каждая молекула обладает постоянным магнитным моментом μ и что при наложении магнитного поля H возможны любые ориентации магнитного момента относительно направления поля. Рассчитать намагниченность в общем случае и в том случае, когда выполняется условие $\mu H/kT \ll 1$.

Задача 9. Ромбическая пространственная решетка характеризуется базисными векторами $\vec{a} = 5\vec{i}$, $\vec{b} = 2\vec{j}$, $\vec{c} = \vec{k}$, длины которых выражены в ангстремах. Определить базисные вектора и объем элементарной ячейки обратной решетки.

Задача 10. Векторы элементарных трансляций гексагональной

пространственной решетки равны $\vec{a} = \frac{\sqrt{3}}{2}a\vec{i} + \frac{a}{2}\vec{j}$, $\vec{b} = -\frac{\sqrt{3}}{2}a\vec{i} + \frac{a}{2}\vec{j}$, $\vec{c} = c\vec{k}$. Найти векторы элементарных трансляций обратной решетки A, B, C .

Задача 11. Показать для простой кубической решетки (в случае двух измерений), что кинетическая энергия свободного электрона в углу первой зоны Бриллюэна в два раза больше, чем в середине бокового ребра зоны.

Задача 12. Построить первую зону Бриллюэна для простой прямоугольной решетки (для случая двух измерений), постоянные решетки считать равными a и $b=3a$.

Задача 13. Определить ширину домена в монокристаллической пластине кобальта толщиной $L = 1$ мкм, если ОЛН перпендикулярна поверхности пластинки, а доменная структура имеет вид плоскопараллельных слоев с незамкнутым магнитным потоком. Известно, что $I_{Sco} = 1440 \text{ Гс}$, $\gamma = 8,6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$.

Задача 14. Для железа эффективная ширина 90° -ной доменной границы равна $500 \text{ \AA}$, константа анизотропии $K_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ эрг/см}^3$. Граница расположена в плоскости (001). Рассчитать значение плотности граничной энергии γ .

Задача 15. Определить ширину 180° -ной доменной границы и плотность ее граничной энергии для соединения SmCo_5 . Константа анизотропии при комнатной температуре $K_1 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ эрг/см}^3$, $T_c = 860^\circ\text{C}$, среднее межатомное расстояние $a = 500 \text{ \AA}$.

Задача 16. Показать, что из теории спиновых волн следует невозможность существования двумерной ферромагнитной решетки.

Задача 17. В теории ферромагнетизма Вонсовского-Зинера принято, что локализованные непарные $3d$ -электроны одного иона «подмагничивают» $4s$ -электроны (электроны проводимости), а эти электроны в свою очередь «подмагничивают» другие ионы. Предположим, что s - d -взаимодействие может быть описано в приближении молекулярного поля и что взаимодействием между $3d$ -электронными оболочками и $4s$ -электронами можно пренебречь.

Показать, что если намагниченность ионных остовов подчиняется закону Кюри, то температура Кюри T_c определяется соотношением $T_c = \chi_{\text{пара}} C N_w^2$, где $\chi_{\text{пара}}$ — паулиевская восприимчивость электронов проводимости, N_w — постоянная молекулярного поля.

Задача 18. Пусть система состоит из двух частиц, положение которых фиксировано. Каждая частица имеет постоянный магнитный момент, равный μ ; магнитный момент может быть ориентирован только вдоль положительного или отрицательного направлений оси z . Между частицами действуют силы обменного взаимодействия, так что полная энергия системы равна либо $+c$ (когда два момента параллельны), либо $-c$ (когда они антипараллельны), причем $c = \text{const}$. На систему действует внешнее магнитное поле H , направленное вдоль оси z . Чтобы объяснить магнитное поведение некоторого твердого магнетика, примем в качестве его теоретической модели ансамбль систем описанного выше типа, т. е. магнитных частиц. Пусть в единице объема содержится N таких систем. Предполагается, что отдельные системы такого ансамбля не взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой, исключая небольшие взаимодействия, достаточные для установления термодинамического равновесия.

Вывести точную формулу для намагниченности M такого магнетика, находящегося в термодинамическом равновесии при произвольной температуре T в поле с напряженностью H .

Вывести и обсудить приближенные выражения для намагниченности для следующих частных случаев:

- 1) $|\mu H| \ll kT, |c| \ll kT$;
- 2) $|\mu H| \ll kT, |c| \gg kT, c < 0$;
- 3) $|\mu H| \ll kT, |c| \gg kT, c > 0$;
- 4) $|\mu H| \gg kT \gg |c|$;
- 5) $kT \ll \mu H \ll |c|, c < 0$;
- 6) $kT \ll \mu H \ll |c|, c > 0$.

Задача 19. Рассчитать прецессионную угловую скорость магнитного момента атома кобальта, помещенного во внешнее магнитное поле с напряженностью $H=5$ кЭ.

Варианты контрольной работы

ВАРИАНТ 1

1. Найти величину магнитного момента шара радиуса R из материала с магнитной восприимчивостью χ , если шар помещен во внешнее магнитное поле H .
2. Используя представления теории молекулярного поля Вейсса получить асимптотический закон для зависимости $I_s(T)$ ферромагнетика в области низких температур ($T \rightarrow 0K$).

ВАРИАНТ 2

1. Два ферромагнитных образца одинаковой формы из материалов с магнитными восприимчивостями χ_1 и $\chi_2 = \chi_1/3$ достигают магнитного насыщения в одинаковых по величине внешних магнитных полях. Сравните намагниченности насыщения этих образцов.
2. Применяя основные соотношения теории молекулярного поля Вейсса получить асимптотический закон для зависимости $I_s(T)$ ферромагнетика в области высоких температур ($T \rightarrow T_C$).

ВАРИАНТ 3

1. Во внешнем магнитном поле H сферический ферромагнитный образец достигает намагниченности I_0 . Образец сложной формы из такого же материала в том же поле достигает намагниченности I_N . Определите размагничивающий фактор образца сложной формы.
2. Найдите классическую магнитную восприимчивость парамагнитного газа элементарных магнитных моментов при нормальных условиях.

ВАРИАНТ 4

1. Намагниченность ферромагнитного образца во внешнем магнитном поле $H=25$ А/м достигает значения $I=15$ А/м. Восприимчивость материала образца $\chi=1,3$. Какую форму имеет этот образец?

2. Считая, что суммарные молекулярные поля H_{mA} и H_{mB} двухподрешеточного ферримагнетика при $T \cong 0K$ равны по величине, показать, что отношение намагниченностей магнитных подрешеток

$$\frac{I_A(0)}{I_B(0)} = \frac{\omega_{AB} + \omega_{BB}}{\omega_{AB} + \omega_{AA}}.$$

определяется выражением

Тест по курсу

1. В каком из двух состояний молекулы водорода: синглетном или триплетном теоретически возможно ферромагнитное упорядочение спинов электронов соседних атомов? Критерий ферромагнетизма в модели Гайтлера-Лондона.

2. Запишите критерий ферромагнетизма в модели Френкеля-Гейзенберга.

3. Какой механизм обменного взаимодействия реализуется в 3d-переходных металлах? При каких условиях в них возникает ферромагнетизм?

4. Запишите критерий ферромагнетизма в модели s-f обмена (Шубина-Вонсовского).

5. Какой механизм обменного взаимодействия реализуется в магнитодиэлектриках? К какому характеру упорядочения спинов соседних магнитоактивных ионов приводит этот механизм обмена?

6. В чем состоит смысл эффекта Яна-Теллера?

7. Запишите критерий ферромагнетизма для 3d- переходных металлов (критерий Стонера) в зонной модели

8. Как объясняется существование спонтанной намагниченности в ферромагнетиках в рамках зонной модели?

9. В чем состоит физическая причина существования осцилляционных эффектов: Де Гааза-Ван-Альфена и Шубникова-Де-Гааза? С каким вкладом в

магнитную восприимчивость металлов связаны квантовые осцилляции магнитной восприимчивости и удельного электросопротивления? Чем он отличается от классической парамагнитной восприимчивости?

10. Обоснуйте главное значение теории спиновых волн для объяснения фундаментальных свойств ферромагнетиков.

11. Как зонная теория объясняет причину возникновения запрещенных энергетических зон в электронном спектре твердого тела?

12. Дайте определения решетки Бравэ, ячейки Вигнера-Зейтца, обратной решетки, зоны Бриллюэна.

Контрольные вопросы для экзамена

1. Механизм прямого обменного взаимодействия. Обменная энергия. Модель ферромагнетизма Гайтлера-Лондона.
2. Обобщение модели молекулы водорода на систему N водородоподобных атомов. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Детерминанты Слэтера.
3. Гамильтониан системы электронов и ионов, адиабатическое приближение. Метод Хартри-Фока.
4. Косвенное обменное взаимодействие через электроны проводимости. Модель Шубина-Вонсовского (s - d обменное взаимодействие) и Кондорского (s - f обменное взаимодействие), критерий ферромагнетизма.
5. Косвенное обменное взаимодействие в магнитных диэлектриках. Модель Крамерса-Андерсона.
6. Внутрикристаллическое поле. Эффект Яна-Теллера. Замораживание орбитального магнитного момента.
7. Законы Кюри и Кюри-Вейсса с учетом действия внутрикристаллического поля.
8. Спиновые волны. Закон Блоха для спонтанной намагниченности. Квантование спиновых волн. Закон дисперсии спиновых волн.
9. Особенности строения электронных оболочек и электронных энергетических спектров $3d$ - и $4f$ - металлов. Зонная структура и

- поверхности Ферми 3d- и 4f- металлов. Зонная структура ферромагнитного никеля.
10. Зонная теория ферромагнетизма. Критерий ферромагнетизма 3d- металлов в зонной теории.
 11. Приближение слабой и сильной связи, зоны Бриллюэна. Одноэлектронное приближение.
 12. Пара- и диамагнетизм свободного электронного газа. Уровни Ландау. Квантовые осцилляции магнитной восприимчивости. Эффекты Шубникова-Де Гааза и Де Гааза – Ван Альфена.
 13. Методы расчета электронных энергетических спектров (зонной структуры). Метод ячеек Вигнера-Зейтца, метод ППВ, ОПВ, метод функций Грина, метод псевдопотенциалов.
 14. Определения фазовых переходов первого и второго рода. Привести конкретные примеры характера изменения физических свойств магнетиков в точке магнитного фазового перехода II рода.
 15. Термодинамическая теория ферромагнитного превращения. Метод термодинамических коэффициентов. Фазовые диаграммы для температуры Кюри.
 16. Термодинамическая теория слабого ферромагнетизма по Дзялошинскому.
 17. Спин-переориентационные (магнитные ориентационные) переходы в магнетиках.
 18. Явление суперпарамагнетизма.
 19. Ферромагнитный, ферримагнитный и антиферромагнитный резонансы. Ядерный магнитный резонанс. Спиновое эхо. Эффект Мессбауэра.

Вопросы для самоподготовки

Каковы особенности прямого обменного взаимодействия в ферромагнетиках? Перечислите примеры веществ, магнетизм которых обусловлен прямым обменным взаимодействием.

Сформулируйте в общем виде задачу о поведении магнитоактивного электрона, находящегося во внутрикристаллическом поле. Что такое

адиабатическое приближение? Запишите гамильтониан системы электронов и ионов в приближении независимых электронов.

В чем состоит механизм косвенного обменного взаимодействия? Почему в 3d- переходных металлах и редкоземельных 4f- металлах невозможно прямое обменное взаимодействие между магнитоактивными электронами?

Каковы особенности строения магнитодиэлектриков? Приведите примеры подобных веществ. Опишите схему реализации механизма косвенного обмена через электроны магнитонейтральных ионов.

Приведите критерии ферромагнетизма в моделях Френкеля-Гейзенберга, Шубина-Вонсовского, Крамерса-Андерсона.

Почему ни одна из классических теорий ферромагнетизма не раскрывает физической природы существования самопроизвольной намагниченности в ферромагнетиках?

Как зонная теория ферромагнетизма объясняет появление самопроизвольной намагниченности в ферромагнетиках? Приведите критерий ферромагнетизма зонной теории. Как выводы этой теории согласуются с экспериментальными данными по исследованию зонной структуры 3d- металлов?

В чем состоит физическая природа внутрикристаллического поля? Как свойства симметрии кристаллической решетки влияют на проявление магнитных свойств ферромагнетиков? Объясните качественно как представления о внутрикристаллическом поле объясняют явление магнитокристаллической анизотропии.

Какова природа «замораживания» магнитного момента в атомах 3d- переходных металлов? Как влияет симметрия ионов ближайшего окружения на энергетический спектр магнитоактивного иона? В чем проявляется эффект Яна-Теллера? Что такое дублеты Крамерса?

Почему парамагнитная восприимчивость металлов реально гораздо меньше ее значения, рассчитанного на основании закона Кюри-Вейсса? Как зонная теория о поведении газа свободных электронов в магнитном поле объясняет эту особенность? Что такое магнитная восприимчивость Паули?

Объясните физическую природу возникновения уровней Ландау в энергетическом спектре металлов. Чем определяется величина диамагнитной восприимчивости металлов?

Какой эффект доказывает существование уровней Ландау? Что такое квантовые осцилляции диамагнитной восприимчивости металлов?

Какие преимущества по сравнению с классической теорией ферромагнетизма Вейсса дает представление о спиновых волнах? Что такое спиновые волны? Запишите закон дисперсии спиновых волн.

В какой области температур выполняется закон Блоха для температурной зависимости намагниченности ферромагнетика? Сформулируйте закон Блоха.

Дайте определения фазовых переходов первого и второго рода согласно классификации Эренфеста. Как оценить из этих представлений переход из магнитоупорядоченного в парамагнитное состояние?

Получите в рамках термодинамической теории закон, аналогичный закону Кюри-Вейсса для намагниченности ферромагнетика, укажите границы его применимости.

В чем суть метода термодинамических коэффициентов? Как его применить для описания поведения намагниченности как функции температуры?

Какие вещества являются слабыми ферромагнетиками? В чем заключаются особенности их магнитной структуры? Какие представления внес Дзялошинский в термодинамическую теорию для описания свойств слабых ферромагнетиков?

В чем состоит явление суперпарамагнетизма? В каких реальных объектах оно явно проявляется? Как описывается намагниченность суперпарамагнетиков?

На чем основаны явления ферро-, ферри-, антиферромагнитного резонанса? Что такое ядерный магнитный и электронный парамагнитный резонансы? Какие экспериментальные данные о магнитной структуре вещества можно получить, применяя перечисленные методы.

VII. Материально-техническое обеспечение

Учебно-научная лабора-	1. Лабораторные электронные	Kaspersky Endpoint
------------------------	-----------------------------	--------------------

тория магнитных и элек-трических измерений № 40 (170002 Тверская обл., г. Тверь, Садовый пер., д. 35)	весы с гирей M-ER 122ACF JR- 600.01 LCD 2. Вольтметр АКИП-2101 3. Вольтметр АКИП-2101 4. Источник питания с опцией интерфейса USB АКИП-1141 5. Источник питания с опцией интерфейса USB АКИП-1141 6. Компьютер iRU Corp 510 I5- 2400/4096/500/G210-512/DVD- RW/W7S 7. Компьютер с монитором 940N Core 6550 Box/Asus P5KSE/2*1024DDRII/160/7200/DV DRW/ 8. Экран настенный ScreenMedia 153*203 9. Мультиметр цифровой высокой точности UT804 10. Установка импульсного намагничивания "Мишень" 11. Мультиметр цифровой высокой точности UT804 (2 шт.) 12. Электромагнит (3 шт.) 13. Электромагнит ЭМ-1 14. Осциллограф С-1-68 15. Ферротестер 16. Блок питания Б5-9 17. Вольтметр В7-27А (2 шт.) 18. Генератор ГЗ-102 (3 шт.) 19. Источник питания Б-5-8 (2 шт) 20. Осциллограф С-1-65 21. Генератор ГЗ-34 (2 шт.) 22. Блок питания Б-5-21 23. Микровеберметр Ф-190 24. Проектор BenQ MP777 25. Блок питания 26. Вольтметр В-7-23 27. Генератор ГЗ-109 28. Генератор Ф-578 29. Источник питания Б-5-21	Security 10 для Windows Adobe Acrobat Reader Google Chrome OpenOffice Notepad++ Origin 8.1 Sr2 Многофункциональный редактор ONLYOFFICE VLC media player
---	--	---

VIII. Сведения об обновлении рабочей программы дисциплины

№ п.п.	Обновленный раздел рабочей программы дисциплины	Описание внесенных изменений	Реквизиты документа, утвердившего изменения
1.			
2.			