

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт естественных наук и математики

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
А.В. Германенко
« 20 » г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Перечень сведений о рабочей программе дисциплины	Учетные данные
Программа аспирантуры Физика магнитных явлений	Код ПА 1.3.12.
Группа специальностей Физические науки	Код 1.3.
Федеральные государственные требования (ФГТ)	Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951
Самостоятельно утвержденные требования (СУТ)	Приказ «О введении в действие «Требований к разработке и реализации программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре УрФУ» №315/03 от 31.03.2022

Екатеринбург
2022 г.

Рабочая программа дисциплины составлена авторами:

№ п/п	ФИО	Ученая степень, ученое звание	Должность	Структурное подразделение
1	Васьковский Владимир Олегович	д.ф.-м.н., профессор	Зав. кафедрой	Кафедра магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики
2	Москвин Александр Сергеевич	д.ф.-м.н., профессор	профессор	Кафедра теоретической и математической физики Института естественных наук и математики
3	Барташевич Михаил Иванович	д.ф.-м.н., с.н.с.	профессор	Кафедра магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики

Рекомендовано:

Учебно-методическим советом института естественных наук и математики

Председатель учебно-методического совета ИЕНиМ
Протокол № 5 от 17.05.2022 г.



Е.С. Буянова

Согласовано:

Начальник ОПНПК



Е.А. Бутрина

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

1.1. Аннотация содержания дисциплины

Целью дисциплины «Физика магнитных явлений» является приобретение основных профессиональных компетенций в ходе углубленного изучения базовых положений теории магнетизма конденсированного состояния, вопросов квазистатического и динамического перемагничивания магнитоупорядоченных сред, магнитоэлектрических, магнитооптических, магнитотепловых и других явлений, сопутствующих магнитному упорядочению, принципов и технологий прогнозирования и оптимизации функциональных свойств магнитных материалов и наноматериалов.

1.2. Язык реализации дисциплины - русский

1.3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Дисциплина «Физика магнитных явлений» относится к базовой части программы аспирантуры, направлена на подготовку к сдаче кандидатского минимума по научной специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- физику магнитных явлений и процессов в металлах и непроводящих магнетиках в кристаллическом, аморфном и низкоразмерном состояниях в зависимости от химического состава, структурного состояния, температуры и давления;
- возможности основных методов вычислительной физики, используемых для исследования магнитоупорядоченного состояния (теория функционала плотности, метод молекулярной динамики, методы микромагнитного моделирования)
- особенности и механизмы формирования немагнитных физических свойств (механических, электрических, оптических, тепловых), свойственные магнитоупорядоченным веществам;
- основы технических и технологических приложений физики магнитных материалов.

Уметь:

- разрабатывать физические и компьютерные модели прогнозирования изменения магнитных и сопутствующих им свойств конденсированных веществ при вариации магнитного поля, температуры и давления;
- развивать экспериментальные методы изучения физических свойств и физические основы промышленных технологий получения магнитных материалов с определенными свойствами;
- анализировать и представлять научные результаты в форме докладов и статей.

Владеть (демонстрировать навыки и опыт деятельности):

- навыками работы с научной литературой и базами данных с целью определения направления исследования и решения специализированных задач;
- навыками научной коммуникации;
- методами экспериментального и теоретического исследования элементного и фазового составов, структурного состояния и магнитных свойств конденсированных веществ, в том числе в экстремальных условиях;

- физико-технологическими приёмами и компьютерными технологиями прогнозирования и оптимизации функциональных свойств магнитных материалов и изделий из них.

1.4. Объем дисциплины

№ п/п	Виды учебной работы	Объем дисциплины		Распределение объема дисциплины по семестрам (час.)
		Всего часов	В т.ч. контактная работа (час.)*	6
1.	Аудиторные занятия	4	4	4
2.	Лекции	4	4	4
3.	Практические занятия	0	0	0
4.	Самостоятельная работа аспирантов, включая все виды текущей аттестации	104	1	104
5.	Промежуточная аттестация	Экзамен	1	Экзамен, 18
6.	Общий объем по учебному плану, час.	108	5	108
7.	Общий объем по учебному плану, з.е.	3		3

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Код раздела, темы	Раздел, тема дисциплины*	Содержание
1	Введение. Термодинамика магнитных явлений. <i>Лекции 2 часа; самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Исторические аспекты магнетизма, его фундаментальное и прикладное значение. Изменение магнитного состояния при изменении температуры, давления и магнитного поля. Удельные теплоемкости при постоянном поле и при постоянной намагниченности. Скачок теплоемкости в точке Кюри. Аномалия коэффициента расширения ферромагнетиков.
2	Атомный магнетизм. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Магнитные моменты атомов и молекул. Магнетон Бора. Магнитные моменты ядер. Строение электронных оболочек переходных и редкоземельных атомов. Диамагнетизм.
3	Парамагнетизм локализованных магнитных моментов. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Пространственное квантование магнитного момента атома. Парамагнетизм систем слабозаимодействующих атомов. Функции Бриллюэна. Закон Кюри и Кюри-Вейсса. Внутрикристаллическое поле. Замораживание орбитального момента. Получение сверхнизких температур адиабатическим размагничиванием

4	Магнитное упорядочение. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Обменная энергия. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Спиновые волны. Температурная зависимость спонтанной намагниченности при низких температурах.
5	Обменное взаимодействие. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Косвенное и прямое обменное взаимодействие в магнитных диэлектриках. Косвенное обменное взаимодействие через электроны проводимости в редкоземельных металлах. Косвенное обменное взаимодействие в магнитных полупроводниках (EuO, Cd Cr ₂ Se ₄ и др.) через электроны проводимости.
6	Зонная модель. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Гамильтониан системы электронов и ионов. Приближения модели. Адиабатическое приближение. Метод Хартри-Фока. Приближение слабой и сильной связи. Зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми. Методы расчета зонной структуры, метод присоединенных плоских волн. Псевдопотенциалы. Поверхности Ферми <i>d</i> и <i>f</i> металлов. Различные типы обменных интегралов.
7	Магнетизм электронного газа. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 7 часов.</i>	Электронный газ. Парамагнетизм и диамагнетизм электронного газа. Критерий ферромагнетизма электронного газа. Обменное расщепление. Полярная модель Шубина-Вонковского. Модель Хаббарда для невырожденной зоны.
8	Поверхность Ферми. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Уровни Ландау. Осцилляция магнитной восприимчивости. Эффекты Эйнштейна – де Гааза и Шубникова. Циклотронный резонанс. Восстановление поверхности Ферми по экспериментальным данным, полученным при изучении этих эффектов.
9	Магнетизм примесей. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Примесные уровни и их влияние на энергетический спектр. Распределение зарядовой и спиновой плотности вокруг примеси. Магнитная восприимчивость разбавленных растворов.
10	Магнитные структуры. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Виды магнитных структур: ферромагнетики, неколлинеарные ферромагнетики, коллинеарные антиферромагнетики, гелимагнетики, ферримагнетики, спиновые стекла и их магнитные характеристики. Метод нейтронографии. Параметры веществ с указанными структурами.
11	Анизотропия свойств ферромагнетиков. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 6 часов.</i>	Источники и механизмы магнитной анизотропии. Константы анизотропии и методы их измерения. Магнитострикция. Анизотропия магнитосопротивления.
12	Доменная структура. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Методы наблюдения доменной структуры. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу. Структура граничного слоя между доменами и его энергия. Доменная структура тонких плёнок. Скирмионы. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.

13	Процессы намагничивания. <i>Самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Процессы намагничивания: смещение доменных границ, вращение намагниченности, парапроцесс. Кривая технического намагничивания. Намагничивание многоподрешёточных магнетиков. Индуцированные магнитные фазовые переходы.
14	Магнитный гистерезис. <i>Лекции 2 часа; самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Феноменологическая теория перемагничивания монокристаллов. Магнитный гистерезис смещения доменных границ. Роль дефектной структуры в формировании коэрцитивной силы. Магнитные материалы.
15	Динамические магнитные явления <i>Самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Динамическая петля гистерезиса. Магнитное последствие. Гигантский магнитный импеданс. Магнитный резонанс. Динамика доменных границ
16	Сопутствующие физические свойства <i>Самостоятельная работа аспиранта, 4 часов.</i>	Гигантское магнитосопротивление. Спинтроника. Магнитооптические явления, Магнитокалорический эффект.

3. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ, САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

3.1. Практические занятия

не предусмотрено

3.2. Примерная тематика самостоятельной работы

3.2.1. Примерный перечень тем рефератов (эссе, творческих работ)

не предусмотрено

3.2.2. Примерная тематика индивидуальных или групповых проектов

не предусмотрено

4. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

4.1. КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Применяются утвержденные на кафедре критерии оценивания достижений аспирантов по каждому контрольно-оценочному мероприятию. Система критериев оценивания опирается на три уровня освоения компонентов компетенций: пороговый, повышенный, высокий.

Компоненты компетенций	Признаки уровня освоения компонентов компетенций		
	пороговый	повышенный	высокий
Знания	Аспирант демонстрирует знание-знакомство, знание-копию: узнает объекты, явления и понятия, находит в них различия, проявляет	Аспирант демонстрирует аналитические знания: уверенно воспроизводит и понимает полученные знания, относит их к той	Аспирант может самостоятельно извлекать новые знания из окружающего мира, творчески их использовать для

	знание источников получения информации, может осуществлять самостоятельно репродуктивные действия над знаниями путем самостоятельного воспроизведения и применения информации.	или иной классификационной группе, самостоятельно систематизирует их, устанавливает взаимосвязи между ними, продуктивно применяет в знакомых ситуациях.	принятия решений в новых и нестандартных ситуациях.
Умения	Аспирант умеет корректно выполнять предписанные действия по инструкции, алгоритму в известной ситуации, самостоятельно выполняет действия по решению типовых задач, требующих выбора из числа известных методов, в предсказуемо изменяющейся ситуации	Аспирант умеет самостоятельно выполнять действия (приемы, операции) по решению нестандартных задач, требующих выбора на основе комбинации известных методов, в непредсказуемо изменяющейся ситуации	Аспирант умеет самостоятельно выполнять действия, связанные с решением исследовательских задач, демонстрирует творческое использование умений (технологий)
Личностные качества	Аспирант имеет низкую мотивацию учебной деятельности, проявляет безразличное, безответственное отношение к учебе, порученному делу	Аспирант имеет выраженную мотивацию учебной деятельности, демонстрирует позитивное отношение к обучению и будущей трудовой деятельности, проявляет активность.	Аспирант имеет развитую мотивацию учебной и трудовой деятельности, проявляет настойчивость и увлеченность, трудолюбие, самостоятельность, творческий подход.

4.2. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

4.2.1. Перечень примерных вопросов для зачета

не предусмотрено

4.2.2. Перечень примерных вопросов для экзамена

Термодинамика магнитных явлений. Изменение магнитного состояния при изменении температуры, давления и магнитного поля. Удельные теплоемкости при постоянном поле и при постоянной намагниченности. Скачок теплоемкости в точке Кюри. Магнетокалорический эффект. Аномалия коэффициента расширения ферромагнетиков.

Атомный магнетизм. Магнитные моменты атомов и молекул. Магнетон Бора. Магнитные моменты ядер. Строение электронных оболочек переходных и редкоземельных атомов. Диамагнетизм.

Парамагнетизм локализованных магнитных моментов. Пространственное квантование магнитного момента атома. Парамагнетизм систем слабовзаимодействующих атомов. Функции Бриллюэна. Закон Кюри и Кюри-Вейсса. Внутрикристаллическое поле. Замораживание орбитального момента. Получение сверхнизких температур адиабатическим размагничиванием

Магнитное упорядочение. Обменная энергия. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Спиновые волны. Температурная зависимость спонтанной намагниченности при низких температурах.

Обменное взаимодействие. Косвенное и прямое обменное взаимодействие в магнитных диэлектриках. Косвенное обменное взаимодействие через электроны проводимости в редкоземельных металлах. Косвенное обменное взаимодействие в магнитных полупроводниках (EuO, CdCr₂Se₄ и др.) через электроны проводимости.

Зонная модель. Гамильтониан системы электронов и ионов. Приближения модели. Адиабатическое приближение. Метод Хартри-Фока. Приближение слабой и сильной связи. Зоны Бриллюэна. Поверхность Ферми. Методы расчета зонной структуры, метод присоединенных плоских волн. Псевдопотенциалы. Поверхности Ферми d и f металлов. Различные типы обменных интегралов.

Магнетизм электронного газа. Электронный газ. Парамагнетизм и диамагнетизм электронного газа. Критерий ферромагнетизма электронного газа. Обменное расщепление. Полярная модель Шубина-Вонсковского. Модель Хаббарда для невырожденной зоны.

Поверхность Ферми. Уровни Ландау. Осцилляция магнитной восприимчивости. Эффекты Эйнштейна – де Гааза и Шубникова. Циклотронный резонанс. Восстановление поверхности Ферми по экспериментальным данным, полученным при изучении этих эффектов.

Магнетизм примесей. Примесные уровни и их влияние на энергетический спектр. Распределение зарядовой и спиновой плотности вокруг примеси. Магнитная восприимчивость разбавленных растворов.

Магнитные структуры. Виды магнитных структур: ферромагнетики, неколлинеарные ферромагнетики, коллинеарные антиферромагнетики, гелимагнетики, ферримагнетики, спиновые стекла и их магнитные характеристики. Метод нейтронографии. Параметры веществ с указанными структурами.

Анизотропия свойств ферромагнетиков. Источники и механизмы магнитной анизотропии. Константы анизотропии и методы их измерения. Магнитострикция. Анизотропия магнитосопротивления.

Доменная структура. Методы наблюдения доменной структуры. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу. Структура граничного слоя между доменами и его энергия. Доменная структура тонких плёнок. Скирмионы. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.

Процессы намагничивания. Процессы намагничивания: смещение доменных границ, вращение намагниченности, парапроцесс. Кривая технического намагничивания. Намагничивание многоподрешёточных магнетиков. Индуцированные магнитные фазовые переходы.

Магнитный гистерезис. Феноменологическая теория перемагничивания монокристаллов. Магнитный гистерезис смещения доменных границ. Роль дефектной структуры в формировании коэрцитивной силы. Магнитные материалы.

Динамические магнитные явления. Динамическая петля гистерезиса. Магнитное последствие. Гигантский магнитный импеданс. Магнитный резонанс. Динамика доменных границ.

Сопутствующие физические свойства. Гигантское магнитосопротивление. Спинтроника. Магнитооптические явления, Магнитокалорический эффект.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1.Рекомендуемая литература

5.1.1. Основная литература

1. Е.С. Боровик В.В., Еременко, А.С. Мильнер. Лекции по магнетизму, М.: Физматлит, 2005, 510 с.
2. Г.С.Кринчик. Физика магнитных явлений. М. :МГУ, 1985, 335 с.
3. Тикадзуми.С. Физика ферромагнетизма, т. 1. Магнитные свойства вещества, М.:Мир, 1983, 302 с.

4. С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма, т. 2. Магнитные характеристики и практическое применение, М.:Мир, 1987, 420 с.
5. Е.З. Мейлихов. Магнетизм. Основы теории. Издательский Дом «Интеллект». 2014, 183 с.
6. В.А. Боков. Физика магнетиков. С-Петербург, 2002, 272 с.
7. К., Fukamichi Itinerant-Electron Metamagnetism, in: Handbook of Advanced Magnetic Materials, v. 2, Springer, Tsinghua University Press, 2006, p. 310 – 371.
8. С.В.Вонсовский. Магнетизм. М.:Наука, 1971, 1032 с.
9. В.И.Ивановский, Л.А.Черникова. Физика магнитных явлений. М. :МГУ, 1981. 288 с.
10. Д.Д.Мишин. Магнитные материалы. М. :Высшая школа, 1991, 385 с.
11. Физика, технологии и техника магнитных материалов. Уч. пособие.-Екатеринбург.: УрГУ, 2010, 245 с.
12. С.В. Иванов, П.С. Мартышко. Избранные главы физики: Магнетизм, магнитный резонанс, фазовые переходы. Курс лекций. :URSS, 2012, 208 с
13. А.А.Бердышева "Введение в квантовую теорию магнетизма" УрГУ, 1992, 276 с.

5.1.2. Дополнительная литература

1. К.П. Белов. Редкоземельные магнетики и их применение, Москва: “Наука”, 1980, 240 с.
2. К.П. Белов, А.К. Звездин, А.М., Кадомцева, Р.З. Левитин Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М.: Наука, 1979, 320 с.
3. С.А. Никитин. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов, Москва: “Изд-во МГУ”, 1989, 248 с.
- 4.С.Крупчика. Физика ферритов. М. :Мир, 1976.
5. Magnetic Phase Transitions. Ed. M. Ausloos, R. J . Elliott.— Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1983. — VII, 269 p.
6. J.J.M. Franse, R.J. Radwanski. Magnetic properties of binary rare-earth 3d-transition metal intermetallic compounds, in: Handbook of Magnetic Materials, ed. K.H.J.Buschow, Elsevier Science B.V., 1993, v.7, p. 307.
7. K.H.J. Buschow, F. de Boer. Physics of Magnetism and Magnetic Materials. Springer. 2004, 190 p.
8. Магнетизм наносителем на основе редкоземельных и 3d-переходных металлов. Под ред. В.О. Васьяковского. Екатеринбург.:УрГУ, 2008, 378.
9. Handbook on Magnetic Materials. Amsterdam: Elsevier Science, V.1-18, 1996 – 2010..
- 10.Ultrathin Magnetic Structures. Springer. 2005, 350 p.
10. Е.И. Кондорский. Зонная теория магнетизма, часть 1. Москва: “Изд-во МГУ”, 1976, 136 с.
11. Е.И. Кондорский. Зонная теория магнетизма, часть 2. Москва: “Изд-во МГУ”, 1977, 94 с.

5.2. Методические разработки

Не используются

5.3. Программное обеспечение

1. Microsoft office (Word, Excel, Power point);
2. Adobe Reader X
3. ChemOffice 2010
4. Isis Draw (Version 2.5)
5. Mercury (Version 2.4.5)
6. AutoDock (Version 1.5)
7. MestReNova (Version 6.0.2)
8. Open Babel (Version 2.3.1)
9. Avogadro (Version 1.0.3)
10. RasMol (Version 2.7.5.2)

11. Jmol (Version 12.0.45)
12. MiKTeX (<https://miktex.org>)

5.4. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

1. ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>;
2. Web of Science: <http://apps.webofknowledge.com>;
3. Scopus: <http://www.scopus.com>;
4. Reaxys: <http://reaxys.com>;
5. SciFinder <https://scifinder.cas.org>
6. Espacenet <https://ru.espacenet.com>
7. РИНЦ <https://www.elibrary.ru>
8. Поисковая система EBSCO Discovery Service <http://lib.urfu.ru/course/view.php?id=141>;
9. Федеральный институт промышленной собственности <http://www1.fips.ru>;

5.5. Электронные образовательные ресурсы

1. Зональная научная библиотека <http://lib.urfu.ru>;
2. Каталоги библиотеки <http://lib.urfu.ru/course/view.php?id=76>;
3. Электронный каталог <http://opac.urfu.ru>;
4. Электронно-библиотечные системы <http://lib.urfu.ru/mod/resource/view.php?id=2330>;
5. Электронные ресурсы свободного доступа <http://lib.urfu.ru/course/view.php?id=75>;
6. Электронные ресурсы по подписке <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=1379>.

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Сведения об оснащённости дисциплины специализированным и лабораторным оборудованием

Уральский федеральный университет имеет специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы и помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования. Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории.

Уральский федеральный университет имеет материально-техническое обеспечение, необходимое для реализации программы аспирантуры, обеспечения дисциплин (модулей), научно-исследовательской работы и практик, в соответствии с требованиями к материально-техническому и учебно-методическому обеспечению направленности программы.