

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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

_____ В.В. Кружаев
«__» _____ 2017 г.

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Перечень сведений о рабочей программе дисциплины	Учетные данные
Образовательная программа Физика магнитных явлений	Код ОП 03.06.01
Направление подготовки Физика и астрономия	Код направления и уровня подготовки 03.06.01
Уровень подготовки Подготовка кадров высшей квалификации	
ФГОС ВО	Реквизиты приказа Минобрнауки РФ об утверждении ФГОС ВО: № 867 от 30.07.2014 г., изменения № 464 от 30.04.2015 г.

СОГЛАСОВАНО
УПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ
КАДРОВ ВЫСШЕЙ
КВАЛИФИКАЦИИ

Екатеринбург 2017

Программа дисциплины составлена авторами:

№	ФИО	Ученая степень, ученое звание	Должность	Кафедра	Подпись
1	В.О. Васьковский	д.ф.-м.н., профессор	Зав. кафедрой	Магнетизма и магнитных наноматериалов	

Рекомендовано Учебно-методическими советами Института естественных наук и математики

Председатель учебно-методического совета ИЕНиМ

Е.С. Буянова

Протокол № 1 от 26.09.2017 г.

Согласовано:

Начальник ОПНПК

О.А. Неволина

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ

Программа дисциплины составлена в соответствии с Федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования

Шифр направления	Название направления/направленности	Реквизиты приказа Министерства образования и науки Российской Федерации об утверждении и вводе в действие ФГОС ВО	
		Дата	Номер приказа
03.06.01	Физика и астрономия/Физика магнитных явлений	от 30.07.2014 г., изменения № 464 от 30.04.2015 г.	867

1.1. Цели дисциплины

Целью дисциплины «Физика магнитных явлений» является приобретение основных профессиональных компетенций в ходе углубленного изучения базовых положений теории магнетизма конденсированных сред, магнитоэлектрических, магнитооптических, магнитотепловых и других явлений, сопутствующих магнитному упорядочению, принципов оптимизации функциональных свойств магнитных материалов и наноматериалов.

1.2. Место дисциплины в структуре учебной деятельности и основной образовательной программы

Дисциплина «Физика магнитных явлений» относится к разделу Б.1 вариативной части ООП направления аспирантуры и направлена на подготовку к сдаче кандидатского минимума.

В результате освоения данной дисциплины студент должен овладеть следующими компетенциями:

универсальные компетенции:

- способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- способностью проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
- готовностью участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3).

общепрофессиональные компетенции:

- способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

- готовностью к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

- профессиональные компетенции:

научно-исследовательская деятельность:

- способность осуществлять сбор, обработку, анализ и систематизацию информации по теме исследования, выбор методов и средств решения задач исследования (ПК-1);
- готовностью использовать современные достижения науки и передовых технологий в научно-исследовательских работах в области физики магнитных явлений (ПК-3).

2. СТРУКТУРА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЧЕБНОГО ВРЕМЕНИ

Наименования дисциплины	Семестр	Объем времени, отведенный на освоение дисциплины						
		Аудиторные занятия час.				Самост. работа-час.	Аттестация по дисциплине (зачет, экзамен)	Всего-час/з.е
		Всего	лекции	практические занятия	лабораторные работы			
Физика магнитных явлений	6	4	4			104	Экзамен, 6 семестр	108/3
Всего на освоение		4	4			104		108/3

3. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Объем и содержание дисциплины

№ п/п	Тема, раздел	Трудоемкость	
		Час.	Зач. ед.
1	Введение. Термодинамика магнитных явлений. 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. Магнетокалорический эффект. Аномалия коэффициента расширения ферромагнетиков.	6	
2	Атомный магнетизм. Магнитные моменты атомов и молекул. Магнетон Бора. Магнитные моменты ядер. Строение электронных оболочек переходных и редкоземельных атомов. Диамагнетизм.	8	
3	Парамагнетизм локализованных магнитных моментов. Пространственное квантование магнитного момента атома. Парамагнетизм систем слабозаимодействующих атомов. Функции Бриллюэна. Закон Кюри и Кюри-Вейсса. Внутрикристаллическое поле.	8	

	Замораживание орбитального момента. Получение сверхнизких температур адиабатическим размагничиванием		
4	Магнитное упорядочение. Обменная энергия. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Спиновые волны. Температурная зависимость спонтанной намагниченности при низких температурах.	8	
5	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, Cd Cr ₂ Se ₄ и др.) через электроны проводимости.	8	
6	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 <i>d</i> и <i>f</i> металлов. Различные типа обменных интегралов.	8	
7	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.	8	
8	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.	8	
9	Магнетизм примесей. Примесные уровни и их влияние на энергетический спектр. Распределение зарядовой и спиновой плотности вокруг примеси. Магнитная восприимчивость разбавленных растворов.	8	
10	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.	8	
11	Анизотропия свойств ферромагнетиков. Анизотропия магнитной энергии. Константы анизотропии и их измерение. Магнитоупругая энергия и её зависимость от направления спонтанной намагниченности и деформации. Магнитострикция. Анизотропия магнитосопротивления. Природа магнитной анизотропии.	8	
12	Доменная структура. Методы наблюдения доменной структуры. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу. Доменная структура вблизи полостей или включений. Цилиндрические магнитные домены. Структура граничного слоя между доменами и его энергия. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.	8	
13	Кривые намагничивания. Процессы намагничивания: смещение	4	

	доменных границ, вращение, парапроцесс. Намагничивание многоподрешёточных магнетиков. Индуцированные магнитные фазовые переходы.		
14	Магнитный гистерезис. Теория кривых намагничивания в монокристаллах в области вращения. Влияние упругих напряжений на намагничивание. Магнитная текстура. Теория магнитного гистерезиса и коэрцитивной силы. Прямоугольная петля гистерезиса. Процессы перемагничивания в тонких пленках. Магнитные материалы.	6	
	ИТОГО	100	3

3.2. Распределение объема учебного времени дисциплины по темам и видам работ

№ пп	Тема, раздел дисциплины	Объем учебного времени, отведенный на освоение дисциплины з/е/час					
		Аудиторные занятия				Самостоят. работа	Всего по разделам и темам
		всего	в т.ч. лекции	В т.ч. семинар/практич. занятия	В т.ч. лаб. раб		
1	Введение. Термодинамика магнитных явлений	2	2			4	6
2	Атомный магнетизм					8	8
3	Парамагнетизм локализованных магнитных моментов					8	8
4	Магнитное упорядочение					8	8
5	Обменное взаимодействие					8	8
6	Зонная модель					8	8
7	Магнетизм электронного газа					8	8
8	Поверхность Ферми					8	8
9	Магнетизм примесей					8	8
10	Магнитные структуры					8	8
11	Анизотропия свойств ферромагнетиков					8	8
12	Доменная структура					6	6
13	Кривые намагничивания					6	6
14	Магнитный гистерезис	2	2			4	4
Итого по дисциплине		4	4			100	104

3.3. Самостоятельная работа аспирантов

Разделы и темы рабочей программы самостоятельного изучения	Перечень заданий для самостоятельной работы (рефераты, доклады, переводы, расчеты, планирование эксперимента и т.п.)	Трудоемкость	
		Час.	Зач. ед.
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.	Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).	4	
Атомный магнетизм. Магнитные моменты атомов и молекул. Магнетон Бора. Магнитные моменты ядер. Строение электронных оболочек переходных и редкоземельных атомов. Диамагнетизм.	Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).	8	
Парамагнетизм локализованных магнитных моментов. Пространственное квантование магнитного момента атома. Парамагнетизм систем слабо взаимодействующих атомов. Функции Бриллюэна. Закон Кюри и Кюри-Вейсса. Внутрикристаллическое поле. Замораживание орбитального момента. Получение сверхнизких температур адиабатическим размагничиванием	Анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (подготовка доклада).	8	
Магнитное упорядочение. Обменная энергия. Модель ферромагнетизма Френкеля-Гейзенберга. Спиновые волны. Температурная зависимость спонтанной намагниченности при низких температурах.	Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).	8	

<p>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, Cd Cr₂ Se₄ и др.) через электроны проводимости.</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).</p>	8	
<p>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 <i>d</i> и <i>f</i> металлов. Различные типы обменных интегралов.</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).</p>	8	
<p>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.</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).</p>	8	
<p>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.</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).</p>	8	
<p>Магнетизм примесей. Примесные уровни и их влияние на энергетический спектр. Распределение зарядовой и спиновой плотности вокруг примеси. Магнитная восприимчивость разбавленных растворов.</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).</p>	8	
<p>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.</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).</p>	8	
<p>Анизотропия свойств ферромагнетиков. Анизотропия магнитной энергии. Константы анизотропии и их измерение. Магнитоупругая энергия и её зависимость от направления спонтанной намагниченности</p>	<p>Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания</p>	8	

и деформации. Магнитострикция. Анизотропия магнитосопротивления. Природа магнитной анизотропии.	дисциплины (написание конспектов).		
Доменная структура. Методы наблюдения доменной структуры. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу. Доменная структура вблизи полостей или включений. Цилиндрические магнитные домены. Структура граничного слоя между доменами и его энергия. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.	Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).	6	
Кривые намагничивания. Процессы намагничивания: смещение доменных границ, вращение, парапроцесс. Намагничивание многоподрешёточных магнетиков. Индуцированные магнитные фазовые переходы.	Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).	6	
Магнитный гистерезис. Теория кривых намагничивания в монокристаллах в области вращения. Влияние упругих напряжений на намагничивание. Магнитная текстура. Теория магнитного гистерезиса и коэрцитивной силы. Прямоугольная петля гистерезиса. Процессы перемагничивания в тонких пленках.	Работа с рекомендованной литературой, анализ реферативных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины (написание конспектов).	4	
ИТОГО		100	

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОЦЕНИВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Объективная оценка уровня соответствия результатов обучения требованиям к освоению ОП обеспечивается системой разработанных критериев (показателей) оценки освоения знаний, сформированности умений и опыта выполнения профессиональных задач.

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 знание источников получения информации, может осуществлять самостоятельно репродуктивные действия над зна-	Аспирант демонстрирует аналитические знания: уверенно воспроизводит и понимает полученные знания, относит их к той или иной классификационной группе, самостоятельно систематизирует их, устанавливает взаимосвязи	Аспирант может самостоятельно извлекать новые знания из окружающего мира, творчески их использовать для принятия решений в новых и нестандартных

	ниями путем самостоятельного воспроизведения и применения информации.	между ними, продуктивно применяет в знакомых ситуациях.	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.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Рекомендуемая литература

5.1.1 Основная литература

1. Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С. Лекции по магнетизму, М.: Физматлит, 2005, 510 с.
2. Боков В.А., Физика магнетиков. С-Петербург, 2002, 272 с.
3. Fukamichi K., Itinerant-Electron Metamagnetism, in: Handbook of Advanced Magnetic Materials, v. 2, Springer, Tsinghua University Press, 2006, p. 310 – 371.
4. С.В.Вонсовский. Магнетизм. М.:Наука, 1971, 1032 с.
5. В.И.Ивановский, Л.А.Черникова. Физика магнитных явлений. М. :МГУ, 1981. 288 с.
6. Г.С.Кринчик. Физика магнитных явлений. М. :МГУ, 1985, 335 с.
7. Тикадзуми.С. Физика ферромагнетизма, т. 1. Магнитные свойства вещества, М.:Мир, 1983, 302 с.
8. Тикадзуми.С. Физика ферромагнетизма, т. 2. Магнитные характеристики и практическое применение, М.:Мир, 1987, 420 с.
9. Д.Д.Мишин. Магнитные материалы. М. :Высшая школа, 1991, 385 с.
10. Физика, технологии и техника магнитных материалов. Уч. пособие.-Екатеринбург.: УрГУ, 2010, 245 с.
11. С.В. Иванов, П.С. Мартышко. Избранные главы физики: Магнетизм, магнитный резонанс, фазовые переходы. Курс лекций. :URSS, 2012, 208 с

5.1.2 Дополнительная литература

1. Белов К.П., Редкоземельные магнетики и их применение, Москва: “Наука”, 1980, 240 с.

2. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках, М.: Наука, 1979, 320 с.
3. Никитин С.А., 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. Franse J.J.M., Radwanski R.J., 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. Buschow K.H.J. и de Boer F. «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.

5.2. Электронные образовательные ресурсы

Все аспиранты имеют полный доступ к перечисленным ресурсам, в т.ч. через авторизованный доступ из сети интернет:

1. Международный индекс научного цитирования Scopus компании Elsevier B.V.
2. Международный индекс научного цитирования Web of Science компании Clarivate Analytics
3. Журналы издательства Wiley
4. Электронная библиотека IEEEEXPLORE Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
5. Журналы American Physical Society (Американского физического общества)
6. Журналы Royal Society of Chemistry (Королевского химического общества)
7. MathSciNET - реферативная база данных American Mathematical Society (Американского математического общества)
8. Патентная база компании QUESTEL
9. Журнал Science Online
10. Журнал Nature
11. Журналы издательства Oxford University Press
12. Журналы издательства SAGE Publication
13. Журналы Американского института физики
14. Журналы Института физики (Великобритания)
15. Журналы Оптического общества Америки
16. Материалы международного общества оптики и фотоники (OSA)
17. Журналы издательства Cambridge University Press
18. Научные журналы по химии Thieme Chemistry Package компании Georg Thieme Verlag KG
19. База данных Annual Reviews Science Collection
20. База данных CASC- Коллекция компьютерных и прикладных наук компании EBSCO Publishing
21. База данных INSPEC на платформе компании EBSCO Publishing
22. База данных Association for Computing Machinery (ACM)
23. База диссертаций ProQuest Dissertations & Theses Global Журнальные базы данных мировой научной информации Freedom Collection компании Elsevier
24. Информационно-аналитическая система управления научными исследованиями Pure компании Elsevier B. V.

25. Наукометрическая база данных Scival компании Elsevier B. V.
26. Аналитическая и информационная база данных REAXYS компании Elsevier,
27. Научные базы данных компании EBSCO Publishing: Business Source Complete и Academic Search Complete, Информационно-поисковая система EBSCO Discovery Service, IEEE All- Society Periodicals Package,
28. Базы данных компании East View,
29. Электронная библиотека диссертаций РГБ;
30. Информационно-аналитическая система FIRA PRO компании ООО«Первое Независимое Рейтинговое Агентство»,
31. Электронная система нормативно-технической документации "Техэксперт" компании КОДЕКС,
32. Базы данных «Интегрум Профи» компании «Интегрум медиа»,
33. Наукометрические базы данных Incites и Journal Citation Report компании Clarivate Analytics,
34. Информационно-аналитическая система SCIENCE INDEX компании «Научная электронная библиотека».

5.3. Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

1. Платформа Springer Link
2. Платформа Nature
3. База данных Springer Materials
4. База данных Springer Protocols
5. База данных zbMath
6. База данных Nano
7. База данных Кембриджского центра структурных данных CSD Enterprise

6. Перечень примерных вопросов к зачету

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 слабозаимодействующих 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, Cd Cr₂ Se₄ 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 присоеди-

ненных плоских волн. Псевдопотенциалы. Поверхности Ферми d и f металлов. Различные типа 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. Анизотропия магнитной энергии. Константы анизотропии и их измерение. Магнитоупругая энергия и её зависимость от направления спонтанной намагниченности и деформации. Магнитострикция. Анизотропия магнитосопротивления. Природа магнитной анизотропии.

Доменная структура. Методы наблюдения доменной структуры. Теория доменной структуры в кристаллах по Ландау и Лифшицу. Доменная структура вблизи полостей или включений. Цилиндрические магнитные домены. Структура граничного слоя между доменами и его энергия. Однодоменные частицы. Критерий однодоменности. Суперпарамагнетизм.

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

Магнитный гистерезис. Теория кривых намагничивания в монокристаллах в области вращения. Влияние упругих напряжений на намагничивание. Магнитная текстура. Теория магнитного гистерезиса и коэрцитивной силы. Прямоугольная петля гистерезиса. Процессы перемагничивания в тонких пленках.