

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения Российской академии наук

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор института  
академик РАН

\_\_\_\_\_ Н.В. Мушников

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

по дисциплине «**Магнетизм твердых тел**»  
специальность **01.04.11 «Физика магнитных явлений»**

Всего учебных часов / зач. ед. – 252 /7

Всего аудиторных занятий, час. – 120

Всего часов на самостоятельную работу аспиранта, час. – 132

Екатеринбург 2019

Рабочая программа составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (далее – ФГОС ВО) по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 Физика и астрономия (Приказ Минобрнауки России от 30 июля 2014 года №867), с изменениями, утвержденными Приказом Минобрнауки России от 30.04.2015 г. №464 «О внесении изменений в федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации)»; программы-минимум кандидатского экзамена по специальности 01.04.11 «Физика магнитных явлений», утвержденной приказом Минобрнауки РФ от 08.10.2007 № 274; паспорта специальности научных работников 01.04.11 «Физика магнитных явлений»; учебного плана аспирантуры ИФМ.

Составитель рабочей программы  
профессор, д.ф.-м.н. А.П. Танкеев

Рабочая программа утверждена на заседании Ученого совета ИФМ.  
Протокол № 9 от 29.05.2019 г.

Председатель Ученого совета ИФМ, академик РАН

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г. \_\_\_\_\_ В.В. Устинов

Согласовано:

Зам. директора по научной работе, д.ф.-м.н.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г. \_\_\_\_\_ М.А. Коротин

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В курсе «Магнетизм твердых тел» изучаются вопросы, связанные с магнитными свойствами твердых тел. Рассматриваются современные представления о парадиа- и ферромагнетизме твердых тел, анализируются различные магнитные структуры и процессы намагничивания ферромагнетиков. Даются основные представления о многоподрешеточных магнетиках: антиферромагнетиках, ферромагнетиках, ферритах и геликоидальных магнетиках. Обсуждаются особенности взаимодействия магнетиков с электромагнитным излучением: ядерном и электронном парамагнитном резонансах, ферро- и антиферромагнитном резонансах, о гамма-резонансе (эффект Мессбауэра). В курс включены разделы о механизмах магнитного упорядочения в металлах и диэлектриках, а также о современных магнитных материалах.

Рабочая программа составлена на основе:

- Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (далее – ФГОС ВО) по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 03.06.01 Физика и астрономия (Приказ Минобрнауки России от 30 июля 2014 года №867), с изменениями, утвержденными Приказом Минобрнауки России от 30.04.2015 г. №464 «О внесении изменений в федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации)»;
- программы-минимум кандидатского экзамена по специальности 01.04.11 «Физика магнитных явлений»;
- паспорта специальности научных работников специальности 01.04.11 «Физика магнитных явлений»;
- учебного плана ИФМ по основной образовательной программе послевузовского профессионального образования (аспирантура) по специальности 01.04.11 «Физика магнитных явлений».

## 2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ

### 2.1. Распределение часов учебных.

Вид занятий	Количество часов
Лекции	120
Самостоятельная работа	132
ИТОГО	252

### 2.2. Содержание дисциплины

#### 2.2.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий

Темы лекционных занятий	Содержание	Объем в часах
Основные положения.	Магнитные свойства электронной оболочки	14

<p>Термодинамика магнитных явлений. Магнитная восприимчивость и намагниченность</p>	<p>атома. Природа элементарных магнитных моментов. Классификация веществ по их магнитным свойствам. Теорема Бора-ван Левен-Терлецкого. Магнето-термические и магнето-калорические соот-ношения. Теплоемкость. Особенности термодинамического поведения классических диамагнетиков и парамагнетиков. Адиабатическое размагничивание и получение низких температур. Макроскопические характеристики магнитных свойств вещества: магнитная восприимчивость, про-ницаемость и намагниченность, методы измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных тел и тел с большой восприимчивостью.</p>	
<p>Слабомагнитные вещества. Парамагнетизм. Диамагнетизм.</p>	<p>Парамагнетизм атомов, ионов и молекул. Классическая теория Ланжевена. Пространственное квантование магнитного момента атома. Парамагнетизм систем слабо взаимодействующих атомов. Функция Бриллюена. Парамагнетизм электронов проводимости в металлах и полупроводниках. Магнитные свойства ионов переходных элементов и влияние поля кристаллической решетки. Ионы группы железа. Расщепление в кристаллическом поле. «Замораживание» орбитального момента периодическим потенциалом решетки. Ядерный парамагнетизм. Электронный спиновый и ядерный магнитный резонансы. Диамагнитная восприимчивость атомов, ионов и молекул. Спектр электронов проводимости в квантующем магнитном поле. Диамагнетизм Ландау. Эффект де Газа-ван Альфена.</p>	12
<p>Магнитоупорядоченные вещества. Упорядоченные магнитные структуры Ферромагнитный порядок</p>	<p>Типы магнитных структур: ферромагнетики, неколлинеарные ферромагнетики, коллинеарные антиферромагнетики, соизмеримые и несоизмеримые магнитные структуры, гелимагнетики, спиновые стекла и их магнитные характеристики. Магнитные подрешетки и их локальные намагниченности. Магнитная нейтронография. Особенности материальных параметров веществ с указанными структурами. Основные опытные факты и формальная теория Вейсса. Точка Кюри и магнитная восприимчивость ферромагнетиков. Природа ферромагнитного состояния. Прямое обменное</p>	14

	<p>взаимодействие Гейзенберга. Косвенное обменное взаимодействие. Полная энергия ферромагнетика (обменная энергия, энергия магнитной кристаллической анизотропии, магнитостатическая энергия, энергия магнито-стрикции, энергия взаимодействия ферромагнетика с внешним магнитным полем.). Квантование коле-баний намагниченности. Спиновые волны, магноны. Температурная зависимость спонтанной намагни-ченности и магнитной части теплоемкости. Неуп-ругое рассеяние нейтронов на спиновых волнах.</p>	
<p>Ферримагнетики. Антиферромагнетики.</p>	<p>Магнитная структура, точки Кюри и компенсации. Магнитная восприимчивость ферримагнетиков. Спиновые волны. Ферриты со структурой шпинели и граната. Гексагональные ферриты.</p> <p>Магнитная структура антиферромагнетиков: ром-бические, тетрагональные, тригональные, гекса-гональные и кубические кристаллы. Анти-ферромагнетизм кристаллов без центра инверсии. Теория антиферромагнетизма в приближении моле-кулярного поля, Точка Нееля. Продольная и попе-речная восприимчивость. Термодинамическая теория слабого ферромагнетизма по Дзялошинскому. Маг-ноны в антиферромагнетиках. Магнитная (спин-волновая) часть теплоемкости и температурно-зависимая часть магнитной восприимчивости анти-ферромагнетика.</p> <p>Магнитэлектрический эффект: связь между магнитным упорядочением и спонтанной электрической поляризацией.</p>	12
<p>Основы теории магнит-ных превращений. Ферромагнетизм и до-менная структура крис-таллов</p>	<p>Термодинамическая теория ферромагнитного превращения. Критические индексы. Магнитные фа-зовые переходы первого рода. Магнитные переходы типа спиновой переориентации, вызванные сильным магнитным полем и изменениями температуры.</p> <p>Гипотеза ферромагнитных доменов, причины появ-ления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля). Тонкая структура доменных границ. Кривая тех-нического намагничивания. Переход от массивных образцов к тонким кристаллам. Одномерные и дву-мерные микромагнитные структуры в тонких плен-ках. Критические размеры однодоменности. Дина-мические эффекты доменной структуры ферро-магнетиков.</p>	14

<p>Динамика процессов перемагничивания. Ферро – и антиферромагнетики в переменных полях. Нелинейные динамические явления в магнетиках.</p>	<p>Уравнения движения намагниченности Ландау-Лифшица и Гильберта. Ферромагнитный, ферри-магнитный и антиферромагнитный резонансы. Ме-тодика и техника резонанса на сверхвысоких частотах (СВЧ). Ферромагнитный резонанс как явление и как метод исследования магнитных динамических свойств твердых тел. Определение <math>g</math> – фактора и констант магнитной анизотропии. Релаксация и нелинейные эффекты в условиях резонанса. Магнитооптические эффекты. Магнитная восприимчивость на оптических частотах. Исследование магнитных кристаллов магнитооптическими методами. Доменная граница как солитон. Нелинейная динамика доменных границ. Динамические и топологические магнитные солитоны. Дисклинация и вихри в магнетиках.</p>	<p>12</p>
<p>ЯМР, ЯКР спектроскопия твердых тел.</p>	<p>Явление ядерного магнитного резонанса в твердых телах. Уровни энергии, частота перехода. Уравнения Блоха, динамическая магнитная восприимчивость. Интенсивность сигнала ЯМР. Методы детектирования и техника ЯМР спектроскопии, непрерывное прохождение, спиновое эхо, примеры импульсных последовательностей. Механизмы спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. Квадрупольные эффекты магнитном резонансе. ЯМР высокого разрешения в твердых телах, вращение под магическим углом. Основные особенности ЯМР в магнитоупорядоченных кристаллах: локальные магнитные поля на ядрах, явление усиления радиочастотного поля, усиление в доменах и доменных границах. Сул-Накамуrowsкое взаимодействие, ядерные спиновые волны и динамический сдвиг частоты. ЯМР в сверхпроводниках. Сдвиг Найта. Особенности спин-решеточной релаксации. Информация, извлекаемая с помощью ЯМР. Электрические квадрупольные взаимодействия и квадрупольные эффекты в твердых телах. Ядерный квадрупольный резонанс в твердых телах. Методы детектирования и техника ЯКР спектроскопии. Ядерная релаксация и ее механизмы. Информация, извлекаемая с помощью ЯКР.</p>	<p>14</p>
<p>ЭПР и ЯГР спектроскопия твердых тел</p>	<p>Явление ЭПР. Методы детектирования и техника ЭПР. Феноменологические уравнения Блоха.</p>	<p>14</p>

	<p>Кри-сталлическое поле и эффективный спин-гамиль-тониан. Спин-спиновые и спин-решеточные взаимо-действия. Механизмы спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. Спин-решеточная релаксация и ширина линии. ЭПР на электронах проводимости, на донорных и акцепторных приме-сях в полупроводниках. Двойной электронно-ядерный резонанс. Теория эффекта Мессбауэра. Методика и техника проведения <math>\gamma</math> - резонансных экспериментов. Резо-нансное поглощение и рассеяние <math>\gamma</math> - излучения ядрами в кристалле. Вероятность поглощения <math>\gamma</math> - квантов без отдачи. Динамика решетки и эффект Мессбауэра. Сверхтонкая структура <math>\gamma</math> - спектров: изомерные сдвиги и квадрупольное ращепление. Ядерный Зееман – эффект. Эффективные магнитные поля на ядрах.. Мессбауэровская спектроскопия конверсионных электронов. Данные о фундаментальных характеристиках конденсированного состояния, извлекаемые с помощью ЯГР спектроскопии.</p>	
<p>Магнетизм переходных металлов. Магнитные материалы.</p>	<p>Ферромагнетизм коллективизированных электронов и теория Стонера. Магнетизм сильно коррелированных d – систем. Магнетизм редкозе-мельных элементов и актинидов. Магнитная анизо-тропия d – металлов и редкоземельных актинидов. Магнитомягкие и магнито жесткие материалы, сплавы с высокой магнитной проницаемостью, фер-риты с высокой магнитной проницаемостью, сплавы для постоянных магнитов, сплавы с высокой маг-нитострикцией, тонкие магнитные пленки, маг-нитные порошки и наноструктуры. Основы магнит-ной записи и считывания. Цилиндрические маг-нитные домены в вычислительных устройствах. Аморфные магнитные материалы. Магнитные оксиды и мультиферроики. Метаматериалы.</p>	14
	ИТОГО	120

2.2.2. Практические занятия, их наименование, содержание, объем в часах.  
Практические занятия не предусмотрены учебным планом.

2.2.3. Самостоятельная работа аспирантов

Разделы и темы рабочей программы самостоятельного	Перечень заданий для самостоятельной работы (рефераты, доклады, переводы,	Труд оемк
---	---	-----------

изучения	расчеты, планирование эксперимента и т.п.)	ость Час.
<p>Раздел 1. Слабромагнитные вещества. Парамагнетизм. Диамаг-нетизм. Тема 1.1. Спектр электронов проводимости в квантующем магнитном поле. Диамагнетизм Ландау. Парамагнетизм Паули Эффект де Газа-ван Альфена.</p>	<p>Анализ научной литературы, периодических научных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины. Подготовка доклада.</p>	24
<p>Раздел 2. Магнитоупорядоченные вещества. Упорядоченные магнит-ные структуры. Ферромагнитный порядок Ферромагнетики, антиферромагнетики Тема 2.1 Соизмеримые и несоизме-римые магнитные структуры. Ме-тоды их исследования. Тема 2.2. Магноны в антиферро-магнетиках. Магнитная (спин-волновая) часть теплоемкости и температурно-зависимая часть магнитной восприимчивости анти-ферромагнетика.</p>	<p>Анализ научной литературы, периодических научных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины Подготовка доклада.</p>	24
<p>Раздел 3. Основы теории магнит-ных превращений. Ферромагнетизм и доменная структура кристаллов Тема 3.1. Доменные границы (Блоха, Нееля). Тонкая структура доменных границ. Кривая тех-нического намагничивания. Переход от массивных образцов к тонким кристаллам.</p>	<p>Анализ периодических научных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины. Технический перевод зарубежных первоисточников. Подготовка доклада.</p>	18
<p>Раздел 4. Динамика процессов перемагничивания. Ферро – и анти-ферро-магнетики в переменных полях. Нелинейные динамические явления в магнетиках. Тема 4.1. Доменная граница как солитон. Нелинейная динамика доменных границ. Динамические и топологические</p>	<p>Анализ периодических научных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины. Технический перевод зарубежных первоисточников. Подготовка доклада.</p>	18

магнитные соли-тоны. Дисклинации и вихри в магнетиках. Тема 4.2. Магнитооптические эффекты. Магнитная восприимчивость на оптических частотах. Исследование магнитных кристаллов магнитооптическими методами.		
Раздел 5. ЯМР, ЭПР, ЯКР и ЯГР спектроскопия твердых тел. Тема 5.1. ЯМР в магнитоупорядоченных веществах. Тема 5.2. Ядерный квадрупольный резонанс в твердых телах. Методы детектирования и техника ЯКР спектроскопии.	Анализ периодических научных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины. Технический перевод зарубежных первоисточников. Подготовка доклада.	24
Раздел 6. Магнетизм переходных металлов. Магнитные материалы. Тема 6. 1. Магнетизм сильно коррелированных d – систем. Тема 6.2. Магнетизм редкоземельных элементов и актинидов.	Анализ периодических научных журналов и электронных источников с учетом содержания дисциплины. Технический перевод зарубежных первоисточников. Подготовка доклада.	24
ИТОГО		132

### 2.3 Учебно-методические материалы по дисциплине

#### 2.3.1. Основная и дополнительная литература

##### *Основная литература*

1. С.В.Вонсовский. Магнетизм.- М.: Наука. 1071. – 1032 с.
2. Г.С.Кринчик. Физика магнитных явлений. – М.: МГУ. 1985. – 335 с.
3. Е.С.Боровик, В.В.Еременко, А.С.Мильнер. Лекции по магнетизму. – М : ФИЗМАТ-ЛИТ. 2005. – 510 с.
4. Н.А. Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела, Т.1.- М.: Мир. 1979. - 400 с.
5. Н.А. Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела, Т.2.- М.: Мир. 1979. - 424 с.
6. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела. – М. : Наука. ГРФМЛ. 1978. - 791 с.
7. С.В.Вонсовский, М.И.Кацнельсон
8. В.Ю.Ирхин, Ю.П.Ирхин. Электронная структура, физические свойства и корреляционные эффекты в d – f металлах и их соединениях . – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований - 2008. – 476 с.
9. В.С.Тикадзуми. Физика ферромагнетизма, Магнитные свойства вещества. – М.: Мир. 1983.-302 с.; Магнитные характеристики и практическое применение. – М.: Мир. 1987.- 420 с.

10. Дж.Пейк. Парамагнитный резонанс.- М.: Мир. 1963. – 280 с.
11. Ж. Винтер. Магнитный резонанс в металлах. – Мир. 1976. – 288 с.
- 12 В.С.Гречишкин. Ядерные квадрупольные резонансы в твердых телах. – М.:Наука. 1973. - 264 с.
13. И.Ахиезер, В.Г.Барьяхтар, С.В.Пелетминский. Спиновые волны. – М.: Наука. 1967.- 368
14. Ч. Сликтер. – Основы теории магнитного резонанса. – М. : Мир. 1981. – 448 с.
15. В.С.Шпинель. Резонанс гамма-лучей в кристаллах. – М.:Наука. 1969. - 408 с.

#### *Дополнительная литература*

- 16 У.Ф.Браун. Микромагнетизм. – М.:Наука. 1985. - 160 с.
17. Е.А.Туров, А.В.Колчанов, В.В.Меньшенин, И.Ф.Мирсаев, В.В.Николаев. Симметрия и физические свойства антиферромагнетиков. – М.:ФИЗМАТЛИТ. 2001. – 559 с.
18. Е.А.Туров. Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. – М.: Изд.-во АН СССР. 1963. - 223 с.
19. К.Хандрих, С.Кобе. Аморфные ферро- и ферримагнетики. – М. : Мир.: 1982. – 295 с.
- 18.Е.А.Туров, М.П.Петров. Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. – М.: 1969. - 260 с.
20. Р.М.Уайт. Квантовая теория магнетизма. – М.:Наука. 1985. - 304 с.
21. С.А.Альтшулер, В.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс . – М.: Наука. Физматгиз. 1961 - 361 с.
22. Б.Н. Филиппов, А.П. Танкеев «Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой», 1987, Москва, Наука.
- 23 А.М. Косевич, Б.А.Иванов, А.С.Ковалев. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны. – Киев. : Наукова думка: 1983. – 190 с.
24. Н.М.Саланский, М.Ш.Ерухимов. Физические свойства и применение магнитных пленок. – Новосибирск, Наука, сибирское отделение, 1973. – 222 с.

#### 2.3.2. Примерный перечень тем рефератов и докладов \*)

- 1.Магнитные оксиды - вещества с уникальной корреляцией структурных, электронных, транспортных и магнитных свойств.
- 2.Мультиферроики – уникальные материалы с магнитным и ферроэлектрическим упорядочением.
3. Особенности ядерного магнитного резонанса в магнитоупорядоченных средах
4. Магнитные и электрические свойства мультиферроика  $\text{BiFeO}_3$  .
- 5.Магнитоэлектрическое управление магнитными доменными границами в пленках с магнитоэлектрическим взаимодействием.
6. Метаматериалы – вещества с необычными электрическими и магнитными свойствами.
7. Эффект Кондо в соединениях переходных d и f – металлов.
8. Молекулярные магнетики

\*) Тему реферата предлагает научный руководитель аспиранта, она может и не входить в указанный выше перечень тем.