

*Приложение к приказу первого проректора  
по учебной и научной работе*

от \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

**Правительство Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

*Физика магнетизма и рассеяние поляризованных и неполяризованных  
нейтронов*

*Physics of magnetism and scattering of polarized and unpolarized neutron*

**Язык(и) обучения**

*русский*

Трудоёмкость (границы трудоёмкости) в зачетных единицах: 2

Регистрационный номер рабочей программы: \_\_\_\_\_

Санкт-Петербург

2014

## Раздел 1. Характеристики учебных занятий

### 1.1. Цели и задачи учебных занятий

Сформировать высокий уровень профессиональной подготовки студентов по одному из активно развивающихся направлений современной физики конденсированного состояния, физики магнитных явлений. Дать базовые знания по современной теории магнитных явлений в твердом теле. Сформировать представление о возможностях и роли современных нейтронных экспериментов в изучении магнитных явлений. Дать базовые знания о современных методах исследования магнитных явлений.

### 1.2. Требования к подготовленности обучающегося к освоению содержания учебных занятий (пререквизиты)

Для успешного освоения программы дисциплины «Физика магнетизма и рассеяние поляризованных и неполяризованных нейтронов» студентам необходим объем знаний, полученный на первых трех курсах Физического факультета СПбГУ, а также необходимо прослушать курс «Теория взаимодействия синхротронного (рентгеновского) и нейтронного излучения с веществом».

### 1.3. Перечень результатов обучения (learning outcomes)

В результате освоения дисциплины студенты должны:

- знать современные полуклассические и квантовые методы описания магнитных свойств твердых тел, основы термодинамического подхода к описанию магнитных явлений в конденсированных средах, современные экспериментальные методики изучения свойств магнетиков, включая рассеяние нейтронов;
- усвоить основные причины, приводящие к возникновению магнитоупорядоченного состояния, иметь представления о методах теоретического и экспериментального исследования фазовых переходов, происходящих в магнетиках;
- углубить представления о микроскопической природе магнетизма, уметь ориентироваться в различных современных моделях магнетизма при объяснении данных по экспериментальному исследованию магнитных свойств нейтронами и при помощи других методов.

### 1.4. Перечень активных и интерактивных форм учебных занятий

- Информационная лекция – последовательное изложение материала в дисциплинарной логике, осуществляемое преимущественно вербальными средствами (монолог преподавателя) (28 часов).
- Семинарские занятия (самостоятельная работа студента в присутствии преподавателя) проводятся в виде интерактивных лекций с подготовленными слайдовыми презентациями (28 часов).

## Раздел 2. Организация, структура и содержание учебных занятий

### 2.1. Организация учебных занятий

#### 2.1.1 Основной курс

Трудоёмкость, объёмы учебной работы и наполняемость групп обучающихся				
Период обучения (модуль)	Контактная работа обучающихся с преподавателем	Самостоятельная работа	Всего занятий	Трудоемкость

	лекции	семинары	консультации	практические занятия	лабораторные работы	контрольные работы	коллоквиумы	текущий контроль	промежуточная аттестация	итоговая аттестация	под руководством преподавателя	в присутствии преподавателя	сам.раб. с использованием методических материалов	текущий контроль (сам.раб.)	промежуточная аттестация (сам.раб.)	итоговая аттестация (сам.раб.)		
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>																		
<b>очная форма обучения</b>																		
Семестр 3	28		2						2			28			12		60	2
	2-10		2-10						2-10			2-10			2-10			
<b>ИТОГО</b>	<b>28</b>		<b>2</b>						<b>2</b>			<b>28</b>			<b>12</b>		<b>60</b>	<b>2</b>

Формы текущего контроля успеваемости, виды промежуточной и итоговой аттестации			
Период обучения (модуль)	Формы текущего контроля успеваемости	Виды промежуточной аттестации	Виды итоговой аттестации (только для программ итоговой аттестации и дополнительных образовательных программ)
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>			
<b>очная форма обучения</b>			
Семестр 3		экзамен	

## 2.2. Структура и содержание учебных занятий

**Основной курс      Основная траектория      Очная форма обучения**

Период обучения (модуль): **Семестр 3**

№ п/п	Наименование темы (раздела, части)	Вид учебных занятий	Количество часов
1	1. Введение.	Лекции	2
	1.1. Магнитный момент. Магнитный момент и момент количества движения. Эффекты Эйнштейна – де Гааза и Барнетта. 1.2. Магнетизм с точки зрения классической механики. Теорема Бора – ван Лёвен. 1.3. Модель атома Бора. Магнетон Бора. Состояния электронов в атоме. Уровни энергии атома. Тонкая	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2

	<p>структура уровней. Основное состояние атома. Правила Хунда.</p> <p>2. Невзаимодействующие магнитные моменты.</p> <p>2.1. Атом в магнитном поле. Магнитный момент атома. Фактор Ланде. Эффекты Зеемана и Пашена-Бака. Диамагнетизм замкнутых электронных оболочек. Парамагнетизм Ван Флека.</p>		
2	<p>2.2. Парамагнетизм. Полуклассическое описание парамагнетизма. Функция Бриллюэна. Случай спина 1/2. Закон Кюри. Парамагнетизм солей редкоземельных элементов. Адиабатическое размагничивание. Магнитное рассеяние нейтронов в парамагнетике.</p> <p>3. Влияние окружения магнитных ионов. Методы исследования, основанные на магнитном резонансе.</p> <p>3.1. Кристаллическое поле. Магнитные свойства ионов переходных элементов. Явление «замораживания» орбитального момента. Высокоспиновые и низкоспиновые состояния ионов в кристаллах. Эффект Яна-Теллера.</p>	Лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2
3	<p>3.2. Сверхтонкая структура атомных уровней. Магнитный момент ядра. Взаимодействие ядра с электронной оболочкой. Эффект Зеемана для сверхтонкой структуры. Взаимодействие ядра с окружением.</p> <p>3.3. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Примеры применения ЯМР. Импульсный ЯМР. Спиновое эхо.</p> <p>3.4. Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР). Особенности и применение ЯКР.</p>	Лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2
4	<p>3.5. Электронный парамагнитный резонанс. Эффективный гамильтониан магнитного иона. Пример иона <math>\text{Ce}^{3+}</math> в поле аксиальной симметрии. Переходы между близлежащими уровнями.</p> <p>3.6. Спектроскопия Мёсбауэра.</p>	Лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2

	3.7. Мюонные исследования.		
5	4. Взаимодействие магнитных атомов в твердом теле.	Лекции	2
	<p>4.1. Магнитное дипольное взаимодействие.</p> <p>4.2. Обменное взаимодействие, его природа на примере молекулы водорода. Ферромагнитный обмен в атоме, первое правило Хунда. Обменное взаимодействие в кристалле. Критерий ферромагнетизма. Обменное взаимодействие в модели Хаббарда.</p> <p>4.3. Косвенное обменное взаимодействие. Правила Гуденафа-Канамори-Андерсона. Косвенный обмен в металлах, взаимодействие Рудермана-Киттеля-Касуя-Йосиды (РККИ). Двойной обмен.</p> <p>4.4. Анизотропный обмен. Взаимодействие Дзялошинского-Мория.</p>	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2
6	5. Магнитный порядок и магнитные структуры.	Лекции	2
	<p>5.1. Ферромагнетизм. Модель ферромагнетика Вейса, молекулярное поле. Закон Кюри-Вейсса. Природа молекулярного поля. Недостатки теории Вейсса. Элементарные возбуждения в ферромагнетике, спиновые волны (магноны). Закон Блоха <math>T^{3/2}</math>. Теплоемкость ферромагнетика при низких температурах. Теорема Мермина-Вагнера. Нарушение теоремы Мермина-Вагнера в двумерном ферромагнетике при наличии анизотропии. Однородный ферромагнитный резонанс. Влияние формы образца и анизотропии обмена. Упругое магнитное рассеяние нейтронов в ферромагнетике без орбитального вклада. Сечение одномагнетонного рассеяния нейтронов в ферромагнетике. Измерение дисперсии магнонов в нейтронных</p>	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	3

	экспериментах.		
7	5.2. Антиферромагнетизм. Модель антиферромагнетика Вейса. Магнитная восприимчивость, закон Кюри-Вейсса. Спин-флоп и спин-флип переходы. Спиновые волны в антиферромагнетике. Теплоемкость антиферромагнетика при низких температурах. Теорема Мермина-Вагнера и ее нарушение в двумерном антиферромагнетике при наличии анизотропии. Антиферромагнитный резонанс. Упругое магнитное рассеяние нейтронов в антиферромагнетике.	Лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	3
8	5.3. Ферромагнетизм. Магнитная восприимчивость ферромагнетиков. Точка компенсации ферромагнетиков. 5.4. Спиральные магнитные структуры. Обменная спираль и магнитная спираль в соединениях с взаимодействием Дзялошинского-Мория. Упругое магнитное рассеяние нейтронов в спиральном магнетике. 5.5. Спиновые стекла. Фрустрация. Параметр порядка Эдвардса-Андерсона. Основные экспериментальные результаты: намагниченность, магнитная восприимчивость, теплоемкость, эффекты памяти. Кластерное стекло (микромагнетик). Возвратный переход. Предел перколяции. 5.6. Димерные спиновые жидкости, основные свойства.	Лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2
9	6. Магнитный порядок и нарушение симметрии. 6.1. Фазовые переходы. Критическое поведение, его универсальность. Теория фазовых переходов Ландау, общая концепция. Нарушение симметрии при фазовых переходах. Модель ферромагнетизма Ландау. Теория среднего поля и критические размерности. Гипотеза подобия, скейлинг.	Лекции	3
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	3

	<p>6.2. Квантовые фазовые переходы. Модель Изинга в поперечном поле.</p> <p>6.3. Следствия нарушения симметрии. Домены. Доменные стенки, их энергия. Процесс намагничивания ферромагнетика. Однодоменные частицы. Намагничивание однодоменных частиц, модель Стонера-Вольфарта.</p> <p>Суперпарамагнетизм. «Мягкие» и «жесткие» магнитные материалы.</p>		
10	7. Магнетизм металлов.	Лекции	3
	<p>7.1. Модель свободных электронов. Парамагнетизм Паули. Зонные магнетики. Критерий ферромагнетизма Стонера. «Стонеровское» усиление восприимчивости.</p> <p>7.2. Электроны в магнитном поле. Уровни Ландау. Диамагнетизм Ландау. Осцилляции магнитной восприимчивости и электрической проводимости при изменении магнитного поля.</p>	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	3
11	7.3. Электронный газ в пространственно неоднородном магнитном поле. Магнитная восприимчивость. Взаимодействие РККИ. Нестинг поверхности Ферми. Волна спиновой плотности. Элементарные возбуждения электронного газа.	Лекции	2
		Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2
12	8. Фрустрирующие взаимодействия в магнитных системах и пониженная размерность.	Лекции	4
	<p>8.1. Волна спиновой плотности в одномерном электронном газе, переход металл-изолятор. Волна зарядовой плотности, неустойчивость Пайерлса.</p> <p>8.2. Одномерный ферромагнетик Изинга, элементарные возбуждения и их изучение в нейтронных экспериментах. Отсутствие фазового перехода по температуре в этой модели.</p>	Самостоятельная работа в присутствии преподавателя	2

<p>8.3. Одномерный магнетизм в модели Гейзенберга. Спиновые цепочки. Цепочки с полуцелым спином, их спектр элементарных возбуждений и его изучение в нейтронных экспериментах. Цепочки с целым спином. Спиновый переход Пайерлса. Спиновые лестницы.</p> <p>8.4. Двумерный магнетизм. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса.</p> <p>8.5. Явления типа «порядок из беспорядка».</p> <p>8.6. Некоторые качественно новые явления, вызванные фрустрацией: фазовые переходы в спиральных магнетиках и слоистых антиферромагнетиках с треугольной решеткой, нематический магнитный порядок.</p> <p>8.7. Квантовые спиновые жидкости и неприменимость концепции Ландау для описания некоторых квантовых фазовых переходов в них.</p>		
--	--	--

### **Раздел 3. Обеспечение учебных занятий**

#### **3.1. Методическое обеспечение**

##### 3.1.1 Методические указания по освоению дисциплины

Не предусмотрено

##### 3.1.2 Методическое обеспечение самостоятельной работы

Для самостоятельной работы студенты должны обеспечиваться:

- программой курса, адаптированной для студента;
- перечнем заданий для самостоятельной работы.

##### 3.1.3 Методика проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации и критерии оценивания

Проведение промежуточной аттестации будет осуществляться в виде устного экзамена и оцениваться на основании Балльно-рейтинговой системы. Целями введения балльно-рейтинговой системы являются стимулирование систематической учебной работы студентов в течение всего периода обучения, повышение объективности оценки знаний студентов и мотивация их к систематической самостоятельной работе по изучению дисциплины в течение семестра.

Общее максимальное количество баллов – 100, из них за посещение и работу на лекциях – 10 баллов, за работу, выполняемую под руководством преподавателя – 20 баллов, за ответ на вопросы во время промежуточной аттестации – 70 баллов.

Экзаменационный билет содержит два вопроса, на каждый из которых студент должен привести развернутый конспект с планом ответа, необходимыми определениями, иллюстрациями, формулами и зависимостями. В устной форме студент, пользуясь конспектом, должен связно и исчерпывающе изложить содержание ответа.



В ходе ответа преподавателем могут быть заданы студенту уточняющие вопросы по билету. На подготовку конспекта ответа по билету отводится не более 1 часа, на обдумывание ответа на дополнительные вопросы не более 10 минут на каждый. В общей сложности ответ студента не должен превышать 40 минут без учета времени на обдумывание дополнительных вопросов.

3.1.4 Методические материалы для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации (контрольно-измерительные материалы, оценочные средства)

### **Перечень билетов для проведения промежуточной аттестации студентов.**

Билет 1.

1. Магнитный момент. Магнитный момент и момент количества движения. Эффекты Эйнштейна – де Гааза и Барнетта. Магнетизм с точки зрения классической механики. Теорема Бора – ван Лёвен.
2. Ферромагнетизм. Модель ферромагнетика Вейса, молекулярное поле. Закон Кюри-Вейсса. Природа молекулярного поля. Недостатки теории Вейсса.

Билет 2.

1. Модель атома Бора. Магнетон Бора. Состояния электронов в атоме. Уровни энергии атома. Тонкая структура уровней. Основное состояние атома. Правила Хунда.
2. Элементарные возбуждения в ферромагнетике, спиновые волны (магноны). Закон Блоха  $T^{3/2}$ . Теплоемкость ферромагнетика при низких температурах. Теорема Мермина-Вагнера. Нарушение теоремы Мермина-Вагнера в двумерном ферромагнетике при наличии анизотропии.

Билет 3.

1. Атом в магнитном поле. Магнитный момент атома. Фактор Ланде.
2. Однородный ферромагнитный резонанс. Влияние формы образца и анизотропии обмена. Упругое магнитное рассеяние нейтронов в ферромагнетике без орбитального вклада. Измерение дисперсии магнонов в нейтронных экспериментах.

Билет 4.

1. Эффекты Зеемана и Пашена-Бака. Диамагнетизм замкнутых электронных оболочек. Парамагнетизм Ван Флека.
2. Модель антиферромагнетика Вейса. Магнитная восприимчивость, закон Кюри-Вейсса. Спин-флоп и спин-флип переходы.

Билет 5.

1. Парамагнетизм. Полуклассическое описание парамагнетизма. Функция Бриллюэна. Случай спина 1/2. Закон Кюри. Парамагнетизм солей редкоземельных элементов.
2. Спиновые волны в антиферромагнетике. Теплоемкость антиферромагнетика при низких температурах. Теорема Мермина-Вагнера и ее нарушение в двумерном антиферромагнетике при наличии анизотропии.

Билет 6.

1. Антиферромагнитный резонанс. Упругое магнитное рассеяние нейтронов в антиферромагнетике.
2. Адиабатическое размагничивание. Магнитное рассеяние нейтронов в парамагнетике.

Билет 7.

1. Кристаллическое поле. Магнитные свойства ионов переходных элементов. Явление замораживания орбитального момента. Высокоспиновые и низкоспиновые состояния ионов в кристаллах. Эффект Яна-Теллера.
2. Ферримагнетизм. Магнитная восприимчивость ферримагнетиков. Точка компенсации ферримагнетиков.

Билет 8.

1. Сверхтонкая структура атомных уровней. Магнитный момент ядра. Взаимодействие ядра с электронной оболочкой. Эффект Зеемана для сверхтонкой структуры.

Взаимодействие ядра с окружением.

2. Спиральные магнитные структуры. Обменная спираль и магнитная спираль в соединениях с взаимодействием Дзялошинского-Мория. Упругое магнитное рассеяние нейтронов в спиральном магнетике.

Билет 9.

1. Ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Примеры применения ЯМР.

2. Спиновые стекла. Фрустрация. Параметр порядка Эдвардса-Андерсона. Основные экспериментальные результаты: намагниченность, магнитная восприимчивость, теплоемкость, эффекты памяти. Кластерное стекло (микромагнетик). Возвратный переход. Предел перколяции.

Билет 10.

1. Импульсный ЯМР. Спиновое эхо.

2. Фазовые переходы. Критическое поведение, его универсальность. Теория фазовых переходов Ландау, общая концепция. Нарушение симметрии при фазовых переходах. Модель ферромагнетизма Ландау. Теория среднего поля и критические размерности. Гипотеза подобия, скейлинг.

Билет 11.

1. Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР). Особенности и применение ЯКР.

2. Домены. Доменные стенки, их энергия. Процесс намагничивания ферромагнетика.

Билет 12.

1. Электронный парамагнитный резонанс. Эффективный гамильтониан магнитного иона. Пример иона  $\text{Ce}^{3+}$  в поле аксиальной симметрии. Переходы между близлежащими уровнями.

2. Димерные спиновые жидкости, основные свойства.

Билет 13.

1. Спектроскопия Мёсбауэра.

2. Однодоменные частицы. Намагничивание однодоменных частиц, модель Стонера-Вольфарта. Суперпарамагнетизм. «Мягкие» и «жесткие» магнитные материалы.

Билет 14.

1. Мюонные исследования.

2. Квантовые фазовые переходы. Модель Изинга в поперечном поле.

Билет 15.

1. Обменное взаимодействие, его природа на примере молекулы водорода. Ферромагнитный обмен в атоме, первое правило Хунда.

2. Модель свободных электронов. Парамагнетизм Паули.

Билет 16.

1. Обменное взаимодействие в кристалле. Критерий ферромагнетизма. Обменное взаимодействие в модели Хаббарда.

2. Волна спиновой плотности в одномерном электронном газе, переход металл-изолятор. Волна зарядовой плотности, неустойчивость Пайерлса. Спиновый переход Пайерлса.

Билет 17.

1. Косвенное обменное взаимодействие. Правила Гуденафа-Канамори-Андерсона. Косвенный обмен в металлах, взаимодействие Рудермана-Киттеля-Касуя-Иосиды (РККИ). Двойной обмен.

2. Одномерный ферромагнетик Изинга, элементарные возбуждения и их изучение в нейтронных экспериментах. Отсутствие фазового перехода по температуре в этой модели.

Билет 18.

1. Зонные магнетики. Критерий ферромагнетизма Стонера. «Стонеровское» усиление восприимчивости.

2. Одномерный магнетизм в модели Гейзенберга. Спиновые цепочки. Цепочки с полужелым спином, их спектр элементарных возбуждений и его изучение в нейтронных экспериментах. Цепочки с целым спином. Спиновые лестницы.

Билет 19.

1. Электроны в магнитном поле. Уровни Ландау.

2. Двумерный магнетизм. Переход Березинского-Костерлица-Таулеса.

Билет 20.

1. Диамагнетизм Ландау. Осцилляции магнитной восприимчивости и электрической проводимости при изменении магнитного поля.

2. Явления типа «порядок из беспорядка».

Билет 21.

1. Электронный газ в пространственно неоднородном магнитном поле. Магнитная восприимчивость. Взаимодействие РККИ.

2. Некоторые качественно новые явления, вызванные фрустрацией: фазовые переходы в спиральных магнетиках и слоистых антиферромагнетиках с треугольной решеткой, нематический магнитный порядок.

Билет 22.

1. Нестинг поверхности Ферми. Волна спиновой плотности. Элементарные возбуждения электронного газа.

2. Эффект Кондо.

3.1.5 Методические материалы для оценки обучающимися содержания и качества учебного процесса

**Анкета-отзыв** на дисциплину «Физика магнетизма и рассеяние поляризованных и неполяризованных нейтронов».

Просим Вас заполнить анкету-отзыв по прочитанной дисциплине. Обобщенные данные анкет будут использованы для ее совершенствования. По каждому вопросу проставьте соответствующие оценки по шкале от 1 до 10 баллов (**обведите** выбранный Вами балл). В случае необходимости впишите свои комментарии.

1. Насколько Вы удовлетворены содержанием дисциплины в целом?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

2. Насколько Вы удовлетворены общим стилем преподавания?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

3. Как Вы оцениваете качество подготовки предложенных методических материалов?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

4. Какой из модулей (разделов) дисциплины Вы считаете наиболее полезным, ценным с точки зрения дальнейшего обучения и/или применения в последующей практической деятельности?

Комментарий \_\_\_\_\_

5. Что бы Вы предложили изменить в методическом и содержательном плане для совершенствования преподавания данной дисциплины?

СПАСИБО!

### **3.2. Кадровое обеспечение**

#### **3.2.1 Образование и (или) квалификация преподавателей и иных лиц, допущенных к проведению учебных занятий**

К чтению лекций должны привлекаться преподаватели, имеющие ученую степень и/или ученое звание, имеющие опыт планирования и организации учебного процесса, а также главные и ведущие специалисты в этой области.

#### **3.2.2 Обеспечение учебно-вспомогательным и (или) иным персоналом**

Требования не предъявляются

### **3.3. Материально-техническое обеспечение**

#### **3.3.1 Характеристики аудиторий (помещений, мест) для проведения занятий**

Стандартно оборудованные лекционные аудитории для проведения интерактивных лекций: видеопроектор, экран настенный, ноутбук и доска.

#### **3.3.2 Характеристики аудиторного оборудования, в том числе неспециализированного компьютерного оборудования и программного обеспечения общего пользования**

Для проведения занятия необходимы: видеопроектор, ноутбук, переносной экран и доска.

#### **3.3.3 Характеристики специализированного оборудования**

#### **3.3.4 Характеристики специализированного программного обеспечения**

#### **3.3.5 Перечень и объемы требуемых расходных материалов**

Фломастеры цветные, губки, бумага формата А4, канцелярские товары, картриджи принтеров, диски, флеш-накопители, мел и др. в объеме, необходимом для организации и проведения занятий, по заявкам преподавателей, подаваемым в установленные сроки.

### **3.4. Информационное обеспечение**

#### **3.4.1 Список обязательной литературы**

1. Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильнер, Лекции по магнетизму, – М.: Физматлит, 2005
2. S. Blundel, Magnetism: A Very Short Introduction, – Oxford University Press, 2012
3. S. Blundel, Magnetism in condensed matter, – Oxford University Press, 2001
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978.

#### **3.4.2 Список дополнительной литературы**

1. Ralph Skomski, Simple Models of Magnetism, – Oxford University Press, 2012
2. С. В. Вонсовский, Магнетизм, – М.: Наука, 1971
3. К. Yosida, Theory of Magnetism, – Springer, 1996.
4. Р. Уайт, Квантовая теория магнетизма, – М.: Мир, 1985

5. M. Getzlaff, Fundamentals of Magnetism, Springer, 2010
6. W. Nolting, Quantum theory of magnetism, – Springer, 2009
7. Л. И. Ахиезер, В. Г. Барьяхтар, С. В. Пелетминский, Спиновые волны, – М.: Наука, 1967.
8. А. Абрагам, Б. Блини, Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов, – М.: «Мир», 1972
9. Э. Л. Нагаев, Магнетики со сложными обменными взаимодействиями, – М.: Наука, 1988
10. А.А. Абрикосов, Основы теории металлов, – М.: Физматлит, 2010
11. Ч. Слингер, Основы теории магнитного резонанса, – М.: «Мир», 1981
12. Ю.А. Изюмов, Р.П. Озеров, Магнитная нейтронография, – М.: Наука, 1966.
13. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Квантовая механика, – М.: Наука, 1988.
14. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, – М.: Наука, 1988.
15. S.W. Lovesey, Theory of Neutron scattering from Condensed Matter, – Oxford, Clarendon Press, 1988.
16. G.C. Squires, Thermal Neutron Scattering, – Cambridge University Press, 1978
17. С.В. Малеев, Рассеяние поляризованных нейтронов в магнетиках, УФН 172 (6), 617 (2002).

### 3.4.3 Перечень иных информационных источников