

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики микроструктур Российской академии наук

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора ИФМ РАН

\_\_\_\_\_  
В.И.Гавриленко  
"22" июня 2015 г.

## **Рабочая программа дисциплины**

**Физика магнетизма**

Направление подготовки

*03.06.01 «Физика и астрономия»*

Направленность (профиль) программы

*01.04.07 «Физика конденсированного состояния»*

Квалификация (степень) выпускника

*исследователь - преподаватель, исследователь*

Форма обучения

*очная*

Нижний Новгород

2015

## 1. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Физика магнетизма» является дисциплиной по выбору вариативной части программы 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

Для успешного усвоения курса аспиранту необходимо знание общих курсов физики и математики, квантовой механики, статистической физики, электродинамики, физики твердого тела. Данный курс является базой для выполнения аспирантами исследований в области твердотельных магнитных наноструктур.

Дисциплина изучается на 1 курсе (1 семестр).

**Целями освоения дисциплины являются:**

- формирование у аспирантов представления о твердотельном магнетизме как о разделе физического знания, базирующегося на релятивистской квантовой теории;
- ознакомление аспирантов с модельными представлениями, используемыми при описании магнитных явлений в твёрдых телах;
- формирование у аспирантов компетенций программы 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия».

## 2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы по направлению «Физика и астрономия»

В результате освоения дисциплины обучающийся должен овладеть следующими компетенциями результатами обучения по дисциплине:

<b>Код компетенции</b>	<b>Результаты освоения ООП Содержание компетенций</b>	<b>Перечень результатов планируемых обучения по дисциплине</b>
<b>УК-1</b>	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	<b>ЗНАТЬ:</b> методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях. <b>УМЕТЬ:</b> проводить анализ литературных данных в рамках поставленной исследовательской (практической, образовательной) задачи, выявлять основные вопросы и проблемы, существующие в современной науке; при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений. <b>ВЛАДЕТЬ:</b>

		<p>навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.</p>
<p><b>ОПК-1</b></p>	<p>способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b>  теоретические основы организации научно-исследовательской деятельности;  методы сбора информации для решения поставленных исследовательских задач;  методы анализа данных, необходимых для проведения конкретного исследования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b>  выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования  планировать, организовывать и проводить научно-исследовательские и производственно-технические исследования с применением современной аппаратуры, оборудования и компьютерных технологий;  самостоятельно выполнять теоретические, экспериментальные и вычислительные физические исследования при решении научно-исследовательских и производственных задач с использованием современной аппаратуры и вычислительных средств.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b>  навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации по тематике проводимых исследований;  навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов;</p>

		<p>навыками работы на современной аппаратуре и оборудовании для выполнения физических исследований;</p> <p>способностью самостоятельно с применением современных компьютерных технологий; анализировать, обобщать и систематизировать результаты физических работ.</p>
<b>ПК-1</b>	<p>способность самостоятельно проводить научные исследования в области физики конденсированного состояния и применять полученные результаты для решения практических задач</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области физики конденсированного состояния.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области физики конденсированного состояния.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области физики конденсированного состояния и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.</p>
<b>ПК-2</b>	<p>способность к системному анализу современных проблем физики и комплекса новейших знаний и достижений физики в своей научно-исследовательской деятельности</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> Базовые законы современной физики и их взаимосвязь, тенденции развития физики в обозримой перспективе, основные проблемы, стоящие перед современной физикой, а также предлагаемые средства их решения.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> понимать суть явлений и процессов, изучаемых физикой.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> основами методологии и практическими навыками научного познания при изучении различных уровней организации материи, пространства и времени.</p>

<b>ПК-3</b>	<p>способность использовать современные методы обработки экспериментальных данных и/или методы численного моделирования сложных физических процессов в области физики конденсированного состояния.</p>	<p><b>ЗНАТЬ:</b> основные методы обработки данных, полученных экспериментально или методами численного моделирования.</p> <p><b>УМЕТЬ:</b> выделять и систематизировать необходимые научные данные; критически оценивать их достоверность.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ:</b> навыками сбора, обработки, анализа и систематизации научных данных; навыками статистического анализа экспериментальных данных; навыками аналитических и численных аппроксимаций функций.</p>
-------------	--	--

### 3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость (объем) дисциплины составляет 3 зачетных единиц (ЗЕ), 108 часов.

#### 3.1. Объем дисциплины по видам учебных занятий (в часах)

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость дисциплины	108
Контактная работа обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) (всего)	36
Аудиторная работа (всего):	36
в том числе:	
Лекции	18
Практические занятия	18
Самостоятельная работа обучающихся (всего)	72
<b>Вид итогового контроля</b>	<b>Зачет</b>

#### 3.2. Разделы дисциплины и трудоемкость по видам учебных занятий (в академических часах)

№	Раздел дисциплины	Всего	Контактная работа		Самостоятельная работа
			Лекционные занятия	Практические занятия	
1	Релятивистские и обменные взаимодействия в системе электронов.	20	3	3	14
2	Парамагнетизм и ферромагнетизм	23	4	4	15
3	Энергия ферромагнитного кристалла	23	4	4	15

4	Малые феррочастицы.	23	4	4	15
5	Гиротропия ферромагнетиков	19	3	3	13
	<b>Дисциплина в целом</b>	<b>108</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>72</b>

### 3.3 Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам)

№	Наименование раздела дисциплины	Содержание
1	Релятивистские и обменные взаимодействия в системе электронов.	Момент импульса и орбитальное движение отдельного электрона и системы электронов. Спин отдельного электрона и системы электронов. Спиноры, их трансформационные свойства. Уравнение Дирака и уравнение Паули. Описание релятивистских взаимодействий (с точностью до членов $(v/c)^2$ ) при рассмотрении отдельного электрона и системы двух электронов. Понятие о спин-спиновом и спин-орбитальном взаимодействиях. Электронная оболочка атома. Тонкая структура атомных уровней. Гиромангнитная аномалия спина и фактор Ланде. Перестановочная симметрия волновых многоэлектронных функций и понятие об обменной энергии. Спиновой обменный оператор Дирака
2	Парамагнетизм и ферромагнетизм	Локализованные не взаимодействующие моменты. Парамагнетизм. Взаимодействие Ван-Флека-Гайзенберга. Приближение молекулярного поля в ферромагнетизме (модель Кюри-Вейса). Динамика магнитной решетки ферромагнетика в обменном приближении (полуклассическое рассмотрение и квантовое рассмотрение). Ферромагноны как квазичастицы. Термодинамика газа ферромагнонов.
3	Энергия ферромагнитного кристалла	Феноменологическое описание релятивистских взаимодействий в ферромагнитном кристалле. Энергия магнитокристаллографической анизотропии и энергия магнитодипольного взаимодействия. Доменная структура ферромагнетика. Междоменные границы. Страйп – структура и структура Ландау-Лифшица. Поведение доменной структуры в квазистационарном магнитном поле.
4	Малые феррочастицы.	Малые ферромагнитные частицы. Явление гистерезиса в малых ферромагнитных частицах. Наномагниты, их поведение во внешних полях. Теорема Крамерса.
5	Гиротропия ферромагнетиков	Магнитооптика ферромагнетиков. Ферромагнетики как гироэлектрические и гиромангнитные среды. Квантовомеханический расчет тензора деэлектрической проницаемости ферромагнетика. Эффект Фарадея в ферромагнетике.

Текущий контроль успеваемости осуществляется в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете, в ходе которого оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

#### **4. Образовательные технологии**

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Аспиранты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, подготовку семинаров, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, аспиранты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классах экспертов и специалистов в области современных задач физики магнетизма.

#### **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

В курсе запланировано на самостоятельную работу аспирантов 72 часа (67 % общего объема). Самостоятельная работа аспирантов является одним из видов учебных занятий, выполняется по заданию преподавателя индивидуально и без его непосредственного участия. Самостоятельная работа аспиранта – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – систематизация и закрепление полученных знаний и умений, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, формирование способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа аспиранта подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних задач с последующей проверкой навыков решения задач. Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных аспирантам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится при подготовке к зачету по дисциплине. Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

## **6. Фонд оценочных средств по дисциплине**

### **6.1 Типовые контрольные задания или иные материалы**

1. Момент импульса и орбитальное движение отдельной частицы.
2. Оператор момента импульса орбитального движения системы частиц.
3. Спин.
4. Преобразование спиноров при вращении системы координат
5. Уравнение Дирака для свободного электрона.
6. Уравнение Дирака для электрона в электромагнитном поле.
7. Оператор взаимодействия двух электронов с точностью  $(1/c)^2$ .
8. Атом. LS-связь и jj –связь
9. Понятие об обменной энергии.
10. Магнитный момент электрона и гиромагнитная аномалия спина.
11. Магнитный момент атома.
12. Спиновой обменный оператор Дирака.
13. Взаимодействие Ван Флека – Гайзенберга.
14. Локализованные невзаимодействующие моменты. Парамагнетизм
15. Ферромагнетизм в модели КюриВейсса. Приближение молекулярного (среднего) поля.
16. Динамика магнитной решётки ферромагнетика в приближении обменного взаимодействия (классическое рассмотрение).
17. Динамика магнитной решётки ферромагнетика в приближении обменного взаимодействия (квантовое рассмотрение).
18. Ферромагноны. Термодинамика газа ферромагнонов.
19. Релятивистские взаимодействия в ферромагнитном кристалле.
20. Магнитокристаллографическая анизотропия.
21. Энергия магнитокристаллографической анизотропии и энергия магнитодипольного взаимодействия.
22. Доменная структура ферромагнетика. Доменная стенка.
23. Энергия магнитодипольного взаимодействия многодоменного ферромагнетика.
24. Малые ферромагнитные частицы.
25. Намагничивание многодоменного ферромагнетика. Гистерезис.
26. Гирозлектрические и гиромагнитные свойства ферромагнетика, магнитооптика ферромагнетиков.
27. Обращение времени и теорема Крамерса.

### **6.2. Описание шкал оценивания**

Итоговый контроль качества усвоения аспирантами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания изученного материала;
- способности использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе аспирантом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые аспирант должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Зачет ставится при уровне знаний на оценку «удовлетворительно» и выше.



Оценка	Уровень подготовки
Отлично	<p>Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять</p>

	на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.
--	---

## 7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

### а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том III. «Квантовая механика». М. Наука. 2002.
2. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Л.П. Питаевский, курс "Теоретическая физика", Том IV. «Квантовая электродинамика». М., Наука 2001.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., курс "Теоретическая физика", Том VIII. «Электродинамика сплошных сред.» М. Наука. 1982.
4. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., курс "Теоретическая физика", Том IX. «Статистическая физика. Часть 2.» М. Наука. 1978.
5. Киттель Ч., Квантовая теория твердых тел. М.: Мир, 1967.

### б) дополнительная литература:

1. Боровик Е.С., Еременко В.В., Мильнер А.С. «Лекции по магнетизму». М.: Физматлит, 2005.
2. Успехи физических наук (<https://ufn.ru/ru/>)
3. Reviews of Modern Physics (RMP) (<https://journals.aps.org/rmp/>)
4. Physical Review B (PRB) (<https://journals.aps.org/prb/>)
5. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (<https://www.journals.elsevier.com/journal-of-magnetism-and-magnetic-materials>)
6. M.J. Donahue and D.G. Porter, "OOMMF User's Guide", Interagency Report NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, <http://math.nist.gov/oommf>

### в) факультативная литература

1. Р. Уайт. Квантовая теория магнетизма. М., Мир 1985.
2. А.И. Ахиезер, В.Г. Барьяхтар, С.В. Пелетминский. Спиновые волны. М., Наука 1967.
3. С.В. Вонсовский. Магнетизм. М., Наука 1971.
4. Г.С. Кринчик. Физика магнитных явлений. Изд-во МГУ 1985.
5. Дж. Смарт. Эффективное поле в теории магнетизма. М., Мир 1968.
6. С.В. Вонсовский. Магнетизм микрочастиц. М., Наука 1973.
7. У.Ф. Браун. Микромагнетизм. М., Наука
8. Физика магнитных явлений. Семинары: Учебное пособие/ сост. В.И.Ивановский, Л.А.Черникова, под ред. проф. Е.И.Кондорского. издательство МГУ. 1981.

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

### Использование программного обеспечения:

1. Microsoft Office Word.
2. Microsoft Office Excel.
3. Microsoft Office Power Point.
4. Free Origin Viewer.
5. Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) project

(<https://math.nist.gov/oommf/>)

## **9. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей аспиранты имеют возможность работать за компьютером с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

### **Составитель:**

Токман И.Д., к.ф.-м.н., с.н.с. отдела физики сверхпроводников ИФМ РАН

### **Рецензент:**

Курин В.В., д.ф.-м.н., зав. отделом физики сверхпроводников ИФМ РАН