Приложение 2

Утверждено Приказом ФИЦ КазНЦ РАН

от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_\_

Разработано и рекомендовано к утверждению

Ученым советом КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН

«22» января 2025 г., протокол №2

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Магнетизм низкоразмерных систем»**

Составная часть

**основной профессиональной образовательной программ**

**высшего образования -**

**программы подготовки научных и научно-педагогических кадров**

**в аспирантуре**

Научная специальность

**1.3.12. Физика магнитных явлений (физико-математические науки)**

**Содержание**

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения, трудоемкость дисциплины.

2. Перечень планируемых результатов обучения.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

4. Содержание дисциплины.

5. Учебно-тематический план занятий.

6. Формы текущего контроля, критерии оценки.

7. Перечень учебной литературы и ресурсов сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины.

8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины.

**1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения, трудоемкость дисциплины**

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия – 27 часов, самостоятельная работа – 92 часа, зачет - 1 час, всего – 120 часов.

Форма проведения аудиторных занятий – лекции, семинары и консультации.

В рамках часов самостоятельной работы по указанию преподавателя аспиранты прорабатывают темы и осваивают теоретические вопросы, излагаемые в лекционном курсе, а также самостоятельно изучают другие вопросы программы.

Формой итогового контроля является зачет.

**2. Перечень планируемых результатов обучения**

В результате освоения дисциплины выпускник должен

***Знать:***

- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач низкоразмерного магнетизма;

- роль и место теории магнетизма низкоразмерных систем в современной физике твердого тела, стадии ее эволюции и взаимосвязь с другими разделами физики;

- особенности научной терминологии, понятийный аппарат низкоразмерного магнетизма, используемые при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме;

- основы теории магнетизма низкоразмерных систем, в том числе искусственно созданных, классификацию таких систем и их специфические магнитные свойства;

- фундаментальные закономерности, связанные с формированием магнитных свойств низкоразмерных систем;

- существующие методы и методические подходы в научных исследованиях в области низкоразмерного магнетизма и возможные способы их развития;

***Уметь:***

- анализировать альтернативные варианты решения практических задач низкоразмерного магнетизма и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов;

- выбирать и применять при решении задач низкоразмерного магнетизма адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования;

- анализировать экспериментальные данные;

- использовать современную аппаратуру при проведении научных исследований;

***Владеть:***

- навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области низкоразмерного магнетизма;

- навыками анализа экспериментальных данных, полученных методами ЭПР и ЯМР для низкоразмерных систем.

- навыками критического анализа научной литературы с целью самостоятельного выбора направления исследования;

- навыками формулировки выводов по итогам проведенных исследований, экспериментов, наблюдений, измерений.

**3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Магнетизм низкоразмерных систем» является элективной и/или факультативной дисциплиной и включена в Блок «Образовательная компонента» основных профессиональных образовательных программ высшего образования – программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений. Обучение планируется на втором и/или третьем курсе.

Данная дисциплина базируется на знаниях и умениях, выработанных при прохождении общих профессиональных курсов по квантовой механике, термодинамике, электродинамике, материаловедению и спецкурсов в рамках магистерской программы образования или специалитета по физике. Аспирант должен обладать навыками самостоятельного освоения изучаемого материала.

**4. Содержание дисциплины**

**Целью**дисциплины «Магнетизм низкоразмерных систем» является изучение магнетизма низкоразмерных систем, в том числе искусственно созданных, влияния размерности на магнитные свойства, особенностей зависимости магнетизма таких систем от термодинамических параметров (температуры, магнитного поля давления), изучение влияния фрустрации обменных взаимодействий в системе, а также топологии системы на ее магнитные свойства. Предполагается освоение фундаментальных закономерностей, связанных с формированием магнитных свойств низкоразмерных систем, получение основных навыков анализа экспериментальных данных, полученных для таких систем. Актуальность курса обусловлена большой практической значимостью изучения низкоразмерного магнетизма для разработки современных материалов и устройств спинтроники, сенсорной техники, наноэлектроники, а также важностью исследований низкоразмерных спиновых систем для современной фундаментальной физики твердого тела. Дисциплина направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена по специальной дисциплине 1.3.12. Физика магнитных явлений.

**5. Учебно-тематический план занятий**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **п/п** | **Наименование темы** | **Аудит. занятия** | **Самост.**  **работа** | **Всего**  **часов** |
|  | **Магнитный момент иона. Взаимодействия между магнитными моментами.**  Орбитальный и спиновый магнитные моменты электрона. Оболочка многоэлектронного атома, LS и Jj связи, результирующий магнитный момент. Правила Хунда. Эффективный магнитный момент и магнитный момент насыщения. Магнитные моменты нуклонов и атомных ядер. Взаимодействия между магнитными моментами, некооперативный и кооперативный магнетизм. Иерархия обменных взаимодействий. Прямой и непрямой обмен. Энергия магнитного взаимодействия. РККИ взаимодействие. Суперобмен через ионы кислорода. 180о и 90о суперобмен. Правила Гуденафа, Канамори, Андерсена. Двойной обмен Зинера. | **3** | **12** | **17** |
|  | **Понятие о низкоразмерном магнетизме.**  Квантовые модели Изинга и Гейзенберга для системы взаимодействующих спинов. Модели XYи XXZ. Понятие о размерности магнитной системы. Понятие об основном состоянии магнитной системы. Ближний и дальний порядок. Понятие о фрустрации обменного взаимодействия. | **4** | **13** | **17** |
|  | **Одномерные магнитные системы.**  Спиновые цепочки с полуцелым спином. Цепочки с ферромагнитным и антиферромагнитным взаимодействием. Модель Изинга для одномерной цепочки. Теорема Мермина–Вагнера. Точное решение задачи Изинга в одномерном случае Модель Гейзенберга. Расчет Бонера–Фишера. Влияние магнитного поля. Цепочки с альтернированным обменом. Спин-Пайерлсовский переход. Цепочки с взаимодействием между ближайшими соседями и через соседа. Понятие о Томонага-Люттинджеровской жидкости. Основное состояние и возбуждения во фрустрированных цепочках в зависимости от параметра фрустрации. Индуцированные полем фазы. Цепочки с целым спином. Халдейновская щель.  Зигзаг-цепочки. Спиновые лестницы с четным и нечетным числом перемычек («ног»). | **4** | **13** | **17** |
|  | **Двумерные магнитные системы.**  Различные топологии двумерных магнитных систем. Точное решение задачи Изинга в двумерном случае. Двумерные решетки гейзенберговских спинов. Квадратная решетка с однородным обменом между ближайшими соседями. Решетка типа пчелиных сот с однородным обменом между ближайшими соседями. Треугольная решетка и решетка типа кагомэ – возникновение фрустраций. Понятие о спиновых вихрях в двумерной решетке. Учет влияния взаимодействия со следующим соседом: квадратная решетка с J1-J2 взаимодействиями. Влияние фрустрации в такой решетке. Модель типа «конфедератский флаг». Решетка типа пчелиных сот с взаимодействиями со следующим соседом. Возможные типы магнитных структур. Понятие о модели Китаева. Гамильтониан Халиуллина–Жакелия. | **4** | **13** | **17** |
|  | **Нульмерные спиновые системы.**  Изолированные ионы. Поведение магнитной восприимчивости и теплоемкости. Анизотропия изолированного иона. Магнитные димеры. Основное состояние димера. Понятие спиновой щели. Молекулярные спиновые кластеры. Квантовые точки. | **4** | **13** | **17** |
|  | **От нульмерных объектов к трехмерному магнетику**  Кластеры и магнитные частицы нано- и микроразмеров. Суперпарамагнетизм. Влияние формы частицы. Влияние спин-орбитального взаимодействия. Блокинг-температура. Влияние взаимодействия между частицами. Фаза Гриффица. | **4** | **13** | **17** |
|  | **Искусственно созданные низкоразмерные объекты. Размерные эффекты в магнитных частицах и проволоках.**  Магнитные плёнки и мультислои. Нанопроволоки. Графен. Графеновые и оксидные нанотрубки. Фуллерены.  Использование магнитно-силовой микроскопии для изучения магнитных частиц. Структура намагниченности в нано- и микрочастицах. Компьютерное моделирование структуры намагниченности в частицах. Перемагничивание частиц внешним магнитным полем. Перемагничивание частиц при воздействии на них импульсным лазерным излучением. Перемагничивание нанопроволок током высокой плотности (передача спинового момента, нагрев). Сверхплотная запись магнитной информации на частицах. | **4** | **13** | **17** |
|  | ЗАЧЕТ | **1** | **-** | **1** |
| ВСЕГО | | **28** | **92** | **120** |

**6. Формы текущего контроля, критерии оценки**

**6.1. Итоговый контроль:** формой итогового контроля по дисциплине является Зачет.

Текущий контроль освоения дисциплины проводится регулярно, начиная со второй недели обучения, в форме контроля посещаемости, устного опроса по теме, анализа результатов решения практических задач и выполненных лабораторных работ.

Промежуточный контроль подразумевает проведение коллоквиума по учебному материалу нескольких тем.

**Контрольные темы и вопросы для проведения текущего и итогового контроля:**

**Тема 1. Магнитный момент иона. Взаимодействия между магнитными моментами**

Орбитальный и спиновый магнитные моменты электрона. Оболочка многоэлектронного атома. Правила Хунда. Эффективный магнитный момент и магнитный момент насыщения. Взаимодействия между магнитными моментами, некооперативный и кооперативный магнетизм. Прямой и непрямой обмен. Суперобмен через ионы кислорода. Правила Гуденафа, Канамори, Андерсена.

**Тема 2. Понятие о низкоразмерном магнетизме**

Квантовые модели Изинга и Гейзенберга для системы взаимодействующих спинов. Понятие о размерности магнитной системы. Понятие об основном состоянии магнитной системы. Ближний и дальний порядок. Понятие о фрустрации обменного взаимодействия

**Тема 3. Одномерные магнитные системы**

Спиновые цепочки с полуцелым спином. Цепочки с ферромагнитным и антиферромагнитным взаимодействием. Модель Изинга для одномерной цепочки. Модель Гейзенберга. Спин-Пайерлсовский переход. Основное состояние и возбуждения во фрустрированных цепочках в зависимости от параметра фрустрации. Цепочки с целым спином. Спиновые лестницы.

**Тема 4. Двумерные магнитные системы**

Различные топологии двумерных магнитных систем. Квадратная решетка с однородным обменом между ближайшими соседями. Решетка типа пчелиных сот с однородным обменом между ближайшими соседями. Треугольная решетка и решетка типа кагомэ – понятие о геометрической фрустрации. Учет влияния взаимодействия со следующим соседом: квадратная решетка с J1-J2 взаимодействиями.

**Тема 5. Нульмерные спиновые системы**

Изолированные ионы. Магнитные димеры. Молекулярные спиновые кластеры. Квантовые точки.

**Тема 6. От нульмерных объектов к трехмерному магнетику**

Кластеры и магнитные частицы нано- и микроразмеров. Суперпарамагнетизм. Блокинг-температура.

**Тема 7. Искусственно созданные низкоразмерные объекты. Размерные эффекты в магнитных частицах и проволоках**

Магнитные плёнки и мультислои. Нанопроволоки. Графен. Графеновые и оксидные нанотрубки. Фуллерены. Использование магнитно-силовой микроскопии для изучения магнитных частиц. Перемагничивание частиц внешним магнитным полем и при воздействии на них импульсным лазерным излучением.). Сверхплотная запись магнитной информации на частицах.

**6.2. Критерии оценки итогового контроля:**

|  |  |
| --- | --- |
| Оценка | Требования к знаниям и критерии выставления  оценок: |
| **зачтено** | Аспирант при ответе демонстрирует знание тем учебной дисциплины, владеет основными понятиями и терминами, знает особенности развития соответствующей области науки, имеет представление о специфике объектов исследований. Информирован о современных направлениях работ, ознакомлен с содержанием основных литературных источников, способен делать анализ проблем и намечать пути их решения. |
| **не зачтено** | Аспирант демонстрирует плохое знание большей части основного материала в соответствующей области науки. Не информирован или слабо разбирается в проблемах, и не в состоянии наметить пути их решения. |

**При выборе аспирантом дисциплины «Магнетизм низкоразмерных систем» в качестве элективной, зачет по дисциплине является допуском к промежуточной аттестации – кандидатскому экзамену по специальной дисциплине.**

**7. Учебно-методическое обеспечение**

**7.1. Литература**

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. – М.: Наука, 1984.
2. Изюмов Ю.А., Кацнельсон М.И., Скрябин Ю.Н. Магнетизм коллективизированных электронов. – М.: Наука, 1994.
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978.

**7.2. Дополнительная литература**

1. Bonner J.C. and Fisher M.E. // Phys. Rev. – 1964. – V. 135. – P.A640.
2. Griffiths R.B. // Phys. Rev. – 1964. – V.133. – P.A768
3. Haldane F.D.M. // Phys. Rev. Lett. – 1983. –V. 50. – P.1153.
4. Mermin N.D. and Wagner H. // Phys. Rev. Lett. – 1966. – V.17. – P.1133.
5. Schulz T.D., Mattis D.C. and Lieb E.H. // Rev. Mod. Phys. –1964. – V.36. – P.856.
6. Мория Т. Спиновые флуктуации в магнетиках с коллективизированными электронами. Пер. с англ. О. А. Котельниковой и М. Ю. Николаева под ред. А. В. Ведяева. – М.: Мир, 1988.
7. Уайт Р. Квантовая теория магнетизма. – М.: Мир, 1985.

**7.3. Электронные ресурсы**

**I. НЕКОММЕРЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ БИБЛИОТЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ (ЭБС) СВОБОДНОГО ДОСТУПА**

* Библиотека международного издательства INTECHOPEN – http://www.intechopen.com/
* Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru
* Научная электронная библиотека КиберЛенинка http://www.cyberleninka.ru/
* Полнотекстовая электронная библиотека РФФИ http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library
* Электронная библиотека «Научное наследие России» http://www.e-heritage.ru/index.html
* Электронная библиотека ИФТТ РАН http://www.issp.ac.ru/libcatm/elib.html
* Электронная библиотека международного научно-образовательного сайта EqWorld – http://eqworld.ipmnet.ru/indexr.htm

**II. РЕФЕРАТИВНЫЕ БАЗЫ ДАННЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ И НАУЧНЫЕ ПОИСКОВЫЕ СИСТЕМЫ**

* ArXiv: Open access to 1,146,534 e-prints in Physics, Mathematics, Computer Science, Quantitative Biology, Quantitative Finance and Statistics (Электронный архив публикаций библиотеки Корнелльского университета) http://xxx.lanl.gov/archive
* Directory of Open Access Books (DOAB) http://doabooks.org/
* Directory of Open Access Journals (DOAJ) http://www.doaj.org
* Science Research Portal – научно-поисковая система, осуществляющая полнотекстовый поиск в журналах многих крупных научных издательств, таких как Elsevier, Highwire, IEEE, Nature, Taylor & Francis и др., в открытых научных базах данных: Directory of Open Access Journals, Library of Congress Online Catalog, Science.gov и Scientific News http://www.scienceresearch.com
* Международная реферативная база по физике, астрономии, теории частиц ADS(NASA) http://adsabs.harvard.edu/
* Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) http://elibrary.ru/project\_risc.asp

**III. ЖУРНАЛЫ И КНИГИ**

* List of Free Physics Books | Physics Database http://physicsdatabase.com/free-physics-book
* Nature Communications http://www.nature.com/ncomms/index.html
* New Journal of Physics http://iopscience.iop.org/journal/1367-2630
* Physical Review X http://journals.aps.org/prx/
* Physics Books – Free Computer Books http://www.freebookcentre.net/Physics/Physics-Books-Online.html
* Scientific Reports http://www.nature.com/srep/
* Журналы физико-технического института им А.Ф. Йоффе РАН: «Журнал технической физики», «Письма в журнал технической физики», «Физика твердого тела», «Физика и техника полупроводников» http://journals.ioffe.ru/
* Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН http://www.gpi.ru/trudgpi.php

**IV. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ И СПРАВОЧНЫЕ РЕСУРСЫ «ИНТЕРНЕТ»**

* ETH Zurich group about EPR http://www.epr.ethz.ch
* European community of Magnetism http://magnetism.eu
* International Society of Magnetic Resonance https://www.weizmann.ac.il/ISMAR/education
* Magnetic Resonance Imaging http://www.magnetic-resonance.org
* Molecular magnetism http://www.molmag.de
* Библиотека Гумер. Гуманитарные науки. http://www.gumer.info/bibliotek\_Buks/Pedagog/
* Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» http://window.edu.ru/
* Информационная справочно-правовая система «Консультант плюс» http://www.consultant.ru/ (некоммерческая версия)
* Российское магнитное общество http://www.amtc.ru/mago/
* Специализированный портал по информационно-коммуникационным технологиям в образовании http://www.ict.edu.ru/
* Справочно-информационный портал ГРАМОТА.РУ http://www.gramota.ru/
* Техническая библиотека http://techlibrary.ru/
* Федеральный портал «Российское образование» www.edu.ru

**8. Описание материально-технической базы, необходимой для освоения дисциплины**

Аудиторные занятия, самостоятельная работа по освоению дисциплины и подготовка к сдаче зачета и кандидатского экзамена проводятся в специальных помещениях (читальный зал научной библиотеки, лабораторные комнаты), оборудованных мебелью (столы, стулья), компьютерами с доступом к сети Интернет, демонстрационным оборудованием.

Обучение по дисциплине ведётся с применением как традиционных методов (лекции, лабораторные работы), так и с использованием инновационных подходов: активное участие аспирантов в научных семинарах подразделений КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН по профилю подготовки, представление докладов на научной конференции молодых ученых КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН и молодежных научных школах, подготовка научных статей, подготовка презентаций по литературе для дополнительного изучения.

Аудиторные занятия, целью которых является освоение теоретических основ дисциплины, проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного оборудования. Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия. Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала.

В ходе лабораторных занятий аспирантам предоставляется возможность изучить специфику экспериментальных исследований поверхности с помощью методов сканирующей зондовой микроскопии, познакомится с принципами работы и возможностями современной экспериментальной аппаратуры и оборудования, используемых при проведении научных исследований в области исследований поверхности, получить практические навыки интерпретации экспериментальных результатов.

Самостоятельная работа аспирантов подразумевает углубленное освоение теоретического материала, выполнение индивидуальных заданий, подготовку к текущему, промежуточному и итоговому контролю успеваемости. В целях формирования способности к критическому анализу информации и поиску путей решения поставленных задач в дальнейшей профессиональной деятельности используется технология проблемного обучения, требующая значительных временных ресурсов, что предусмотрено структурой дисциплины, и предполагает самостоятельную проработку учебно-проблемных задач аспирантами, выполняемую с привлечением основной и дополнительной литературы; поиск необходимой научно-технической информации в открытых источниках, консультации с преподавателем.

Самостоятельная работа аспирантов осуществляется: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на персональных рабочих местах аспирантов с доступом к ресурсам «Интернет», в научных подразделениях КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН с доступом к лабораторному оборудованию и приборам.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, ресурсы «Интернет».

**Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

- библиотека с читальным залом, книжный фонд которой составляет специализированная методическая и учебная литература, научная периодика;

- зал, оснащённый стационарным проектором, экраном и обычной доской – для проведения лекционных занятий;

- учебная аудитория, оснащенная переносными проектором и экраном для проведения практических занятий;

- индивидуальные рабочие места аспирантов, оснащенные персональным компьютерами с доступом к сети «Интернет», локальной сети и электронной информационно-образовательной среде ФИЦ КазНЦ РАН.

В учебном процессе аспиранты используют современное научное оборудование профильных подразделений КФТИ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН:

* Импульсный спектрометр ЯМР Avance 400;
* Импульсный спектрометр ЯКР и ЯМР Redstone Tecmag с резистивным магнитом 0.1–1.6Т и криостатом 3.5–350К
* Импульсные спектрометры ЭПР Elexsys E-580 и Elexsys E680, работающие в X-, Q- и W-диапазонах. Спектрометры позволяют записывать спектры ЭПР как в стандартном режиме с модуляцией внешнего магнитного поля, так и в виде зависимости амплитуды электронного спинового эха от величины магнитного поля, измерять времена спин-решеточной и спин-спиновой релаксаций, проводить эксперименты в режимах импульсных двойных электронно-ядерного и электрон-электронного резонансов, проводить одномерные и двумерные измерения модуляции огибающей амплитуды электронного эха.
* Спектрометр EMXplus 2007 г. вып, для исследования в стационарном режиме стабильных парамагнитных центров в X-диапазоне.
* Спектрометр ELESXYS E540 2007 г. вып., работающий в L-диапазоне на частоте 1 ГГц, снабженный устройством для ЭПР-томографии и оптимизированный для исследования биологических объектов.