

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 8**

### **УТВЕРЖДЕНО**

приказом ФИЦ КазНЦ РАН

от 01.03.2019 № 9-А

Разработано и рекомендовано к утверждению  
Ученым советом

КФТИ - обособленного структурного  
подразделения ФИЦ КазНЦ РАН

28 ноября 2018 г., протокол № 33

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«Магнетизм низкоразмерных систем»**

Уровень высшего образования

Подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки

#### **03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ**

Направленность подготовки:

01.04.11 – Физика магнитных явлений

Квалификация выпускника:

Исследователь. Преподаватель-исследователь

### **Содержание:**

1. Виды учебной деятельности, способ и формы ее проведения.
2. Перечень планируемых результатов обучения.
3. Место дисциплины в структуре образовательной программы.
4. Трудоемкость дисциплины.
5. Содержание дисциплины.
6. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, фонд оценочных средств.
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**

Виды учебной деятельности: аудиторные занятия 1 зачетная единица труда (36 часов), самостоятельная работа 6 зачетных единиц труда (216 часов), всего 7 зачетных единиц труда (252 часа).

Форма проведения аудиторных занятий – лекции и семинары.

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.

## **2. Перечень планируемых результатов обучения**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

### ***универсальных***

- способность 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);
- способность 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);
- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);

### ***общепрофессиональных***

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

### ***профессиональных***

- способность проводить самостоятельные исследования в области физики магнитных явлений, владеть современными методами физического эксперимента, а также способность анализировать экспериментальные данные с целью исследования природы взаимовлияния сверхпроводимости и магнетизма, физических явлений в парамагнетиках, ферромагнетиках, в соединениях с магнитными фазовыми переходами, особенностей магнетизма в сильнокоррелированных электронных системах и нанобъектах (ПК-1);
- способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области физики магнитных явлений (ПК-3).

В результате освоения дисциплины аспирант должен

**Знать:**

➤ методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач низкоразмерного магнетизма (*шифр формируемого результата обучения З(УК-1)-1*);

➤ роль и место теории магнетизма низкоразмерных систем в современной физике твердого тела, стадии ее эволюции и взаимосвязь с другими разделами физики (*шифр формируемого результата обучения З(УК-2)-2*);

➤ особенности научной терминологии, понятийный аппарат низкоразмерного магнетизма, используемые при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме (*шифр формируемого результата обучения З(УК-3)-1*);

➤ основы теории магнетизма низкоразмерных систем, в том числе искусственно созданных, классификацию таких систем и их специфические магнитные свойства (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-1)-1*);

➤ фундаментальные закономерности, связанные с формированием магнитных свойств низкоразмерных систем (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-1)-1*);

➤ существующие методы и методические подходы в научных исследованиях в области низкоразмерного магнетизма и возможные способы их развития (*шифр формируемого результата обучения З(ПК-3)-1*);

**Уметь:**

➤ анализировать альтернативные варианты решения практических задач низкоразмерного магнетизма и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (*шифр формируемого результата обучения У(УК-1)-1*);

➤ выбирать и применять при решении задач низкоразмерного магнетизма адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования (*шифр формируемого результата обучения У(ОПК-1)-1*);

**Владеть:**

➤ навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области низкоразмерного магнетизма (*шифр формируемого результата обучения (ОПК-1)-1*);

➤ навыками анализа экспериментальных данных, полученных методами ЭПР и ЯМР для низкоразмерных систем (*шифр формируемого результата обучения В(ПК-1)-1*).

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

**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.

Дисциплина относится к *дисциплинам по выбору*, входит в состав Блока 1 «Дисциплины (модули)» и относится к вариативной части ОПОП аспирантуры по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (профиль) 01.04.11 «Физика магнитных явлений». Индекс (по учебному плану) – **Б1.В.ДВ2**. Дисциплина изучается в 3 и 4 семестрах.

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.

Материал, изучаемый в ходе освоения дисциплины, в значительной мере дополняет и расширяет ряд разделов обязательной дисциплины «Физика магнитных явлений».

В курсе используются представления смежных областей физики: квантовой механики, термодинамики, электродинамики, материаловедения.

#### 4. Трудоемкость дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц, в том числе **2 ЗЕ** аудиторных занятий и **5 ЗЕ** самостоятельной работы.

№	Дисциплина	Курс	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Самостоятельная работа
1	Магнетизм низкоразмерных систем	2	20	8	8	216

#### 5. Содержание дисциплины

##### 5.1. Лекционные занятия

*(аудиторная нагрузка 20 часов, самостоятельная работа 120 часов)*

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
1.	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 не прямой обмен. Энергия магнитного взаимодействия. РККИ взаимодействие. Суперобмен через ионы кислорода. 180° и 90° суперобмен. Правила Гуденафа, Канамори, Андерсена. Двойной обмен Зинера.
2.	Понятие о низкоразмерном магнетизме.	Квантовые модели Изинга и Гейзенберга для системы взаимодействующих спинов. Модели XY и XXZ. Понятие о размерности магнитной системы. Понятие об основном состоянии магнитной системы. Ближний и дальний порядок. Понятие о фрустрации обменного взаимодействия.
3.	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.	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.
5.	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.
6.	От нульмерных объектов к трехмерному магнетизму	Кластеры и магнитные частицы нано- и микроразмеров. Суперпарамагнетизм. Влияние формы частицы. Влияние спин-орбитального взаимодействия. Блокинг-температура. Влияние взаимодействия между частицами. Фаза Гриффица.
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. 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.
--	--	---

### **5.2. Лабораторные занятия**

*(аудиторная нагрузка 8 часов, самостоятельная работа 48 часов)*

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование раздела дисциплины</b>	<b>Примеры выполняемых экспериментальных работ</b>
1	Одномерные магнитные цепочки.	Анализ и моделирование температурной зависимости восприимчивости одномерной магнитной цепочки.
2	Суперпарамагнитные частицы.	Анализ температурной зависимости восприимчивости и спектров ЭПР суперпарамагнетика. Определение температуры блокировки

### **5.3. Практические занятия**

*(аудиторная нагрузка 8 часов, самостоятельная работа 48 часов)*

<b>№ п/п</b>	<b>Наименование раздела дисциплины</b>	<b>Тематика семинаров</b>
1.	Одномерные магнитные системы	Примеры и методы исследования спиновых цепочек и лестниц при помощи ЯМР и ЭПР.
2	Двумерные магнитные системы.	Примеры и методы исследования двумерных спиновых структур при помощи ЯМР и ЭПР.
3.	Нульмерные спиновые системы.	Исследование молекулярных магнетиков при помощи ЯМР и ЭПР
4	Искусственно созданные низкоразмерные структуры.	Строение и свойства графена.

## **6. Формы текущего контроля и промежуточной аттестации, фонд оценочных средств**

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.

Формой итогового контроля по дисциплине является зачет.

## **6.1. 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 не прямой 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 J<sub>1</sub>-J<sub>2</sub> взаимодействиями.

### **Тема 5. Нульмерные спиновые системы**

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

### **Тема 6. От нульмерных объектов к трехмерному магнетизму**

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 и шкала оценивания результатов освоения дисциплины:

№ п/п	Результат освоения дисциплины	Балл	Показатели оценивания
<b>Знание</b>			
1.	методов критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач в низкоразмерного магнетизма	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
2.	роли и места теории магнетизма низкоразмерных систем в современной физике твердого тела, стадий ее эволюции и взаимосвязи с другими разделами физики;	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
3.	особенностей научной терминологии, понятийного аппарата низкоразмерного магнетизма, используемых при представлении результатов научной деятельности в устной и письменной форме	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
4.	основ теории магнетизма низкоразмерных систем, в том числе искусственно созданных, классификацию таких систем и их специфические магнитные свойства	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
5.	фундаментальных закономерностей, связанных с формированием магнитных свойств низкоразмерных систем	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания

		3	высокий уровень знания
б.	существующих методов и методических подходов в научных исследованиях в области низкоразмерного магнетизма и возможных способов их развития	1	недостаточный уровень знания
		2	достаточный уровень знания
		3	высокий уровень знания
<b>Умение</b>			
1.	анализировать альтернативные варианты решения практических задач низкоразмерного магнетизма и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	1	не умеет
		2	частично освоенное умение
		3	сформированное умение
2.	выбирать и применять при решении задач низкоразмерного магнетизма адекватные экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования	1	не умеет
		2	частично освоенное умение
		3	сформированное умение
<b>Владение</b>			
1.	навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных) и критического анализа информации в области низкоразмерного магнетизма	1	не владеет
		2	частично освоенные навыки
		3	сформированные навыки
2.	навыками анализа экспериментальных данных, полученных методами ЭПР и ЯМР для низкоразмерных систем	1	не владеет
		2	частично освоенные навыки
		3	сформированные навыки
<b>Итого баллов</b>		20–30	«зачтено»
		менее 20	«не зачтено»

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

### 7.1. ОСНОВНАЯ 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. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ»**

### **7.3.1. НЕКОММЕРЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ БИБЛИОТЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ (ЭБС) СВОБОДНОГО ДОСТУПА**

- Библиотека международного издательства INTECHOPEN – <http://www.intechopen.com/>
- Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU [www.elibrary.ru](http://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>

### **7.3.2. 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](http://elibrary.ru/project_risc.asp)

### 7.3.3. 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. Иоффе 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>

### 3.4. 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/](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](http://www.edu.ru)

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

Обучение по дисциплине ведётся с применением как традиционных методов (лекции, практические занятия, 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.

Практические занятия (семинары) имеют своей целью освоение расчетно-теоретических методов, используемых при решении задач в области низкоразмерного магнетизма, а также развития навыков рационального выбора методов решения.

В ходе лабораторных занятий аспирантам предоставляется возможность изучить специфику экспериментальных исследований в области низкоразмерного магнетизма, познакомиться с принципами работы и возможностями современной экспериментальной аппаратуры и оборудования, используемых при проведении научных исследований в области низкоразмерного магнетизма, 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.
- Спектрометр ЭПР, работающий в диапазоне частот 65–535 ГГц. Оснащен лазерным источником излучения, интерферометром, дифракционной решёткой, фотоумножителем и многоэлементными приёмниками излучения.
- Спектрометр оптико-магнитного резонанса с возможностью оптического детектирования ЭПР. Спектрометр позволяет в температурном диапазоне 2–300 К измерять оптические спектры поглощения, люминесценции, возбуждения люминесценции, исследовать ап-конверсионные процессы, осуществлять

оптическое детектирование ЭПР (ОДЭПР) и двойного электронно-ядерного резонанса (ОДДЭЯР). Диапазон длин волн оптического излучения: 200–2000 нм, частота микроволнового излучения 9.0–37.0 ГГц, частота накачки ядерных спинов 1–1000 МГц.

➤ Время-разрешенный ЭПР-спектрометр X-диапазона, созданный на основе спектрометра ЭПР ER 200E производства фирмы «Bruker», Германия, в 2006 г. Спектрометр снабжен импульсным наносекундным лазером и модернизирован для изучения временной эволюции сигналов короткоживущих состояний с временным разрешением ~ 80 нс.

➤ Спектрометр ЭПР BER 418 S производства фирмы «Bruker», Германия, в 2008 г. оснащен специализированным криостатом производства РИЦ "Курчатовский институт", позволяющим проводить измерения при сверхнизких температурах до 0,4 К.