

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности КФУ

Проф. Д. А. Таюрский

» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

## **Программа дисциплины**

Механизмы магнитной релаксации

Направление подготовки: 03.04.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: Физика магнитных явлений

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2017

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО
2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий
  - 4.1. Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)
  - 4.2. Содержание дисциплины (модуля)
5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)
6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)
7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)
9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)
10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)
11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)
12. Средства адаптации преподавания дисциплины (модуля) к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья
13. Приложение №1. Фонд оценочных средств
14. Приложение №2. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
15. Приложение №3. Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. (доцент) Дуглав А.В. (Кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии, Высшая школа киберфизических систем и прикладной электроники), Alexander.Dooglav@kpfu.ru

### 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль), должен обладать следующими компетенциями:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОПК-3	Способность к свободному владению знаниями фундаментальных разделов физики и радиофизики, необходимых для решения научно-исследовательских задач
ПК-1	Способность использовать в своей научно-исследовательской деятельности знание современных проблем и новейших достижений физики и радиофизики
ПК-2	Способность самостоятельно ставить научные задачи в области физики и радиофизики (в соответствии с профилем подготовки) и решать их с использованием современного оборудования и новейшего отечественного и зарубежного опыта
ПК-4	Способность внедрять результаты прикладных научных исследований в перспективные приборы, устройства и системы, основанные на колебательно-волновых принципах функционирования

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль):

Должен знать:

Основные механизмы и процессы электронной и ядерной спин-решеточной релаксации.

Должен уметь:

Оценивать скорость ядерной и электронной релаксации за счет различных процессов релаксации.

Должен владеть:

методами расчета скорости спин-решеточной релаксации в рамках различных механизмов релаксации

Должен демонстрировать способность и готовность:

углубленного самостоятельного изучения появляющихся новых подходов к изучению механизмов и процессов магнитной релаксации.

### 2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Данная дисциплина (модуль) включена в раздел "Б1.В.ОД.1 Дисциплины (модули)" основной профессиональной образовательной программы 03.04.03 "Радиофизика (Физика магнитных явлений)" и относится к обязательным дисциплинам.

Осваивается на 1 курсе в 2 семестре.

### 3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных(ые) единиц(ы) на 72 часа(ов).

Контактная работа - 28 часа(ов), в том числе лекции - 14 часа(ов), практические занятия - 14 часа(ов), лабораторные работы - 0 часа(ов), контроль самостоятельной работы - 0 часа(ов).

Самостоятельная работа - 44 часа(ов).

Контроль (зачёт / экзамен) - 0 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины: зачет во 2 семестре.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1 Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)

N	Разделы дисциплины / модуля	Семестр	Виды и часы контактной работы, их трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.	2	1	1	0	2
2.	Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.	2	1	1	0	2
3.	Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.	2	2	2	0	8
4.	Тема 4. Явление узкого фононного горла.	2	1	1	0	2
5.	Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.	2	1	1	0	6
6.	Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.	2	2	2	0	6
7.	Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.	2	1	1	0	4
8.	Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках.	2	2	2	0	6
9.	Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.	2	1	1	0	4
10.	Тема 10. Релаксация ядер диамагнитных атомов в магнитно-упорядоченных диэлектрических кристаллах.	2	1	1	0	2
11.	Тема 11. Ядерная релаксация в жидкости.	2	1	1	0	2
	Итого		14	14	0	44

#### 4.2 Содержание дисциплины (модуля)

##### Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.

Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса. Взаимодействие спинов с полем электромагнитного излучения. Скорость спин-решеточной релаксации в двухуровневой системе. Спин-решеточная релаксация в многоуровневой системе в приближении высоких температур.

##### Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.

Взаимодействие спинов с полем теплового электромагнитного излучения. Скорость спин-решеточной релаксации в двухуровневой системе.

##### Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.

Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов. Механизм релаксации Валлера. Прямой и рамановский процессы спин-решеточной релаксации. Механизм электронной СРР Кронига-Ван-Флека. Приближение Орбаха. Прямой процесс. Релаксация парамагнитных ионов с четным и нечетным числом электронов. Двухфононный процесс релаксации через возбужденное состояние электронной оболочки (процесс Орбаха-Аминова). Двухфононный Рамановский процесс.

#### **Тема 4. Явление узкого фононного горла.**

Явление узкого фононного горла. Теплоемкость фононов резонансной частоты в полосе ширины линии ЭПР и теплоемкость спиновой системы. Релаксация в условиях фононного узкого горла. Фононная лавина.

#### **Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.**

Механизм ядерной спин-решеточной релаксации в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленный модуляцией градиента КЭП. Квадрупольные моменты ядер. Взаимодействие с колебаниями решетки. Экспериментальное доказательство эффективности этого механизма.

#### **Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.**

Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами. Изолированная электронно-ядерная пара. Подход, основанный на модели случайного поля. Подход, основанный на перемешивании электронно-ядерных состояний.

#### **Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.**

Ядерная спиновая диффузия. Спин-решеточная релаксация системы ядерных спинов, обусловленная не взаимодействующими между собой парамагнитными центрами. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Понятие о диполь-дипольном резервуаре. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси. Экспериментальные доказательства существования этого механизма.

#### **Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках.**

Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках. Солид-эффект при хорошем спектральном разрешении. Достижимая степень поляризации ядер.

#### **Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.**

Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах. Модель свободных электронов. Восприимчивость Паули. Найтовский сдвиг. Соотношение Корринги.

#### **Тема 10. Релаксация ядер диамагнитных атомов в магнитно-упорядоченных диэлектрических кристаллах.**

Диссипация энергии магнитных колебаний и процессы релаксации в магнитоупорядоченных веществах. Спин-решеточная релаксация.

#### **Тема 11. Ядерная релаксация в жидкости.**

Ядерная релаксация в системе движущихся спинов. Матрица плотности и функция корреляции, спектральная плотность. Теория Блоха-Вангнесса-Редфилда.

#### **5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)**

Самостоятельная работа обучающихся выполняется по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Самостоятельная работа подразделяется на самостоятельную работу на аудиторных занятиях и на внеаудиторную самостоятельную работу. Самостоятельная работа обучающихся включает как полностью самостоятельное освоение отдельных тем (разделов) дисциплины, так и проработку тем (разделов), осваиваемых во время аудиторной работы. Во время самостоятельной работы обучающиеся читают и конспектируют учебную, научную и справочную литературу, выполняют задания, направленные на закрепление знаний и отработку умений и навыков, готовятся к текущему и промежуточному контролю по дисциплине.

Организация самостоятельной работы обучающихся регламентируется нормативными документами, учебно-методической литературой и электронными образовательными ресурсами, включая:

Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры (утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 5 апреля 2017 года №301)

Письмо Министерства образования Российской Федерации №14-55-996ин/15 от 27 ноября 2002 г. "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений"

Устав федерального государственного автономного образовательного учреждения "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Правила внутреннего распорядка федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Локальные нормативные акты Казанского (Приволжского) федерального университета

## **6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)**

Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) включает оценочные материалы, направленные на проверку освоения компетенций, в том числе знаний, умений и навыков. Фонд оценочных средств включает оценочные средства текущего контроля и оценочные средства промежуточной аттестации.

В фонде оценочных средств содержится следующая информация:

- соответствие компетенций планируемым результатам обучения по дисциплине (модулю);
- критерии оценивания сформированности компетенций;
- механизм формирования оценки по дисциплине (модулю);
- описание порядка применения и процедуры оценивания для каждого оценочного средства;
- критерии оценивания для каждого оценочного средства;
- содержание оценочных средств, включая требования, предъявляемые к действиям обучающихся, демонстрируемым результатам, задания различных типов.

Фонд оценочных средств по дисциплине находится в Приложении 1 к программе дисциплины (модулю).

## **7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

Освоение дисциплины (модуля) предполагает изучение основной и дополнительной учебной литературы. Литература может быть доступна обучающимся в одном из двух вариантов (либо в обоих из них):

- в электронном виде - через электронные библиотечные системы на основании заключенных КФУ договоров с правообладателями;

- в печатном виде - в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского. Обучающиеся получают учебную литературу на абонементе по читательским билетам в соответствии с правилами пользования Научной библиотекой.

Электронные издания доступны дистанционно из любой точки при введении обучающимся своего логина и пароля от личного кабинета в системе "Электронный университет". При использовании печатных изданий библиотечный фонд должен быть укомплектован ими из расчета не менее 0,5 экземпляра (для обучающихся по ФГОС 3++ - не менее 0,25 экземпляра) каждого из изданий основной литературы и не менее 0,25 экземпляра дополнительной литературы на каждого обучающегося из числа лиц, одновременно осваивающих данную дисциплину.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля), находится в Приложении 2 к рабочей программе дисциплины. Он подлежит обновлению при изменении условий договоров КФУ с правообладателями электронных изданий и при изменении комплектования фондов Научной библиотеки КФУ.

## **8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Википедия - <http://ru.wikipedia.org>

Все для студента - <http://www.twirpx.com/>

Научная библиотека им. Н.И.Лобачевского - [http://www.kpfu.ru/main\\_page?p\\_sub=5056](http://www.kpfu.ru/main_page?p_sub=5056)

Электронно-библиотечная система - <http://ibooks.ru>

Электронные книги - <http://eknigi.org/>

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

В принципе сведения о механизмах магнитной релаксации можно почерпнуть из рекомендованных учебников и монографий. Изучение материала значительно облегчается при посещении лекций: преподаватель уже тщательно обдумал порядок и форму изложения материала, что очень облегчает студентам его усвоение. На лекциях студентам следует обращать особое внимание на логику излагаемого материала, не лениться записывать словесные связи между приводимыми или выводимыми математическими формулами. При подготовке к тестам и контрольным работам следует учесть, что в задачах и тестах, посвященных определенным темам, необходимо использовать знания, полученные при изучении предыдущего материала.

При устном опросе не следует стремиться изложить материал всей лекции, следует выделить главное и дать короткий, но исчерпывающий ответ. То же следует делать и при тестировании.

При написании контрольной работы и тестов расчеты следует делать подробно, с сохранением всех промежуточных результатов. Это в случае неудачи поможет при разборе контрольной установить, где студент ошибся и как ошибка повлияла на конечный результат.

### **10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем, представлен в Приложении 3 к рабочей программе дисциплины (модуля).

### **11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине (модулю) включает в себя следующие компоненты:

Помещения для самостоятельной работы обучающихся, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья) и оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду КФУ.

Учебные аудитории для контактной работы с преподавателем, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья).

Компьютер и принтер для распечатки раздаточных материалов.

Мультимедийная аудитория.

Специализированная лаборатория.

Специализированная лаборатория.

Специализированная лаборатория.

### **12. Средства адаптации преподавания дисциплины к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья**

При необходимости в образовательном процессе применяются следующие методы и технологии, облегчающие восприятие информации обучающимися инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья:

- создание текстовой версии любого нетекстового контента для его возможного преобразования в альтернативные формы, удобные для различных пользователей;
- создание контента, который можно представить в различных видах без потери данных или структуры, предусмотреть возможность масштабирования текста и изображений без потери качества, предусмотреть доступность управления контентом с клавиатуры;
- создание возможностей для обучающихся воспринимать одну и ту же информацию из разных источников - например, так, чтобы лица с нарушениями слуха получали информацию визуально, с нарушениями зрения - аудиально;
- применение программных средств, обеспечивающих возможность освоения навыков и умений, формируемых дисциплиной, за счёт альтернативных способов, в том числе виртуальных лабораторий и симуляционных технологий;

- применение дистанционных образовательных технологий для передачи информации, организации различных форм интерактивной контактной работы обучающегося с преподавателем, в том числе вебинаров, которые могут быть использованы для проведения виртуальных лекций с возможностью взаимодействия всех участников дистанционного обучения, проведения семинаров, выступления с докладами и защиты выполненных работ, проведения тренингов, организации коллективной работы;
- применение дистанционных образовательных технологий для организации форм текущего и промежуточного контроля;
- увеличение продолжительности сдачи обучающимся инвалидом или лицом с ограниченными возможностями здоровья форм промежуточной аттестации по отношению к установленной продолжительности их сдачи:
- продолжительности сдачи зачёта или экзамена, проводимого в письменной форме, - не более чем на 90 минут;
- продолжительности подготовки обучающегося к ответу на зачёте или экзамене, проводимом в устной форме, - не более чем на 20 минут;
- продолжительности выступления обучающегося при защите курсовой работы - не более чем на 15 минут.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и учебным планом по направлению 03.04.03 "Радиофизика" и магистерской программе "Физика магнитных явлений".



Приложение 2  
к рабочей программе дисциплины (модуля)  
Б1.В.ОД.1 Механизмы магнитной релаксации

**Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

Направление подготовки: 03.04.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: Физика магнитных явлений

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2017

**Основная литература:**

1. Сергеев, Н. А. Основы квантовой теории ядерного магнитного резонанса : монография / Н. А. Сергеев, Д. С. Рябушкин. - М. : Логос, 2013. - 272 с. - ISBN 978-5-98704-754-5 <http://znanium.com/bookread.php?book=469025>
2. Минько, Н. И. Методы получения и свойства нанобъектов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Н. И. Минько, В. В. Строкова, И. В. Жерновский, В. М. Нарцев. - 2-е изд., стер. - М. : ФЛИНТА, 2013. - 165 с. - ISBN 978-5-9765-0326-7 <http://znanium.com/bookread.php?book=462886>
3. Травень, В. Ф. Органическая химия. Том 2 [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов : в 3 т. / В. Ф. Травень. - 3-е изд. (эл.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 517 с.: ил. - (Учебник для высшей школы). - ISBN 978-5-9963-2110-0 (Т. II), ISBN 978-5-9963-0357-1. <https://e.lanbook.com/book/84109>

**Дополнительная литература:**

1. А.Абрагам, Б.Блини. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М.: Мир, 1973, т.1.
2. А.Абрагам. Ядерный магнетизм. М.: ИЛ, 1963.
3. А.Абрагам, М.Гольдман. Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок. М.: Мир, 1984, т.2
4. Ч.Сликтер. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1981.
5. А.Г.Гуревич. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
6. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
7. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. М.: Мир, 1965.
8. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
9. Основы квантовой теории ядерного магнитного резонанса [Электронный ресурс] : монография / Н.А. Сергеев, Д.С. Рябушкин - М. : Логос, 2013. - <http://www.studmedlib.ru/book/ISBN9785987047545.html>

Приложение 3  
к рабочей программе дисциплины (модуля)  
Б1.В.ОД.1 Механизмы магнитной релаксации

**Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем**

Направление подготовки: 03.04.03 - Радиофизика

Профиль подготовки: Физика магнитных явлений

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2017

Освоение дисциплины (модуля) предполагает использование следующего программного обеспечения и информационно-справочных систем:

Операционная система Microsoft Windows 7 Профессиональная или Windows XP (Volume License)

Пакет офисного программного обеспечения Microsoft Office 365 или Microsoft Office Professional plus 2010

Браузер Mozilla Firefox

Браузер Google Chrome

Adobe Reader XI или Adobe Acrobat Reader DC

Kaspersky Endpoint Security для Windows

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, учебно-методические комплексы, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.