

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



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор  
по образовательной деятельности КФУ  
Проф. Минзарипов Р.Г.

\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Программа дисциплины**  
Механизмы магнитной релаксации М2.В.1

Направление подготовки: 011800.68 - Радиофизика

Профиль подготовки: Физика магнитных явлений

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Дуглав А.В.

**Рецензент(ы):**

-

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой:

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No

Казань  
2014

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) доцент, к.н. (доцент) Дуглав А.В. Кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии Отделение радиофизики и информационных систем, Alexander.Dooglav@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины " Механизмы магнитной релаксации " являются:

- получение детального представления об основных механизмах и процессах электронной и ядерной спин-решеточной релаксации;
- получение навыков оценки скорости ядерной и электронной релаксации за счет различных процессов релаксации.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " М2.В.1 Профессиональный" основной образовательной программы 011800.68 Радиофизика и относится к вариативной части. Осваивается на 1 курсе, 2 семестр.

Профессиональный цикл М2. Необходимые "входные" знания: курс по физике конденсированного состояния, курс по радиоспектроскопии. Освоение данной дисциплины необходимо для всех последующих курсов, в которых рассматриваются методы исследования, связанные с измерениями релаксационных характеристик парамагнитных систем.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-1 (общекультурные компетенции)	способностью оперировать углубленными знаниями в области математики и естественных наук
ОК-10 (общекультурные компетенции)	способностью использовать базовые знания и навыки управления информацией для решения исследовательских профессиональных задач, соблюдать основные требования информационной безопасности, защиты государственной тайны
ОК-3 (общекультурные компетенции)	способностью самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности знания и умения, в том числе в новых областях, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять своё научное мировоззрение
ОК-8 (общекультурные компетенции)	способностью к коммуникации в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободное владение русским и, по крайней мере, одним из иностранных языков, как средством делового общения
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью к свободному владению знаниями фундаментальных разделов физики и радиофизики, необходимыми для решения научно- исследовательских задач (в соответствии со своим профилем подготовки)

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-2 (профессиональные компетенции)	способностью к свободному владению профессионально-профилированными знаниями в области информационных технологий, использованию современных компьютерных сетей, программных продуктов и ресурсов Интернет для решения задач профессиональной деятельности, в том числе находящихся за пределами профильной подготовки
ПК-5 (профессиональные компетенции)	способностью применять на практике навыки составления и оформления научно-технической документации, научных отчетов, обзоров, докладов и статей (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-8 (профессиональные компетенции)	способностью составлять обзоры перспективных направлений научно-инновационных исследований, готовностью к написанию и оформлению патентов в соответствии с правилами

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

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

2. должен уметь:

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

3. должен владеть:

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

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

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

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

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет во 2 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.	2	1	1	1	0	домашнее задание
2.	Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.	2	2	1	1	0	
3.	Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.	2	3-4	2	2	0	тестирование
4.	Тема 4. Явление узкого фононного горла.	2	5	1	1	0	
5.	Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамагнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.	2	6-7	2	2	0	
6.	Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.	2	8-9	2	2	0	
7.	Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.	2	10	1	1	0	

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
8.	Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамагнитных атомов в твердых диэлектриках.	2	11-12	2	2	0	тестирование
9.	Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.	2	13-14	2	2	0	
10.	Тема 10. Релаксация ядер диамагнитных атомов в магнитно-упорядоченных диэлектрических кристаллах.	2	15	1	1	0	
11.	Тема 11. Ядерная релаксация в жидкости.	2	16	1	1	0	
	Тема . Итоговая форма контроля	2		0	0	0	зачет
	Итого			16	16	0	

#### 4.2 Содержание дисциплины

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

###### **лекционное занятие (1 часа(ов)):**

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.

###### **практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет  $T_1$  для двухуровневой системы.

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

###### **лекционное занятие (1 часа(ов)):**

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

###### **практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет  $T_1$  при релаксации за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.

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

###### **лекционное занятие (2 часа(ов)):**

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.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет скорости релаксации в механизме Кронига-Ван-Флека, прямой процесс, для парамагнитных ионов с четным и нечетным числом электронов.

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

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

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.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет скорости релаксации при наличии фононного узкого горла.

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

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

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.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет скорости ядерной спин-решеточной релаксации, обусловленной модуляцией градиента КЭП.

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

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

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.

**практическое занятие (2 часа(ов)):**

Расчет скорости ядерной спин-решеточной релаксации для ядер, ближайших к парамагнитной примеси, и ядер, максимально удаленных от парамагнитных центров (в приближении однородного распределения парамагнитных центров).

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

**лекционное занятие (1 часа(ов)):**

Ядерная спиновая диффузия. Спин-решеточная релаксация системы ядерных спинов, обусловленная невзаимодействующими 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.

**практическое занятие (1 часа(ов)):**

Расчет скорости ядерной релаксации через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии для различных размерностей распределения парамагнитных центров.

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

**лекционное занятие (2 часа(ов)):**

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

**практическое занятие (2 часа(ов)):**



Расчет величины и скорости установления равновесной ядерной поляризации в случае  $I=S=1/2$ .

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

#### лекционное занятие (2 часа(ов)):

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

#### практическое занятие (2 часа(ов)):

Определение соотношения между скоростью релаксации и найтовским сдвигом в металлах.

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

#### лекционное занятие (1 часа(ов)):

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

#### практическое занятие (1 часа(ов)):

Оценка величины скорости спин-решеточной релаксации в магнитоупорядоченных веществах.

### Тема 11. Ядерная релаксация в жидкости.

#### лекционное занятие (1 часа(ов)):

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

#### практическое занятие (1 часа(ов)):

Оценка величины скорости спин-решеточной релаксации в жидкости.

## 4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Введение. Спин-решеточная релаксация и возможность наблюдения резонанса.	2	1	Чтение рекомендованной литературы	2	устный опрос
2.	Тема 2. Релаксация за счет взаимодействия спинов с полем теплового электромагнитного излучения.	2	2	Чтение рекомендованной литературы	2	устный опрос
3.	Тема 3. Релаксация за счет взаимодействия с полем фононов.	2	3-4	подготовка к тестированию	8	тестирование
4.	Тема 4. Явление узкого фононного горла.	2	5	Чтение рекомендованной литературы	2	устный опрос



N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
5.	Тема 5. Ядерная спин-решеточная релаксация в диэлектрических диамангнитных кристаллах, обусловленная модуляцией градиента КЭП.	2	6-7	Чтение рекомендованной литературы	6	устный опрос
6.	Тема 6. Ядерная спин-решеточная релаксация в кристаллах, обусловленная изолированными примесными парамагнитными центрами.	2	8-9	Чтение рекомендованной литературы	4	устный опрос
7.	Тема 7. Ядерная спиновая диффузия. Ядерная релаксация через парамагнитные центры в отсутствие ядерной спиновой диффузии. Релаксация через диполь-дипольный резервуар парамагнитной примеси.	2	10	Чтение рекомендованной литературы	2	Устный опрос
8.	Тема 8. Динамическая поляризация ядер диамангнитных атомов в твердых диэлектриках.	2	11-12	подготовка к тестированию	6	тестирование
9.	Тема 9. Ядерная спин-решеточная релаксация в металлах.	2	13-14	Чтение рекомендованной литературы	4	устный опрос
10.	Тема 10. Релаксация ядер диамангнитных атомов в магнитно-упорядоченных диэлектрических кристаллах.	2	15	Чтение рекомендованной литературы	2	устный опрос
11.	Тема 11. Ядерная релаксация в жидкости.	2	16	Чтение рекомендованной литературы, подготовка к зачету.	2	устный опрос
	Итого				40	

## **5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения**

Лекции, самостоятельная работа студента (выполнение индивидуальных домашних заданий), консультации.

## **6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов**

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекции и гл.1, ♦3 книги Сликтера "Основы теории магнитного резонанса".

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.10, ♦1 книги Абрагама, Блини "Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов", т.1.

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

тестирование , примерные вопросы:

Расчет скорости релаксации на заданной частоте по известной скорости релаксации на другой частоте. Определение вида процессов релаксации.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.10, ♦6 книги Абрагама, Блини "Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов", т.1.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.9Г, ♦11 книги Абрагама "Ядерный магнетизм".

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.6, ♦Б книги Абрагам, Гольдман, "Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок", т.2.

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

Устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.5, \$2 книги Абрагама "Ядерный магнетизм", гл.6, ♦Б, Г книги Абрагам, Гольдман, "Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок", т.2.

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

тестирование , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.6, ♦В книги Абрагам, Гольдман, "Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок", т.2. Расчет скорости ядерной релаксации в конкретном кристалле с конкретной парамагнитной примесью при заданной температуре.

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.9А книги Абрагама "Ядерный магнетизм".

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций, гл.6Б книги Абрагама "Ядерный магнетизм" и гл.9, §9.4 книги Гуревича "Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках".

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

устный опрос , примерные вопросы:

Проверка усвоения материала лекций и гл.8Б книги Абрагама "Ядерный магнетизм".

### **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к зачету:

Зачет в соответствии с приведенной выше программой; контрольные тесты, формируемые на основе следующей литературы:

1. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
2. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. М.: Мир, 1965.

#### **7.1. Основная 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.

#### **7.2. Дополнительная литература:**

1. С.А.Альтшулер, Б.М.Козырев. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М.: Наука, 1972.
2. К.Джеффрис. Динамическая ориентация ядер. М.: Мир, 1965.
3. Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.

#### **7.3. Интернет-ресурсы:**

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/>

### **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану**

Освоение дисциплины "Механизмы магнитной релаксации" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "КнигаФонд", доступ к которой предоставлен студентам. Электронно-библиотечная система "КнигаФонд" реализует легальное хранение, распространение и защиту цифрового контента учебно-методической литературы для вузов с условием обязательного соблюдения авторских и смежных прав. КнигаФонд обеспечивает широкий законный доступ к необходимым для образовательного процесса изданиям с использованием инновационных технологий и соответствует всем требованиям новых ФГОС ВПО.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 011800.68 "Радиофизика" и магистерской программе Физика магнитных явлений

.

Автор(ы):

Дуглав А.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.