

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. Татарский Да



20\_\_ г.

подписано электронно-цифровой подписью

**Программа дисциплины**  
Теория магнитного резонанса Б3.ДВ.8

Направление подготовки: 011200.62 - Физика

Профиль подготовки: не предусмотрено

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Фаткуллин Н.Ф.

**Рецензент(ы):**

Салихов К.М.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Скирда В. Д.

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

Учебно-методическая комиссия Института физики:

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

Регистрационный № 6113517

Казань

2017

## **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) профессор, д.н. (профессор) Фаткуллин Н.Ф.  
Кафедра физики молекулярных систем Отделение физики , Nail.Fatkullin@kpfu.ru

## 1. Цели освоения дисциплины

Дается систематическое изложение, основанное на формализме матрицы плотности, общих для ЯМР и ЭПР основ квантовой теории магнитного резонанса. Рассматривается движение спинов в постоянном, радиочастотном и случайном магнитных полях, спиновое эхо Хана, стимулированное спиновое эхо, теория спиновой релаксации, теория линейной реакции спиновой системы на внешнее возмущение и метод моментов.

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

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б3.ДВ.8 Профессиональный" основной образовательной программы 011200.62 Физика и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 4 курсе, 8 семестр.

Освоение дисциплины позволит понимать базовые понятия магнитного резонанса и самостоятельно усваивать современную научную литературу, связанную с более специальными вопросами магнитного резонанса. Рекомендуется студентам, специализирующимся по применению различных разделов радиоспектроскопии в конденсированных средах, химической физике и медицинской физике. Для понимания курса необходимо знание общих курсов физики и математики.

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

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

| Шифр компетенции                        | Расшифровка приобретаемой компетенции   |
|---|---|
| ОПК-1<br>(профессиональные компетенции) | способностью использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, включая знания о предмете и объектах изучения, методах исследования, современных концепциях, достижениях и ограничениях естественных наук (прежде всего химии, биологии, экологии, наук о земле и человеке) (ОПК-1); |
| ОПК-2<br>(профессиональные компетенции) | способностью использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей (ОПК-2);   |
| ОПК-5<br>(профессиональные компетенции) | способностью использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией (ОПК-5);  |
| ПК-1<br>(профессиональные компетенции)  | способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1);   |
| ПК-2<br>(профессиональные компетенции)  | способностью проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта (ПК-2);              |

| Шифр компетенции                       | Расшифровка приобретаемой компетенции  |
|--|--|
| ПК-4<br>(профессиональные компетенции) | способностью применять на практике профессиональные знания и умения, полученные при освоении профильных физических дисциплин (ПК-4);                   |
| ПК-5<br>(профессиональные компетенции) | способностью пользоваться современными методами обработки, анализа и синтеза физической информации в избранной области физических исследований (ПК-5); |
| ПК-6<br>(профессиональные компетенции) | способностью понимать и использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований (ПК-6);                       |
| ПК-7<br>(профессиональные компетенции) | способностью участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме (ПК-7);  |

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

- основы математического аппарата,
- теорию атомной и молекулярной физики,
- иметь представление о магнитном резонансе, спин-спиновой, спин-решеточной релаксации, о теории линейной реакции, методе моментов.

2. должен уметь:

проводить простейшие расчеты, связанные с проблемой магнитного резонанса.

3. должен владеть:

навыками вычислений с применением методов операторной алгебры.

4. должен демонстрировать способность и готовность:

Студенты, завершившие изучение данной дисциплины должны иметь представление об основных понятиях теории магнитного резонанса. Способны делать численные оценки основных величин.

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

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных(ые) единиц(ы) 144 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины экзамен в 8 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<br>Дисциплины/<br>Модуля  | Семестр | Неделя<br>семестра | Виды и часы<br>аудиторной работы,<br>их трудоемкость<br>(в часах) |                         |                        | Текущие формы<br>контроля             |
|----|--|---------|--------------------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
|    |  |         |                    | Лекции  | Практические<br>занятия | Лабораторные<br>работы |                                       |
| 1. | Тема 1. Матрица<br>плотности.  | 8       | 1                  | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
| 2. | Тема 2. Динамика<br>спина в постоянном<br>магнитном поле.                          | 8       | 2                  | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
| 3. | Тема 3.<br>Представление<br>взаимодействия в<br>формализации<br>матрицы плотности. | 8       | 3-4                | 6   | 6                       | 0                      | Устный опрос<br>Контрольная<br>работа |
| 4. | Тема 4. Теория<br>возмущения для<br>матрицы плотности.                             | 8       | 5                  | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
| 5. | Тема 5. Кинетические<br>уравнения для<br>физических величин.                       | 8       | 6                  | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
| 6. | Тема 6. Тензор<br>релаксации.  | 8       | 7                  | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
| 7. | Тема 7. Релаксация<br>спина в случайному<br>магнитном поле.                        | 8       | 8                  | 3   | 3                       | 0                      | Контрольная<br>работа                 |
| 8. | Тема 8. Метод<br>моментов.   | 8       | 9                  | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
| 9. | Тема 9. Общее<br>понятие о<br>кристаллическом поле<br>и спиновом<br>гамильтониане. | 8       | 10                 | 3   | 3                       | 0                      | Устный опрос                          |
|    | Тема . Итоговая<br>форма контроля  | 8       |                    | 0   | 0                       | 0                      | Экзамен                               |
|    | Итого  |         |                    | 30  | 30                      | 0                      |                                       |

#### 4.2 Содержание дисциплины

##### Тема 1. Матрица плотности.

##### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Алгебра спиновых операторов, собственные значения и функции спинового оператора. Проекционные операторы. Статистические операторы. Матрица плотности. Уравнение для матрицы плотности.

##### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Решение уравнений для матрицы плотности.

## **Тема 2. Динамика спина в постоянном магнитном поле.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Магнитный момент. Динамика спина в постоянном магнитном поле. Динамика спина в постоянном и радиочастотном поле. Резонанс. Уравнения Блоха, Эйлера.

### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Вывод уравнения для движения волчка в магнитном поле. Переход во вращающуюся систему координат.

## **Тема 3. Представление взаимодействия в формализации матрицы плотности.**

### **лекционное занятие (6 часа(ов)):**

Представление Шредингера, представление Гейзенберга, представление взаимодействия в формализации матрицы плотности. Способы описания развития процесса во времени.

### **практическое занятие (6 часа(ов)):**

Применение представлений в описании процессов, развивающихся во времени.

## **Тема 4. Теория возмущения для матрицы плотности.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Теория возмущения для матрицы плотности. Хронологическая экспонента Дайсона. Вывод уравнений.

### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Применение теории возмущения для разложения в ряд матрицы плотности. Расчет вкладов второго порядка по оператору возмущения.

## **Тема 5. Кинетические уравнения для физических величин.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Кинетические уравнения. Теория Блоха - Вангнесса - Редфилда. Приближение коротких времен релаксации.

### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Написание кинетических уравнений для физических величин. Движение спина в случайном гауссовом магнитном поле.

## **Тема 6. Тензор релаксации.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Линейный отклик. Тензор релаксации. Выражение формы сигнала через релаксационную функцию. Примеры.

### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Построение тензора релаксации. Примеры.

## **Тема 7. Релаксация спина в случайном магнитном поле.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Релаксация спина в случайном магнитном поле. Вычисления времени спин-решеточной релаксации T1 и спин-спиновой релаксации T2.

### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Примеры вычисление времен релаксации T2 (спин-решеточная) и T2 (спин-спиновая) для некоторых ситуаций.

## **Тема 8. Метод моментов.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Обобщенный метод моментов. Секулярные взаимодействия. Общее выражение для момента.

### **практическое занятие (3 часа(ов)):**

Применение метода моментов на примерах. Расчет второго момента. Обменное сужение.

## **Тема 9. Общее понятие о кристаллическом поле и спиновом гамильтониане.**

### **лекционное занятие (3 часа(ов)):**

Теория кристаллического поля. Общие принципы построения спинового гамильтониана. Примеры спиновых гамильтонианов.

**практическое занятие (3 часа(ов)):**

Спектр дипольной пары.

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

| N     | Раздел<br>Дисциплины   | Семестр | Неделя<br>семестра | Виды<br>самостоятельной<br>работы<br>студентов | Трудоемкость<br>(в часах) | Формы контроля<br>самостоятельной<br>работы |
|-------|--|---------|--------------------|--|---------------------------|---|
| 1.    | Тема 1. Матрица плотности.   | 8       | 1                  | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| 2.    | Тема 2. Динамика спина в постоянном магнитном поле.                    | 8       | 2                  | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| 3.    | Тема 3. Представление взаимодействия в формализации матрицы плотности. | 8       | 3-4                | подготовка к контрольной работе                | 4                         | контрольная работа                          |
|       |  |         |                    | подготовка к устному опросу                    | 8                         | устный опрос                                |
| 4.    | Тема 4. Теория возмущения для матрицы плотности.                       | 8       | 5                  | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| 5.    | Тема 5. Кинетические уравнения для физических величин.                 | 8       | 6                  | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| 6.    | Тема 6. Тензор релаксации.   | 8       | 7                  | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| 7.    | Тема 7. Релаксация спина в случайному магнитном поле.                  | 8       | 8                  | подготовка к контрольной работе                | 8                         | контрольная работа                          |
| 8.    | Тема 8. Метод моментов.  | 8       | 9                  | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| 9.    | Тема 9. Общее понятие о кристаллическом поле и спиновом гамильтониане. | 8       | 10                 | подготовка к устному опросу                    | 4                         | устный опрос                                |
| Итого |  |         |                    |  | 48                        |   |

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

Освоение дисциплины "Теория магнитного резонанса" предполагает использование в учебном процессе как традиционных (лекции, практические занятия с использованием методических материалов), так и инновационных образовательных технологий с применением активных и интерактивных форм проведения занятий: использование мультимедийных программ для подготовки и выступления студентов на семинарских занятиях с фото-, аудио- и видеоматериалами по предложенной тематике.

Используются такие образовательные технологии:

- проверка домашних заданий,
- проверка решений предложенных задач по изучаемому материалу;
- постановка перед студентами вопроса по теме, которая еще только будет изучаться, и студенты должны дать ответ, основываясь на интуиции, а затем этот вопрос подробно изучается.

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

### **Тема 1. Матрица плотности.**

устный опрос , примерные вопросы:

Определение собственных значений и собственных функций спинового оператора. Определение матрицы плотности. Проекционные операторы. Уравнение для матрицы плотности.

### **Тема 2. Динамика спина в постоянном магнитном поле.**

устный опрос , примерные вопросы:

Определение магнитного момента. Различие динамики спина в постоянном и радиочастотном поле. Условие резонанса. Уравнения Блоха, Эйлера.

### **Тема 3. Представление взаимодействия в формализации матрицы плотности.**

контрольная работа , примерные вопросы:

1. Представление матрицы плотности. 2. Вывод уравнения Блоха. 3. Вывод уравнения Эйлера. 4. Представление Шредингера.

устный опрос , примерные вопросы:

Способы описания развития процесса во времени (Шредингер, Гейзенберг, представление взаимодействия)

### **Тема 4. Теория возмущения для матрицы плотности.**

устный опрос , примерные вопросы:

Разложение матрицы плотности применяя теорию возмущений.

### **Тема 5. Кинетические уравнения для физических величин.**

устный опрос , примерные вопросы:

Запись кинетических уравнений для физических величин. Теория Блоха - Вангнесса - Редфилда.

### **Тема 6. Тензор релаксации.**

устный опрос , примерные вопросы:

Выражение формы сигнала через релаксационную функцию. Определение тензора релаксации.

### **Тема 7. Релаксация спина в случайном магнитном поле.**

контрольная работа , примерные вопросы:

1. Вычисление времени спин-решеточной релаксации  $T_1$  2. Вычисление времени спин-спиновой релаксации  $T_2$ .

### **Тема 8. Метод моментов.**

устный опрос , примерные вопросы:

Общее выражение для момента. Примеры.

### **Тема 9. Общее понятие о кристаллическом поле и спиновом гамильтониане.**

устный опрос , примерные вопросы:

Основные понятия теории кристаллического поля. Общие понятия о спиновом гамильтониане. Примеры спиновых гамильтонианов.

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

Примерные вопросы к экзамену:

Форма аттестации: экзамен.

Максимальное количество баллов - 100

**ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ**

1. Кристаллическое поле. Спиновый гамильтониан.
2. Представление Шредингера.
3. Тензор релаксации.
4. Метод моментов.
5. Представление Гейзенберга.
6. Динамика спина в постоянно магнитном поле.
7. Кинетические уравнения.
8. Времена релаксации.
9. Релаксация спина в случайном магнитном поле.
10. Явление резонанса.
11. Матрица плотности.

Полный список вопросов на экзамен приведен в Приложении 1.

### **7.1. Основная литература:**

1. Зарипов М.М. Основы теории спектров электронного парамагнитного резонанса в кристаллах: курс лекций / М. М. Зарипов. - Казань: Казанский государственный университет, 2009. - 212 с.
2. Ядерный магнетизм: монография / А. Абрагам - Рипол Классик, 2013 - 556 с.  
[http://books.google.ru/books?id=lvj9AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&tbo=fb](http://books.google.ru/books?id=lvj9AgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&tbo=fb)
3. Сергеев, Н. А. Основы квантовой теории ядерного магнитного резонанса : монография / Н. А. Сергеев, Д. С. Рябушкин. - М. : Логос, 2013. - 272 с.  
<http://znamium.com/catalog.php?bookinfo=469025>

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

1. Пименов Г.Г. Краткий курс по ядерному магнитному резонансу: учебное пособие / Г.Г. Пименов, Б.И. Гизатуллин; Казан. гос. ун-т, Физ. фак. - Казань: [Казанский государственный университет], 2008. -59 с.
2. Фаткуллин Н.Ф. Метод проекционных операторов Цванцига - Мори: Обобщённое уравнение Ланжевена [Электронный ресурс]/ Н.Ф.Фаткуллин. - Учебное пособие, Казань 1999. - 54с. - Режим доступа - <http://kpfu.ru/metodicheskie-posobiya-studentam-4083.html>
3. Фаткуллин Н.Ф. Обобщенные кинетические уравнения Блоха-Вангнесса-Редфилда [Электронный ресурс]/ Н.Ф.Фаткуллин. - Учебное пособие, Казань, 2004. - 21с. Режим доступа - <http://kpfu.ru/metodicheskie-posobiya-studentam-4083.html>

### **7.3. Интернет-ресурсы:**

Кафедра химической физики - [http://portal.kpfu.ru/main\\_page?p\\_sub=5731](http://portal.kpfu.ru/main_page?p_sub=5731)

Образовательный проект Варгина А.Н. - <http://www.ph4s.ru/index.html>

Релаксация магнитная - [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3383.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3383.html)

Физическая энциклопедия: Спиновый гамильтониан -  
[http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_physics/4774/СПИНОВЫЙ](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/4774/СПИНОВЫЙ)

Хроника открытия магнитного резонанса -

<http://kpfu.ru/museums/muzej-laboratoriya-ekzavojskogo/nauchnaya-deyatelnost/chronika-otkrytiya-magnitnogo-rezonans>

### **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)**

Освоение дисциплины "Теория магнитного резонанса" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Мультимедийная аудитория, вместимостью более 60 человек. Мультимедийная аудитория состоит из интегрированных инженерных систем с единой системой управления, оснащенная современными средствами воспроизведения и визуализации любой видео и аудио информации, получения и передачи электронных документов. Типовая комплектация мультимедийной аудитории состоит из: мультимедийного проектора, автоматизированного проекционного экрана, акустической системы, а также интерактивной трибуны преподавателя, включающей тач-скрин монитор с диагональю не менее 22 дюймов, персональный компьютер (с техническими характеристиками не ниже Intel Core i3-2100, DDR3 4096Mb, 500Gb), конференц-микрофон, беспроводной микрофон, блок управления оборудованием, интерфейсы подключения: USB, audio, HDMI. Интерактивная трибуна преподавателя является ключевым элементом управления, объединяющим все устройства в единую систему, и служит полноценным рабочим местом преподавателя. Преподаватель имеет возможность легко управлять всей системой, не отходя от трибуны, что позволяет проводить лекции, практические занятия, презентации, вебинары, конференции и другие виды аудиторной нагрузки обучающихся в удобной и доступной для них форме с применением современных интерактивных средств обучения, в том числе с использованием в процессе обучения всех корпоративных ресурсов. Мультимедийная аудитория также оснащена широкополосным доступом в сеть интернет. Компьютерное оборудование имеет соответствующее лицензионное программное обеспечение.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "БиблиоРоссика", доступ к которой предоставлен студентам. В ЭБС "БиблиоРоссика" представлены коллекции актуальной научной и учебной литературы по гуманитарным наукам, включающие в себя публикации ведущих российских издательств гуманитарной литературы, издания на английском языке ведущих американских и европейских издательств, а также редкие и малотиражные издания российских региональных вузов. ЭБС "БиблиоРоссика" обеспечивает широкий законный доступ к необходимым для образовательного процесса изданиям с использованием инновационных технологий и соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен студентам. 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, УМК, 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 профессионального образования (ФГОС ВПО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен студентам. 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.

Аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, ноутбуком, экраном, учебной доской.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 011200.62 "Физика" и профилю подготовки не предусмотрено .

Автор(ы):

Фаткуллин Н.Ф. \_\_\_\_\_  
"\_\_\_" 201 \_\_\_ г.

Рецензент(ы):

Салихов К.М. \_\_\_\_\_  
"\_\_\_" 201 \_\_\_ г.