

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Физический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол № 15 от 24.12.2025 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Физические основы методов магнитно-резонансной томографии

---

Уровень высшего образования  
Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность  
03.03.02 - Физика

---

Направленность образовательной программы  
Медицинская физика

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2026 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.16 Физические основы методов магнитно-резонансной томографии относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

| Формируемые компетенции<br>(код, содержание компетенции)                                                                                                                                      | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Наименование оценочного средства   |                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
|                                                                                                                                                                                               | Индикатор достижения компетенции<br>(код, содержание индикатора)                                                                                                                                                 | Результаты обучения по дисциплине                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Для текущего контроля успеваемости | Для промежуточной аттестации  |
| ПК-3: Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта | ИД ПК-3: Демонстрация способности проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта | ИД ПК-3:<br>Владеть навыками применения основных методов магнитно-резонансной спектроскопии к анализу и количественной оценке свойств твердых тел, связанных с наличием магнитных моментов по параметрам спектров.                                                                                                                                                                                                                                                                | Собеседование                      | Зачёт:<br>Контрольные вопросы |
| ПК-5: Способен применять профессиональные знания, осуществлять выбор необходимых научных методов исследований для решения задач проектной и инновационной деятельности                        | ИД ПК-5: Демонстрация способности применять профессиональные знания, осуществлять выбор необходимых научных методов исследований для решения задач проектной и инновационной деятельности                        | ИД ПК-5:<br>Знать: Теории транспорта в металлах и полупроводниках. Классическое рассмотрение поведения спина. Взаимодействие спина с внешними полями. Природу тонкой структуры энергетического спектра. Природа спин-зависимых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах: Методы исследования спин-зависимых явлений.<br>Уметь объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений. | Собеседование                      | Зачёт:<br>Контрольные вопросы |

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

|                                                                          | очная                    |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Общая трудоемкость, з.е.</b>                                          | <b>2</b>                 |
| <b>Часов по учебному плану</b>                                           | <b>72</b>                |
| в том числе                                                              |                          |
| <b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>                           |                          |
| - занятия лекционного типа                                               | <b>26</b>                |
| - занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы) | <b>0</b>                 |
| - КСР                                                                    | <b>1</b>                 |
| <b>самостоятельная работа</b>                                            | <b>45</b>                |
| <b>Промежуточная аттестация</b>                                          | <b>0</b><br><b>Зачёт</b> |

#### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

| Наименование разделов и тем дисциплины                                                                                                                                                                                                 | Всего<br>(часы) | в том числе                                                                |                                                                            |             |                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                        |                 | Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них |                                                                            |             | Самостоятельная работа обучающегося, часы |
|                                                                                                                                                                                                                                        |                 | Занятия лекционного типа                                                   | Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы | Всего       |                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                        | 0<br>Ф<br>0     | 0<br>Ф<br>0                                                                | 0<br>Ф<br>0                                                                | 0<br>Ф<br>0 | 0<br>Ф<br>0                               |
| Тема 1 Введение в методы магнитного резонанса. История открытия. Виды магнитных резонансов. Области применения.                                                                                                                        | 14              | 2                                                                          |                                                                            | 2           | 12                                        |
| Тема 2 Явление магнитного резонанса.                                                                                                                                                                                                   | 8               | 2                                                                          |                                                                            | 2           | 6                                         |
| Тема 3 Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса, парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса. | 3               |                                                                            |                                                                            | 0           | 3                                         |
| Тема 4 Спиновый гамильтониан. Методы решения уравнения Шредингера со спиновым гамильтонианом. Тонкая структура спектров. Природа анизотропии спектров. Учет спин- орбитального взаимодействия.                                         | 8               | 2                                                                          |                                                                            | 2           | 6                                         |
| Тема 5 Сверхтонкая структура спектра. Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий. Сверхтонкая структура спектра. Двойной электронно-ядерный резонанс.                                                                       | 10              | 4                                                                          |                                                                            | 4           | 6                                         |
| Тема 6 Спин-решеточные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации.                                                                                                                                                            | 10              | 4                                                                          |                                                                            | 4           | 6                                         |
| Тема 7 Спин-спиновые взаимодействия. Процессы спин-спиновой релаксации.                                                                                                                                                                | 12              | 6                                                                          |                                                                            | 6           | 6                                         |

|                                                             |    |    |   |    |    |
|-------------------------------------------------------------|----|----|---|----|----|
| Тема 8 Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса. | 6  | 6  |   | 6  |    |
| Аттестация                                                  | 0  |    |   |    |    |
| КСР                                                         | 1  |    |   | 1  |    |
| Итого                                                       | 72 | 26 | 0 | 27 | 45 |

### Содержание разделов и тем дисциплины

Введение в методы магнитного резонанса.

История открытия. Виды магнитных резонансов. Области применения.

Явление магнитного резонанса.

Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса, парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса.

Спиновый гамильтониан.

Тонкая структура спектров. Природа анизотропии спектров. Начальное расщепление и тонкая структура.

Сверхтонкая структура спектра.

Природа сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействий. Сверхтонкая структура спектра. Двойной электронно-ядерный резонанс.

Спин-решеточная релаксация.

Спин-фононные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла. Спин-спиновая релаксация. Спин-спиновые взаимодействия и их влияние на спектр ЭПР. Процессы спин-спиновой релаксации. Механизм обменного сужения линий ЭПР.

Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса.

Описание спинового упорядочения в ферромагнетиках на основе гейзенберговского обменного гамильтониана

Спиновые волны в ферромагнетике

Суть и особенности ферромагнитного резонанса

Влияние кристаллической магнитной анизотропии на резонансную частоту ФМР в ферромагнетиках или ферримагнитный резонанс

Антиферромагнитный резонанс.

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

4. Демидов Е.С. Ежевский А.А., Карзанов В.В. Магнитные резонансы в твердых телах  
Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Новые материалы

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-3:**

1. История открытия магнитного резонанса. Виды магнитных резонансов. Области применения.
1. Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса.
2. Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха для случая медленного прохождения через резонанс.
3. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.
4. Спиновый гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.
5. Тонкая структура спектра. Природа анизотропии спектров ЭПР. Спин- орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.
6. Сверхтонкая структура спектра ЭПР. Природа изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия.
7. Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическая диаграмма и сверхтонкая структура спектра для случая  $S=1/2$ ,  $I=3/2$ .
8. Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр ЭПР. Двойной электронно-ядерный резонанс.
9. Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Механизм Валера.
10. Спин-решеточная релаксация. Механизмы Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.
11. Спин-спиновые взаимодействия и их влияние на спектр ЭПР. Механизм обменного сужения линий ЭПР.
12. Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса. Описание спинового упорядочения в ферромагнетиках на основе гейзенберговского обменного гамильтониана.
13. Спиновые волны в ферромагнетике. Суть и особенности ферромагнитного резонанса. Влияние кристаллической магнитной анизотропии на резонансную частоту.
14. Антиферромагнитный резонанс

### 5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-5:

1) Явление магнитного резонанса. Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса, парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха.

Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса.

2) Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

| Оценка     | Критерии оценивания                                                                                                                                                                                                              |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| зачтено    | Успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания |
| не зачтено | Невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание смысла проблем, недостаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации                                |

### 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

#### Шкала оценивания сформированности компетенций

| Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций) | плохо                                                                                                                     | неудовлетворительно                                                   | удовлетворительно                                                    | хорошо                                                                                            | очень хорошо                                                                                            | отлично                                                                    | превосходно                                                |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                                                                          | не зачтено                                                                                                                |                                                                       |                                                                      | зачтено                                                                                           |                                                                                                         |                                                                            |                                                            |
| <u>Знания</u>                                                            | Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа | Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки | Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет. | Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. |
| <u>Умения</u>                                                            | Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие                                                              | При решении стандартных задач не продемонстрированы                   | Продемонстрированы основные умения. Решены                           | Продемонстрированы все основные умения.                                                           | Продемонстрированы все основные умения.                                                                 | Продемонстрированы все основные умения.                                    | Продемонстрированы все основные умения. Решены все         |

|               |                                                                                                            |                                                                                               |                                                                                         |                                                                                                                   |                                                                                              |                                                                                                           |                                                                       |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
|               | умений вследствие отказа обучающегося от ответа                                                            | основные умения. Имели место грубые ошибки                                                    | типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме       | Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами | Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами | Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме | основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов |
| <u>Навыки</u> | Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа | При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки | Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами                           | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов       | Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов                          | Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач     |

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

| Оценка     |                            | Уровень подготовки                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| зачтено    | <b>превосходно</b>         | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой |
|            | <b>отлично</b>             | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».                                                                                                                            |
|            | <b>очень хорошо</b>        | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»                                                                                                                        |
|            | <b>хорошо</b>              | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».                                                                                                                             |
|            | <b>удовлетворительно</b>   | Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»                                     |
| не зачтено | <b>неудовлетворительно</b> | Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».                                                                                                                                                                                   |
|            | <b>плохо</b>               | Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»                                                                                                                                                                                                  |

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. История открытия магнитного резонанса. Виды магнитных резонансов. Области применения.
1. Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса.
2. Уравнения Блоха. Анализ решений уравнений Блоха для случая медленного прохождения через резонанс.
3. Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса. Вероятность квантового перехода с переворотом спина. Формула Раби. Сравнение с классическим случаем.
4. Спиновый гамильтониан. Нахождение собственных значений и собственных векторов спинового гамильтониана в матричном представлении.
5. Тонкая структура спектра. Природа анизотропии спектров ЭПР. Спин- орбитальное взаимодействие. Расщепление в нулевом поле.
6. Сверхтонкая структура спектра ЭПР. Природа изотропного сверхтонкого взаимодействия. Влияние ковалентности на константы сверхтонкого взаимодействия.
7. Спиновый гамильтониан с учетом сверхтонкого взаимодействия. Энергетическая диаграмма и сверхтонкая структура спектра для случая  $S=1/2$ ,  $I=3/2$ .
8. Суперсверхтонкое взаимодействие и его влияние на спектр ЭПР. Двойной электронно-ядерный резонанс.
9. Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Механизм Валера.
10. Спин-решеточная релаксация. Механизмы Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха.
11. Спин-спиновые взаимодействия и их влияние на спектр ЭПР. Механизм обменного сужения линий ЭПР.
12. Особенности спектроскопии ферромагнитного резонанса. Описание спинового упорядочения в ферромагнетиках на основе гейзенберговского обменного гамильтониана.
13. Спиновые волны в ферромагнетике. Суть и особенности ферромагнитного резонанса. Влияние кристаллической магнитной анизотропии на резонансную частоту.
14. Антиферромагнитный резонанс

### 5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-5

1) Явление магнитного резонанса. Электронный и ядерный магнитные моменты. Прецессия спина в магнитном поле. Классическое рассмотрение магнитного резонанса, парамагнитный резонанс. Уравнения Блоха.

Квантовомеханическое описание явления магнитного резонанса.

2) Спин-решеточная релаксация. Спин-фононные взаимодействия. Процессы спин-решеточной релаксации. Механизмы Валлера, Ван-Флека, Орбаха, Блюма-Орбаха. Эффекты узкого фононного горла.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

| Оценка  | Критерии оценивания                                                                                                                                                                                                              |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| зачтено | Успешное выполнение практических заданий, выданных преподавателем, владение программным материалом, понимание сущности рассматриваемых процессов и явлений, умение самостоятельно обозначить точки активного роста нового знания |
| не      | Невыполнение практических заданий, выданных преподавателем, полное непонимание                                                                                                                                                   |



| Оценка  | Критерии оценивания                                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| зачтено | смысла проблем, недостаточно полное владение терминологией, неумение самостоятельно обозначить проблемные ситуации |

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

Основная литература:

1. Абрагам А. Электромагнитный парамагнитный резонанс переходных ионов : [в 2 т.] : пер. с англ. Т. 2 / под ред. С. А. Альтшулера и Г. В. Скороцкого. - М. : Мир , 1973. - 349 с. - 2.31., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Пул Чарлз. Техника эпр-спектроскопии : пер. с англ. / под ред. Л. Л. Декабруна. - М. : Мир, 1970. - 557 с. : ил. - 3.31., 1 экз.

2. Кринчик Георгий Сергеевич. Физика магнитных явлений : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - 2-е изд., доп. - М. : Изд-во МГУ, 1985. - 336 с. : ил. - 0.95., 3 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

не используются

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

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.02 - Физика.

Автор(ы): Ежевский Александр Александрович, доктор физико-математических наук, профессор.

Заведующий кафедрой: Павлов Дмитрий Алексеевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 23.12.2025, протокол № б/н.