

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 № 10 от 02.12.2024 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

2025 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 (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (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: 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: 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: 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. Уметь объяснить суть физических явлений, рассматриваемых в курсе, связь между явлениями, представить математическое описание явлений.	Собеседование	Зачёт: Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

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

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 (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 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 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	превосходно	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
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	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	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	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 30.11.2024, протокол № б/н.