

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

СОГЛАСОВАНО
зам. директора института
по научной работе
доктор физ.-мат. наук

 М.А. Коротин

« 01 » сентября 2025 г.



УТВЕРЖДАЮ
Директор института
академик РАН

 Н.В. Мушников

« 02 » сентября 2025 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальностям
1.3.8. Физика конденсированного состояния
1.3.12. Физика магнитных явлений

по физико-математическим наукам

Специализация: **Магнитный резонанс и эффект Мессбауэра**

Екатеринбург
2025

1. Ядерный магнитный резонанс.

Электронный и ядерный магнитные дипольные моменты. Сверхтонкая структура энергетического спектра свободного атома и иона. Понятие о магнитном резонансе. Поглощение энергии радиочастотного поля системой магнитных моментов. Спин-решёточная релаксация.

Классическое и квантомеханическое описание движения магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Вращающаяся система координат.

Уравнение Блоха. Решения уравнений Блоха в случае малых радиочастотных полей. Статистическая и динамическая магнитная восприимчивость. Учёт диффузионного движения в уравнении Блоха. Свободная прецессия ядерной намагниченности. Спиновое эхо.

Соотношение между переходным и стационарным откликами системы. Соотношения Крамерса - Кронига. Флуктуационно-диссипативная теорема.

Микроскопическая теория поглощения и дисперсии.

Магнитное дипольное уширение резонанса в жёсткой решётке. Форма сигналов поглощения и свободной прецессии. Метод моментов. Применение метода моментов для исследования структуры твёрдого тела.

Магнитные взаимодействия ядер с электронами. Замораживание орбитального момента электронов. Химический сдвиг. Спин-спиновое взаимодействие ядер с электронами. Сдвиг Найта. Косвенные спин-спиновые взаимодействия ядер.

Спин-решёточная релаксация. Представление спиновой температуры. Релаксация системы, описываемой спиновой температурой. Ядерная релаксация в металлах. Теория Редфильда. Сужение линий резонанса движением.

Динамика и термодинамика систем взаимодействующих магнитных моментов. Спиновая температура в лабораторной и вращающейся системах координат. Насыщение магнитного резонанса. Уравнения Провоторова. Сильные и слабые радиочастотные поля. Спиновой захват. Время спин-решёточной релаксации во вращающейся системе координат. Исследование медленных движений. Импульсное сужение линий ЯМР.

Электрические квадрупольные взаимодействия. Гамильтониан квадрупольного взаимодействия. Квадрупольные эффекты первого и второго порядка в магнитном резонансе. Монокристаллические и порошковые образцы. Градиенты электрического поля в металлах.

Ядерный квадрупольный резонанс. ЯКР в магнитном поле. Ядерная релаксация и её механизмы.

Сдвиг Найта в простых металлах. Соотношение Корринги. Учёт влияния электрон-электронных взаимодействий на магнитную восприимчивость, сдвиг Найта, спин-решёточную релаксацию и соотношения Корринги.

ЯМР в переходных металлах. Сдвиг Найта. Спин-решёточная релаксация. Квадрупольные эффекты. Методы разделения сверхтонких взаимодействий.

ЯМР в сверхпроводниках. Сдвиг Найта. Спин-решёточная релаксация. Форма спектра в сверхпроводниках второго рода.

ЯМР в магнитных твёрдых телах.

Двойной резонанс. Эффект Оверхаузера. Динамическая поляризация ядер.

Методы детектирования ЯМР. Стационарная и импульсная спектроскопия ЯМР. Фурье спектроскопия ЯМР. Типы спектров ЯМР. Криогенная техника в ЯМР.

2. Электронный спиновый резонанс.

Основное различие между ЭСР и ЯМР. Классификация веществ, в которых наблюдается ЭСР. Классификация взаимодействий, определяющих энергетический спектр электронной системы в веществе. Спин-орбитальное взаимодействие и взаимодействие с кристаллическим полем лигандов.

Ионы переходных элементов. "Слабое", "промежуточное" и "сильное" кристаллическое поле лигандов. Эффективный спин и анизотропия. Тонкая структура спектра ЭСР. Магнитная сверхтонкая структура спектра ЭСР.

Симметрия кристаллического поля. Спиновый гамильтониан. Анизотропия g-фактора. Тонкая и сверхтонкая структура.

Спектры ЭСР монокристаллов, порошков, растворов. Изучение дефектов твёрдого тела.

Спин-спиновые взаимодействия. Магнитное диполь-дипольное и обменное взаимодействия. Уширение линий ЭСР и их форма. Влияние обменных взаимодействий на форму линии ЭСР.

Спин-решёточные взаимодействия. Установление теплового равновесия спиновой системы с решёткой. Тепловой резервуар фононов. Механизмы спин-решёточной релаксации Валлера, Кронига-Ван Флека, Орбаха-Аминова, Рамана. Явления "узкого фононного горла" и "фононной шины".

Двойной электронно-ядерный резонанс (ДЭЯР), Механизмы ДЭЯР.

Релаксационные эффекты в ДЭЙР. Измерение параметров сверхтонкой структуры спектров ЭСР.

Спиновый резонанс электронов проводимости. Интенсивность и форма линии СРЭП. Уравнение движения спиновой намагниченности электронов проводимости. Релаксация.

Спиновый резонанс электронов проводимости в "тонких" и "массивных" образцах. Теория формы линии. Влияние диффузии намагниченности электронов проводимости. Релаксационные процессы.

Электронный спиновый резонанс и спиновые волны в парамагнитных металлах в сильном магнитном поле.

Электронный спиновый резонанс в сплавах с переходными элементами. Система уравнений, описывающая движение намагниченностей электронов проводимости и локализованных моментов. Резонанс на локализованных моментах. Релаксация.

Ферромагнитный резонанс и спиновые волны в магнитоупорядоченных металлах.

Импульсные методы в ЭПР.

Методы детектирования ЭСР, Экспериментальная техника ЭСР и СРЭП. Типы спектрометров. Чувствительность спектрометров.

3. Мессбауэровская спектроскопия.

Взаимодействие γ -излучения с веществом. Источники γ -излучения, форма линии поглощения и испускания. Ширина уровня и конверсия. Потери энергии на отдачу ядра. Доплеровское уширение линии.

Теория эффекта Мессбауэра. Процесс резонансного поглощения и рассеяния γ -излучения ядрами в кристалле. Вероятность поглощения γ -квантов без отдачи. Классическое и квантовомеханическое описание эффекта Мессбауэра.

Динамика решётки и эффект Мессбауэра. Исследование движения атомов в кристалле. Измерение фактора Дебая-Валлера. Гамма-резонанс в аморфных веществах. Влияние фазовых переходов.

Сверхтонкая структура спектров Мессбауэра. Изомерные химические сдвиги. Квадрупольное взаимодействие. Определение градиентов электрического поля. Квадрупольное расщепление линии в соединениях железа. Расщепление линии в кристаллических полях. Асимметрия линий при квадрупольном расщеплении.

Магнитная сверхтонкая структура. Комбинированное действие электрического и магнитного полей. Эффективные магнитные поля на ядре железа в металлическом железе, и в других металлах и сплавах. Эффективные поля на ядрах немагнитных атомов в магнитоупорядоченных металлах и сплавах.

Динамические эффекты в Мессбауэровской спектроскопии.

Мессбауэровская спектроскопия конверсионных электронов.

Резонансное рассеяние γ -квантов. Интерференция ядерного резонансного и релеевского рассеяния. Измерение фактора Дебая-Валлера. Мессбауэровская дифракция. Модуляция мессбауэровского излучения.

Применение эффекта Мессбауэра в металловедении. Изучение фазовых переходов, механизмов образования новых фаз, процессов упорядочения, переходов порядок-беспорядок. Применение для изучения различных типов дефектов в металлах и сплавах.

Методика и техника мессбауэровской спектроскопии. Методы детектирования γ -излучения. Прохождение γ -квантов через поглотитель. Расчёт параметров спектров поглощения. Схема уровней некоторых мессбауэровских ядер.

Криогенная и высокотемпературная техника в мессбауэровской спектроскопии.

Литература

1. Абрагам А.

Ядерный магнетизм/ Пер. с англ. Г.В.Скроцкого. - М.: Изд-во иностр.лит.. 1963. - 551с.

2. Абрагам А.,Блини Б.

Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов/ Пер.с англ.Под ред.С.А.Альтшулера и Г.В.Скроцкого. - Т.1. - М.: Мир, 1972. - 651 с.: граф.

3. Абрагам А.,Блини Б.

Электронный парамагнитный резонанс/ Пер.с англ. Под ред.С.А.Альтшулера и Г.В.Скроцкого. - Т.2. - М.: Мир, 1973. - 349 с.: черт.

4. Абрагам А., Гольдман М.

Ядерный магнетизм: Порядок и беспорядок: В 2-х т./ Пер.с англ. Под ред. Г.В.Скроцкого. -Т.1. - М.: Мир, 1984. - 300с.:ил.

5. **Абрагам А., Гольдман М.**
Ядерный магнетизм: Порядок и беспорядок: В 2-х т./ Пер.с англ. Под ред. Г.В.Скороцкого. -Т.2. - М.: Мир, 1984. - 360с.:ил.
6. **Андреева М. А., Кузьмин Р. Н.**
Мессбауэровская гамма-оптика/ М. : Изд-во МГУ, 1982. - 227 с. : ил. - Библиогр.: с. 219-227 (47 назв.).
7. **Вертхейм Г., Хаусман А., Зандер В.**
Электронная структура точечных дефектов / Пер. с англ.Е.П. Степанова. - М.: Атомиздат, 1977 - 205с.:ил.
8. **Вертц, Дж.**
Теория и практические приложения метода ЭПР = Electron spin resonance. Elementary theory and practical applications / пер. с англ. канд. хим. наук М. Г. Гольдфельда ; под ред. проф. Л. А. Блюменфельда. - Москва : Мир, 1975. - 548 с. : черт.; Доп. тит. л.: Electron spin resonance. Elementary theory and practical applications. John E. Wertr. James R. Bolton
9. **Винтер Ж.**
Магнитный резонанс в металлах/ Пер. с англ. А.П.Степанова; Под ред. Г.В.Скороцкого. - М.: Мир, 1976. - 288 с.: черт.
10. **Гольдман М.**
Спиновая температура и ЯМР в твердых телах/ Пер. с англ. А.И.Реза и М.Е.Сарычева; Под ред. Г.В.Скороцкого. - М.: Мир, 1972. - 342с.
11. **Платцман Ф., Вольф П.**
Волны и взаимодействия в плазме твердого тела/ Пер.с англ. Е.З.Мейлихова; Под ред. В.Г.Скобова. - М.: Мир, 1975. - 436с.
12. **Сликтер Ч.П.**
Основы теории магнитного резонанса/ Пер.Н.Н.Корста и др.; Под ред.Г.В.Скороцкого. - 2-е изд.,пересмотр.,доп.и испр. - М.: Мир, 1981. - 448 с.: ил.
13. **Суздаев И.П.**
Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии. - М.: Атомиздат, 1979. - 192 с.
14. **Уо Дж.**
Новые методы ЯМР в твердых телах/ Пер. с англ. А.Л.Блюменфельда и Ю.Н.Ярым-Агаева; Под ред. О.П.Ревокатова и Э.И.Федина. - М.: Мир, 1978. - 180 с.

15. Фаррар Т.С., Беккер Э.Д.

Импульсная и фурье-спектроскопия ЯМР/ Пер. с англ. Б.А.Квасова; Под ред. Э.И.Федина. - М.: Мир, 1973. - 164 с.:черт.

16. Шпинель, Владимир Семенович.

Резонанс гамма-лучей в кристаллах. - Москва : Наука, 1969. - 407 с. : черт.; 20 см.

Дополнительная литература:

1. Библиография в книге: Сликтер Ч.П.

Основы теории магнитного резонанса/ Пер.Н.Н.Корста и др.; Под ред.Г.В.Скороцкого. - 2-е изд.,пересмотр.,доп.и испр. - М.: Мир, 1981. - 448 с.: ил.

2. Туров Евгений Акимович, Петров Михаил Петрович

Ядерный магнитный резонанс в ферро-и антиферромагнетиках.- М.: "Наука".Гл.ред.физ.-мат.лит., 1969. - 260 с.:ил. - Библиогр.: с.249-260.

3. Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г.

Автоматизация физического эксперимента: Учеб. пособие для физ. спец. вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1986. - 367 с.: ил.