

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор \_\_\_\_\_ В.С.Бухмин

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
Сверхтонкие взаимодействия в твердых телах

Цикл ДС

ГСЭ - общие гуманитарные и социально-экономические дисциплины; ЕН - общие математические и естественнонаучные дисциплины; ОПД - общепрофессиональные дисциплины; ДС - дисциплины специализации; ФТД - факультативы.

Специальность: 010400 — Физика  
(Номер специальности) (Название специальности)

Принята на заседании кафедры физики твёрдого тела  
(Название кафедры)

(протокол № 7 от "17" сентября 2009 г.)

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ (Л.Р.Тагиров)

Утверждена Учебно-методической комиссией физического факультета  
(Название факультета)

КГУ

(протокол № \_\_\_ от "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.)

Председатель комиссии

\_\_\_\_\_ (Д.А. Таюрский)

## Методические указания (пояснительная записка)

Рабочая программа дисциплины

«Сверхтонкие взаимодействия в твердых телах»

Предназначена для студентов 4 курса,

по специальности: 010400  
(Номер специальности)

– Физика  
(Название специальности)

АВТОР: Э.К. Садыков

### КРАТКАЯ АННОТАЦИЯ:

В рамках данного курса лекций проводится анализ физических явлений и процессов, обусловленных ядерными моментами диамагнитных и магнитных атомов в конденсированных средах. Рассматриваются эффекты сверхтонких взаимодействий применительно к различным (резонансным), методам исследования: электронный и ядерный магнитный резонанс, мессбауэровская спектроскопия. Используется единый квантово-механический подход при интерпретации и теоретической оценке экспериментальных параметров, наблюдаемых этими методами. Уровень лекционного курса рассчитан на то, чтобы обеспечить понимание студентами сути обсуждаемых физических явлений и их способность ориентироваться в научной литературе в области сверхтонких взаимодействий.

1. Требования к уровню подготовки студента, завершившего изучение дисциплины Сверхтонкие взаимодействия в твердых телах  
(Наименование дисциплины)

Студенты, завершившие изучение данной дисциплины должны:

- обладать теоретическими знаниями о сверхтонких взаимодействиях магнитных ионов, как сверхтонкие взаимодействия проявляются в физических экспериментах;
- иметь четкое представление о механизмах формирования сверхтонких полей на ядрах, о релаксационной и когерентной динамике сверхтонких полей;
- иметь представление о резонансных методах исследования (магнитный резонанс, ядерный гамма резонанс, ядерный акустических резонанс, оптический резонанс т.д.), где проявляются сверхтонкие взаимодействия, о взаимодополняющем характере информации, получаемой этими методами;
- приобрести навыки простейших оценок параметров сверхтонкого взаимодействия.

2. Объем дисциплины и виды учебной работы (в часах)

Форма обучения очная  
очная, заочная, вечерняя

Количество семестров 2

Форма контроля: 8 семестр экзамен  
зачет, экзамен

№ п/п	Виды учебных занятий	Количество часов	
		7 семестр	8 семестр
1.	Всего часов по дисциплине	37	75
2.	Самостоятельная работа	3	7
3.	Аудиторных занятий	34	68
	в том числе: лекций	34	34
	семинарских (или лабораторно-практических) занятий		34

## Содержание дисциплины

### ТРЕБОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА К ОБЯЗАТЕЛЬНОМУ МИНИМУМУ СОДЕРЖАНИЯ ПРОГРАММЫ

Индекс	Наименование дисциплины и ее основные разделы	Всего часов
ДС	-	

Примечание: если дисциплина устанавливается вузом самостоятельно, то в данной таблице ставится прочерк.

### СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Название темы и ее содержание	Количество часов	
		лекции	семинарские занятия
	<i>1. Основные взаимодействия в парамагнитных ионах, находящихся в кристалле</i>		
1	Ионы переходных групп (группа железа, группа редких земель). Эффект Штарка. Теория кристаллического поля.	4	
2	Формализм операторов эквивалентов. Физический смысл штарковского расщепления (на примере одного $3d$ - электрона в поле кубической симметрии и в полях более низкой симметрии).	4	

№ п/п	Название темы и ее содержание	Количество часов	
		лекции	семинарские занятия
3	Эффект Зеемана для парамагнитных ионов в кристалле. Тонкая и сверхтонкая структура спектров парамагнитного резонанса. Магнитное сверхтонкое взаимодействие парамагнитных ионов. Контактное взаимодействие Ферми. Спиновая поляризация ионного остова. Квадрупольное сверхтонкое взаимодействие парамагнитных ионов.	6	
4	Метод спин-гамильтониана для ионов с невырожденным и вырожденным основным орбитальным уровнем. Теорема Крамерса.	2	
5	Спин-решеточная релаксация парамагнитных ионов: однофононные процессы, двухфононные процессы. Акустический магнитный резонанс. Спин-спиновая релаксация.	5	
6	Теория поля лигандов. Молекулярные орбиты. Метод МО ЛКАО.	2	
7	Анализ двухатомной молекулы: связывающие, разрыхляющие, несвязывающие орбиты.	2	
8	Принципиальная схема молекулярных орбит для октаэдрического парамагнитного комплекса.	2	
9	Высокоспиновая и низкоспиновая конфигурации парамагнитных комплексов.	2	

№ п/п	Название темы и ее содержание	Количество часов	
		лекции	семинарские занятия
10	Экспериментальные проявления ковалентности: перенос зарядовой плотности, перенос спиновой плотности, наблюдение оптических переходов, запрещенных по четности.	3	
11	Нормальные колебания парамагнитных комплексов. Эффект Яна-Теллера. Инверсионное расщепление	4	
12	Сверхтонкая структура мессбауэровских спектров (МС) парамагнитных ионов. Изомерный (химический) сдвиг МС.	3	
13	Электрическая квадрупольная структура МС. Магнитная сверхтонкая структура МС. Релаксационные мессбауэровские спектры. Коллапс магнитной сверхтонкой структуры МС.	4	4
14	Стохастическая модель Блюма–Андерсона.	3	
	<i>2. Сверхтонкие взаимодействия в магнитоупорядоченных системах</i>		
15	ЯМР в магнитоупорядоченных системах. Усиление р.ч. поля на ядрах; механизмы усиления (благодаря движению доменных стенок, вращению намагниченности). Коэффициенты усиления для различных форм образцов: шара, пленки, цилиндра.	4	

№ п/п	Название темы и ее содержание	Количество часов	
		лекции	семинарские занятия
16	Мессбауэровская спектроскопия магнитных материалов. Сверхтонкие поля на ядрах: контактное поле, дипольное поле, поля переноса. Магнитная микроструктура	4	4
17	Суперпарамагнетизм в мессбауэровской спектроскопии. Температура блокировки. Суперпарамагнитная релаксация: двухуровневая модель релаксации; многоуровневая модель релаксации.	4	4
18	Радиочастотная мессбауэровская спектроскопия. Явление двойного гамма-магнитного резонанса. Квазиэнергии ядерного спина. Форма спектров поглощения. Форма спектров резонансного рассеяния. Квантовая интерференция в спектрах резонансного рассеяния мессбауэровского излучения.	4	4
19	Прозрачность среды по отношению мессбауэровскому (гамма) излучению. Эффекты квантовой интерференции (обзоры)		8
	<i>3. Другие методы исследования сверхтонких взаимодействий</i>		
20	Метод возмущенных угловых корреляций. Интегральный и дифференциальный метод угловых корреляций.	3	2
21	Мюоний. Сверхтонкая структура и эффект Зеемана. Мюон-спин-вращательная ( $\mu$ SR-) спектроскопия в твердых телах.	3	2

№ п/п	Название темы и ее содержание	Количество часов	
		лекции	семинарские занятия
22	Приложения ядерно-физических методов к исследованию магнитных материалов (обзоры)		6
	Итого часов:	68	34

Примечание: программа содержит подробную характеристику содержания темы. Название, количество тем в программе, количество часов на каждую тему определяется согласно Государственному образовательному стандарту по специальности.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ПО МАТЕРИАЛАМ ЛЕКЦИОННЫХ И СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Садыков Э.К. Ядерно-физические методы исследования твердых тел: мессбауэровская спектроскопия, изд. КГУ 1996, 32 с.
2. Вагизов Ф.Г., Манапов Р.А. Двойной ядерный гамма магнитный резонанс, изд. КГУ 2005, 36 с.

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Абрагам А. ЭПР переходных ионов.// А. Абрагам, Б. Блини / изд. МИР Москва, 1972, Т. 1, 651 с.; 1973, Т. 2, 349 с. (Гл. 17: §§ 1, 2, 5, 6; Гл. 20: §§ 2, 3, 6, 8; Гл. 21: §§ 4-6).
2. Альтшулер С.А. ЭПР соединений элементов промежуточных групп // С.А. Альтшулер, Б.М.Козырев / изд. НАУКА Москва, 1972, 672 с. (Гл. 3: §§ 1-4, 6, 9, 14; Гл. 5: §§ 1-4, 6, 7; Гл. 6: 1, 2).
3. Абрагам А. Ядерный магнетизм // А.Абрагам / изд. ИЛ Москва, 551 с. (Гл. 2: §§ 1, 2, 4, 5; Гл. 3: §§ 1-3, 6-8).
4. Шпинель В.С. Резонанс гамма лучей в кристаллах// В.С. Шпинель/ изд. НАУКА, Москва. 1969, 407 с. (Главы 2, 5-7).
5. М.И. Куркин, Е.А. Туров. ЯМР в магнитоупорядоченных веществах и его применения. Москва, «Наука», ГР ФМЛ. 1990, 248 с.
6. Мессбауэровская спектроскопия замороженных растворов. Под ред. А. Вертеша, Д. Надя. Изд. «Мир». 1998, 400 с. (Гл. 1).
7. Андреева М.А. Мессбауэровская гамма-оптика // М.А. Андреева, Р.Н. Кузьмин / изд. МГУ, 1982, 227 с. (Главы 4, 5).
8. Суздальев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов // И.П. Суздальев / 2006, Москва, КомКнига, 592 с. (Главы 2, 16).

**Приложение**  
к программе дисциплины  
Сверхтонкие взаимодействия в твердых телах  
(Наименование дисциплины)

**ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНАЦИОННЫМ БИЛЕТАМ**

1. Взаимодействие парамагнитного иона с внутрикристаллическим полем в кристалле. Формализм операторов эквивалентов.
2. Операторы квадрупольного электрического и сверхтонкого магнитного взаимодействия.
3. Контактное взаимодействие Ферми. Спиновая поляризация ионного остова.
4. Сверхтонкая структура спектров парамагнитного резонанса.
5. Метод спин-гамильтониана для ионов с невырожденным орбитальным уровнем.
6. Спин-решеточная релаксация парамагнитных ионов: однофононные процессы. Акустический магнитный резонанс.
7. Механизмы спин-фононной связи: Кронига - Ван-Флека и Валлера.
8. Нормальные колебания парамагнитных комплексов. Эффект Яна-Теллера. Инверсионное расщепление.
9. Молекулярные орбиты. Метод МО ЛКАО. Анализ двухатомной молекулы: связывающие, разрыхляющие, несвязывающие орбиты.
10. Схема молекулярных орбит для октаэдрического комплекса ионов группы железа.
11. Высокоспиновая и низкоспиновая конфигурации парамагнитных комплексов.
12. Перенос спиновой плотности в парамагнитных комплексах. Суперсверхтонкая структура спектров электронного парамагнитного резонанса.
13. Сверхтонкие поля на ядрах магнитоупорядоченных систем: контактное поле, дипольное поле, поля переноса.
14. Магнитная сверхтонкая структура мессбауэровских спектров.

15. Формирование градиента электрического поля на ядре. Факторы экранировки Штернхаймера. Ионы переходных групп (группа железа, группа редких земель).
16. Электрическая квадрупольная структура мессбауэровских спектров.
17. Изомерный (химический) сдвиг МС. Электронная плотность на ядрах парамагнитных ионов; зависимость от валентности иона.
18. Суперпарамагнетизм в мессбауэровской спектроскопии. Температура блокировки.
19. Суперпарамагнитная релаксация: двухуровневая модель релаксации; многоуровневая модель релаксации.
20. Механизмы усиления р.ч. поля на ядрах магнитоупорядоченных систем.
21. Особенности ЯМР на ядрах магнитоупорядоченных соединений.
22. Угловая зависимость поляризации и интенсивности сверхтонких компонент мессбауэровского спектра.
23. Релаксационный коллапс сверхтонкой структуры мессбауэровских спектров.
24. Радиочастотный коллапс сверхтонкой структуры мессбауэровских спектров.
25. Явление двойного (ЯМР + ЯГР) резонанса. Квазиэнергии ядерного спина.
26. Квантовая интерференция на мессбауэровских переходах.
27. Метод возмущенных угловых корреляций. Интегральный и дифференциальный методы угловых корреляций.
28. Мюоний. Сверхтонкая структура и эффект Зеемана. Мюон-спин-вращательная ( $\mu\text{SR}$ -) спектроскопия в твердых телах.