

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Б1.В.ДВ.01.02 КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Направление подготовки (специальность) 03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Профиль подготовки (специализация)

Форма обучения очная

Год набора 2024

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Программу составили
профессор, д.ф.-м.н. М.М.Коршунов

1 Цели и задачи изучения дисциплины

1.1 Цель преподавания дисциплины:

Изучение квантовой теории твёрдых тел, которое включает получение студентами следующих навыков: владение основами современной квантовой теории твёрдого тела, без которой невозможно творческое использование в практической деятельности уже известных физических явлений в твёрдых телах, восприятие, а тем более, генерация новых физических идей; освоение достижений квантово-механического описания электронной и колебательной систем кристалла, на которых базируются термодинамика, явления переноса и сверхпроводимость в твёрдых телах; умение решать задачи квантовой теории твёрдого тела.

1.2 Задачи изучения дисциплины:

В результате изучения дисциплины студент должен приобрести знания, умения и навыки, необходимые для его профессиональной деятельности, в частности:

- освоить применение методов квантовой теории поля в физике твёрдого тела;
- изучить подходы к описанию электронной и фононной систем кристалла;
- овладеть основами описания термодинамики, явлений переноса и сверхпроводимости в твёрдых телах;
- использовать полученные знания при изучении других дисциплин и проведении научных исследований.

1.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы высшего образования:

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине
ПК-3 Способен разрабатывать и применять новые материалы, исследовать их структуру и свойства	
ПК-3.1 Планирует процессы получения материалов и исследования их свойств	знать основы описания термодинамики, явлений переноса и сверхпроводимости в твёрдых телах; уметь применять методы квантовой теории поля в физике твёрдого тела; владеть различными подходами описания электронной и фононной систем кристалла
ПК-3.2 Анализирует перспективные материалы и их нано-, микро-, мезо- и макромасштабные свойства	знать перспективы научных исследований в области теории конденсированного состояния вещества; уметь использовать полученные знания при изучении других дисциплин и проведении научных исследований; владеть способностью обосновывать перспективы научных исследований в области теории конденсированного состояния вещества

Дисциплина реализуется без применения ЭО и ДОТ

2 Объем дисциплины (модуля)

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад.час)	Семестр
		9
Общая трудоемкость дисциплины	4 (144)	4 (144)
Контактная работа с преподавателем:	2 (72)	2 (72)
занятия лекционного типа	1 (36)	1 (36)
практические занятия	1 (36)	1 (36)
Самостоятельная работа обучающихся	1 (36)	1 (36)
Вид промежуточной аттестации (Экзамен)	36	Экзамен

3 Содержание дисциплины (модуля)

№ п/п	Вид работ	Темы занятия	Объем часов	Семестр /курс	Часы в эл. формате
Раздел 1. Электроны в твёрдом теле					
1.	Лек	Твёрдое тело – основные понятия, классификация, используемые подходы.	2	9	
2.	Пр	Твёрдое тело – основные понятия, классификация, используемые подходы.	2	9	
3.	Лек	Система коллективизированных электронов в металле. Обратная решётка, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Плотность состояний.	2	9	
4.	Пр	Система коллективизированных электронов в металле. Обратная решётка, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Плотность состояний.	2	9	
5.	Лек	Зоны электронов в кристалле, экстремумы дисперсии электронов на границе зоны Бриллюэна.	2	9	
6.	Пр	Зоны электронов в кристалле, экстремумы дисперсии электронов на границе зоны Бриллюэна.	2	9	
7.	Лек	Метод сильной связи. Функции Ваннье. Энергетическая дисперсия в одномерном и в трёхмерном случаях.	2	9	
8.	Пр	Метод сильной связи. Функции Ваннье. Энергетическая дисперсия в одномерном и в трёхмерном случаях.	2	9	
9.	Лек	Модель свободных (слабосвязанных) электронов, теория возмущений, особенности дисперсии электронов в кристалле.	2	9	
10.	Пр	Модель свободных (слабосвязанных) электронов, теория возмущений, особенности дисперсии электронов в кристалле.	2	9	
11.	Лек	Операторы вторичного квантования, коммутационные соотношения для них, связь со статистикой.	2	9	
12.	Пр	Операторы вторичного квантования, коммутационные соотношения для них, связь со статистикой.	2	9	
13.	Лек	Функция Грина, физический смысл её полюсов, неприводимая собственно-энергетическая часть, эффективная масса. Спектральная функция.	2	9	
14.	Пр	Функция Грина, физический смысл её полюсов, неприводимая собственно-энергетическая часть, эффективная масса. Спектральная функция.	2	9	
15.	Лек	Квазичастицы в твёрдом теле. Приближения Хартри и Хартри-Фока. Приближение хаотических фаз.	2	9	
16.	Пр	Квазичастицы в твёрдом теле. Приближения Хартри и Хартри-Фока. Приближение хаотических фаз.	2	9	
17.	Ср	Самостоятельная работа	10	9	
Раздел 2. Фононная подсистема, электрон-фононное взаимодействие и сверхпроводимость					
1.	Лек	Кванты колебаний в одномерной цепочке одинаковых и различных атомов. Акустические и оптические ветви дисперсии.	2	9	
2.	Пр	Кванты колебаний в одномерной цепочке одинаковых и различных атомов. Акустические и оптические ветви дисперсии.	2	9	
3.	Лек	Фононы в трёхмерном случае, динамическая матрица. Акустические и оптические ветви дисперсии.	2	9	
4.	Пр	Фононы в трёхмерном случае, динамическая матрица. Акустические и оптические ветви дисперсии.	2	9	
5.	Лек	Электрон-фононное взаимодействие, его происхождение. Получение гамильтониана взаимодействия из анализа смещений атомов.	2	9	
6.	Пр	Электрон-фононное взаимодействие, его происхождение. Получение гамильтониана взаимодействия из анализа смещений атомов.	2	9	

7.	Лек	Следствия электрон-фононного взаимодействия в ферми-жидкости, эффективная масса и время жизни квазичастиц. Теорема Мигдала.	2	9	
8.	Пр	Следствия электрон-фононного взаимодействия в ферми-жидкости, эффективная масса и время жизни квазичастиц. Теорема Мигдала.	2	9	
9.	Лек	Общие свойства сверхпроводников. Нарушение калибровочной инвариантности. Электрон-фононное взаимодействие как источник сверхпроводимости	2	9	
10.	Пр	Общие свойства сверхпроводников. Нарушение калибровочной инвариантности. Электрон-фононное взаимодействие как источник сверхпроводимости	2	9	
11.	Лек	Теория сверхпроводимости БКШ (Бардина-Купера-Шриффера), uv -преобразование Боголюбова.	2	9	
12.	Пр	Теория сверхпроводимости БКШ (Бардина-Купера-Шриффера), uv -преобразование Боголюбова.	2	9	
13.	Ср	Самостоятельная работа	10	9	
Раздел 3. Кинетические свойства					
1.	Лек	Явления переноса – уравнение Больцмана, интеграл столкновений. Проводимость в случае рассеяния на примесях, время релаксации.	4	9	
2.	Пр	Явления переноса – уравнение Больцмана, интеграл столкновений. Проводимость в случае рассеяния на примесях, время релаксации.	4	9	
3.	Ср	Самостоятельная работа	8	9	
Раздел 4. Современные методы исследования твёрдых тел					
1.	Лек	Применение спектроскопии для изучения твёрдого тела – рентгеновское излучение, рассеяние нейтронов.	4	9	
2.	Пр	Применение спектроскопии для изучения твёрдого тела – рентгеновское излучение, рассеяние нейтронов.	4	9	
3.	Ср	Самостоятельная работа	8	9	
4.	Экзамен	Экзамен	36	9	

4 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

4.1 Печатные и электронные издания:

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Т. 3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория [Электронный ресурс]: в 10 томах : учебное пособие для физических специальностей университетов : допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР?. - Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 768 с. – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/0073330.pdf> .
2. Зиненко В. И., Сорокин Б. П., Турчин П. П. Основы физики твердого тела: учебное пособие по физике твердого тела для вузов. - Москва: Физико-математическая литература, 2001. - 335 с..
3. Рабе К. М., Ан Ч. Г., Трискон Ж.-М., Струков Б. А., Лебедев А. И. Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд. - Москва: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2011. - 440 с..
4. Волков Н. В., Попков С. И. Магнетизм твердых тел; диа- и парамагнетизм; магнитный порядок (физика магнитных явлений) [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие [для студентов программ 011200.68.02 «Физика конденсированного состояния вещества»; 011200.68.06 «Физика магнитных явлений»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-885602.pdf> .
5. Суздалев И. П. Электрические и магнитные переходы в нанокластерах и наноструктурах: [монография]. - Москва: URSS, 2012. - 474 с..
6. Ищенко А. А., Гиричев Г. В., Тарасов Ю. И. Дифракция электронов: структура и динамика свободных молекул и конденсированного состояния вещества: монография. - Москва: Физматлит, 2012. - 616 с..
7. Савельев И. В. Курс общей физики: Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов вузов по техническим (550000) и технологическим (650000) направлениям: [в 3 томах]. - Санкт-Петербург: Лань, 2007. - 317 с. – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/0121107.pdf> .
8. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела [Электронный ресурс]: учебник для вузов по направлению "Физика" и специальностям "Физика и технология материалов и компонентов электронной техники", "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы". - Москва: Высшая школа, 2000. - 494 с. – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/0046414.pdf> .
9. Абрикосов А. А. Основы теории металлов: [учеб. пособие]. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 598 с..
10. Садовский М. В. Диаграмматика: лекции по избранным задачам теории конденсированного состояния. - Москва: Регулярная и хаотическая динамика, 2010. - 374 с..
11. Александров К. С., Зиненко В. И., Сорокин Б. П., Турчин П. П., Сорокин П. Б., Бурков С. И., Глушков Д. А., Четвергов Н. А., Софронова С. Н., Токарев Н. А. Теоретическая физика твердого тела [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины. - Красноярск: СФУ, 2007. - on-line – Режим доступа: http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/ELIB_DC/UMKD/i-656895.zip .
12. Овчинников С. Г., Орлов Ю. С. Квантовая теория магнетизма [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы [для студентов напр. 010700.62 «Физика», спец. 010701.65 «Физика», 010704.65 «Физика конденсированного состояния вещества»]. - Красноярск: СФУ, 2012. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-165552.pdf> .
13. Жабрун И. В., Паклин Н. Н. Симметрии в природе [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие [для самостоятельных и практических работ для студентов напр. 011200.68 «Физика»]. - Красноярск: СФУ, 2013. - – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/i-990072.pdf> .

14. Коршунов М.М., Тогушова Ю.Н. Квантовая теория твердого тела [Электронный ресурс]: [учеб-метод. материалы к изучению дисциплины для ...03.04.02.02 Физика конденсированного состояния вещества, 03.04.02.06 Физика магнитных явлений, 16.04.01.01 Физика ультрадисперсных и наноструктур]. - Красноярск: СФУ, 2018. - – Режим доступа: <https://e.sfu-kras.ru/course/view.php?id=17900> .

4.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства (программное обеспечение, на которое университет имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение):

1. Microsoft Office Professional Plus 2007 Russian Academic. Офисный пакет Microsoft Office.
2. Microsoft Windows Professional 8 Russian. Операционная система Windows.
3. Adobe Acrobat Reader DC . Программное обеспечение для просмотра и печати файлов PDF.

4.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. Поисковая машина электронных книг <http://www.poiskknig.ru>
2. Файловый архив для студентов <http://www.studfiles.ru>
3. Научная электронная библиотека <https://www.elibrary.ru/>
4. Электронно-библиотечная система СФУ <http://bik.sfu-kras.ru/>

5 Фонд оценочных средств

Фонд оценочных средств является приложением к рабочей программе дисциплины (модуля), хранится на кафедре, обеспечивающей преподавание данной дисциплины (модуля).

6 Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория для проведения лекционных, семинарских и практических занятий: специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

помещение для самостоятельной работы обучающихся: специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, АРМ обучающихся, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

По дисциплине (модулю)/ практике

Б1.В.ДВ.01.02 Квантовая теория твердого тела

Направление подготовки/специальность

03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Образовательная программа

03.05.02.30 Фундаментальная и прикладная физика

Красноярск 2025

1. Перечень компетенций с указанием индикаторов их достижения, соотнесенных с результатами обучения по дисциплине (модулю), практики и оценочными средствами

Семестр ¹	Код и содержание индикатора компетенции	Результаты обучения ²	Оценочные средства ³
ПК-3: Способен разрабатывать и применять новые материалы, исследовать их структуру и свойства			
9	ПК-3.1: Планирует процессы получения материалов и исследования их свойств	знать основы описания термодинамики, явлений переноса и сверхпроводимости в твёрдых телах	Контрольная работа Вопросы к экзамену
		уметь применять методы квантовой теории поля в физике твёрдого тела	Контрольная работа Вопросы к экзамену
		владеть различными подходами описания электронной и фононной систем кристалла	Контрольная работа Вопросы к экзамену
9	ПК-3.2: Анализирует перспективные материалы и их нано-, микро-, мезо- и макромасштабные свойства	знать перспективы научных исследований в области теории конденсированного состояния вещества	Контрольная работа Вопросы к экзамену
		уметь использовать полученные знания при изучении других дисциплин и проведении научных исследований	Контрольная работа Вопросы к экзамену
		владеть способностью обосновывать перспективы научных исследований в области теории конденсированного состояния вещества	Контрольная работа Вопросы к экзамену

¹ Семестры указываются по порядку, для каждого индикатора

² Указываются результаты обучения по дисциплине (модулю), практике, соотнесенные с индикатором достижения компетенции.

³ Указываются оценочные средства для каждого индикатора.

2. Типовые оценочные средства или иные материалы, с описанием шкал оценивания и методическими материалами, определяющими процедуру проведения и оценивания достижения результатов обучения

Тема: все темы курса

Контрольная работа

Вариант 1

1. Показать, что $[e^{-ikx}, \mathbf{p}] = \mathbf{k}e^{-ikx}$ и $[e^{-ikx}, p^2] = e^{-ikx}(2\mathbf{k}\mathbf{p} + k^2)$.
2. Диагонализировать гамильтониан $H = \omega a^\dagger a + \varepsilon(ab^\dagger ba^\dagger)$, где a, b - бозе-операторы.
3. Показать, что во втором порядке энергия возмущения основного состояния системы всегда отрицательна. Следовательно, если член потенциальной энергии в гамильтониане имеет вид λV , где λ - константа связи, то производная $\partial^2 E_g / \partial \lambda^2$ отрицательна. Здесь E_g - энергия основного состояния.
4. Оценить число виртуальных фононов, сопровождающих протон, движущийся в кристалле. Показать, что $\langle N \rangle \gg 1$; это обстоятельство означает, что собственные колебания протона и решетки мало отличаются друг от друга.

Вариант 2

1. Операторы рождения и уничтожения пар в теории БКШ определены следующим образом: $b_k^\dagger = c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger$; $b_k = c_{-k\downarrow} c_{k\uparrow}$, где c и c^\dagger - одночастичные фермиевские операторы. Показать, что операторы b и b^\dagger удовлетворяют смешанным коммутационным соотношениям:
 $[b_k, b_{k'}^\dagger] = (1 - n_{k\uparrow} - n_{-k\downarrow})\delta_{kk'}$,
 $[b_k, b_{k'}] = 0$,
 $\{b_k, b_{k'}\} = 2b_k b_{k'}(1 - \delta_{kk'})$.
2. Проанализировать вопрос о плотности состояний в сверхпроводнике вблизи энергетической щели.
3. Найти выражение для функции Грина $G(\mathbf{x}, t)$ одномерного ферми-газа в основном состоянии, считая, что все одноэлектронные состояния вплоть до k_F заполнены, а для $k > k_F$ - свободны. Рассмотреть как случай $t > 0$, так и случай $t < 0$.
4. Рассмотрите вырожденный электронный газ при $T = 0$, взаимодействующий с колебаниями решетки. Взаимодействие имеет вид $U(\mathbf{k}, \omega) = g^2 D(\mathbf{k}, \omega)$, где g - константа электрон-фононного взаимодействия, $D(\mathbf{k}, \omega) = \omega_0^2(\mathbf{k}) / (\omega^2 - \omega_0^2(\mathbf{k}) + i0)$ - фононная функция Грина. Найдите затухание квазичастицы с энергией $|\varepsilon| \ll \varepsilon_F$,

вычислив собственнно-энергетическую часть $\Sigma(\varepsilon, p)$ в низшем порядке по взаимодействию.

Методические рекомендации к контрольной работе:

На контрольном занятии каждый студент получает вариант задания и самостоятельно решает его. По результатам этих работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к экзамену.

Критерии оценки контрольной работы:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если решены не менее 90% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная и дополнена комментариями, но при этом могут быть допущены несущественные ошибки.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если решены не менее 75% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная, не допускается существенных неточностей, правильно применяются теоретические положения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если решены не менее 50% задач контрольного задания, при этом может быть нарушена логическая последовательность изложения решения, допускаются неточности и недостаточно правильные формулировки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если решены менее 50% задач контрольного задания, допущены существенные ошибки.

Вопросы к экзамену:

1. Твёрдое тело – основные понятия, классификация, используемые подходы.
2. Система коллективизированных электронов в металле. Обратная решётка, зона Бриллюэна. Теорема Блоха. Плотность состояний.
3. Зоны электронов в кристалле, экстремумы дисперсии электронов на границе зоны Бриллюэна.
4. Метод сильной связи. Функции Ваннье. Энергетическая дисперсия в одномерном и в трёхмерном случаях.
5. Модель свободных (слабосвязанных) электронов, теория возмущений, особенности дисперсии электронов в кристалле.
6. Явления переноса – уравнение Больцмана, интеграл столкновений. Проводимость в случае рассеяния на примесях, время релаксации.
7. Операторы вторичного квантования, коммутационные соотношения для них, связь со статистикой.

8. Функция Грина, физический смысл её полюсов, неприводимая собственнo-энергетическая часть, эффективная масса. Спектральная функция.
9. Приближения Хартри и Хартри-Фока.
10. Приближение хаотических (случайных) фаз.
11. Квазичастицы в твёрдом теле.
12. Кванты колебаний в одномерной цепочке одинаковых и различных атомов. Акустические и оптические ветви дисперсии.
13. Фононы в трёхмерном случае, динамическая матрица. Акустические и оптические ветви дисперсии.
14. Электрон-фононное взаимодействие, его происхождение. Получение гамильтониана взаимодействия из анализа смещений атомов.
15. Следствия электрон-фононного взаимодействия в ферми-жидкости, эффективная масса и время жизни квазичастиц. Теорема Мигдала.
16. Общие свойства сверхпроводников. Нарушение калибровочной инвариантности. Электрон-фононное взаимодействие как источник сверхпроводимости.
17. Теория сверхпроводимости БКШ (Бардина-Купера-Шриффера), uв-преобразование Боголюбова.
18. Применение спектроскопии для изучения твёрдого тела – рентгеновское излучение, рассеяние нейтронов.

Методические рекомендации к экзамену:

Экзамен является заключительным этапом изучения учебной дисциплины, цель экзамена проверить теоретические знания обучающихся, их навыки и умения. Форма проведения экзамена - устный опрос по билетам. В билет включаются два теоретических вопроса из разных разделов программы.

Критерии оценки экзамена:

Оценка «**отлично**» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал разнообразных литературных источников.

Оценка «**хорошо**» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические

положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки.

Разработчик



М.М.Коршунов