

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

Квантовая теория твердых тел

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.03.02 - Физика

Направленность образовательной программы
Физика конденсированного состояния

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.1.ДВ.02.01.01 Квантовая теория твердых тел 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
<i>ПК-3: Способен проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</i>	<i>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</i>	<i>ИД ПК-3: Способность проводить научные исследования с использованием методов и подходов квантовой теории твердых тел</i>	<i>Задачи</i>	<i>Экзамен: Контрольные вопросы</i>

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	7
Часов по учебному плану	252
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	74
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	58
- КСР	4
самостоятельная работа	44
Промежуточная аттестация	72 Экзамен

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	
Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	
Раздел 1. Подходы к описанию твердых тел: адиабатическое приближение; уравнения Хартри-Фока.	14	6	4	10	4
Раздел 2. Электронные состояния в кристаллах, теорема Блоха.	18	8	6	14	4
Раздел 3. Модели квантового описания электронной динамики в твердом теле.	20	8	8	16	4
Раздел 4. Квазиклассическая электронная динамика в полях.	18	6	8	14	4
Раздел 5. Колебания кристаллической решетки. Фононы.	16	8	4	12	4
Раздел 6. Модели электрон-фононного взаимодействия.	16	6	6	12	4
Раздел 7. Экранирование продольных электрических полей. Плазменные колебания.	18	8	6	14	4
Раздел 8. Магнетизм.	20	8	6	14	6
Раздел 9. Сверхтекучесть. Теория Ландау.	12	4	4	8	4
Раздел 10. Сверхпроводимость.	24	12	6	18	6
Аттестация	72				
КСР	4			4	
Итого	252	74	58	136	44

Содержание разделов и тем дисциплины

Раздел 1.

Металлы, диэлектрики, полупроводники. Образование зон в кристалле. Квантовое описание проблемы – применимость квантового подхода. Адиабатическое приближение – грубое и полное. Разделение задачи на электронную и решеточную части. Метод Хартри-Фока – вывод уравнений. Слагаемое Хартри и обменное взаимодействие.

Раздел 2.

Блоховские электронные состояния. Векторы обратной решетки. Свойства блоховских состояний – периодичность энергии как функции квазиимпульса. Симметрия уравнения Шредингера по отношению к обращению времени – инверсионная симметрия закона дисперсии. Граничные условия Борна-Кармана. Подсчет числа состояний. Инвариантность уравнений Хартри-Фока относительно блоховских преобразований.

Раздел 3.

Модель слабосвязанных (почти свободных) электронов. Схемы приведенных и расширенных зон. Теория возмущений. Образование щели в спектре. Функции Ваннье, их связь с блоховскими функциями, нормировка. Модель сильной связи. Электронный спектр в приближении сильной связи с учетом только ближайших соседей. Приближение огибающей. Эквивалентный гамильтониан. Огибающие блоховских функций и функций Ваннье.

Раздел 4.

Условия применимости квазиклассики. Движение блоховского электрона в электрическом поле – блоховские осцилляции. Заполнение энергетических зон и зон Бриллюэна электронами в металлах в зависимости от валентности металла; типы ферми-поверхностей. Динамика квазиклассического электрона в однородном постоянном магнитном поле. Интегралы движения. Циклотронная масса, частота и средняя скорость в направлении магнитного поля. Электронная плотность числа состояний в магнитном поле. Квазиклассическое квантование электронных орбит в магнитном поле. Эффект де Гааза-ван-Альфвена.

Раздел 5.

Колебания трехмерной кристаллической решетки: приближение Борна-Оппенгеймера – потенциальная энергия взаимодействия атомов; силовая матрица, ее свойства; уравнения движения; их решение; зона Бриллюэна; квантование волнового вектора. Динамическая матрица и ее свойства; характеристическое уравнение – частоты колебаний. Симметрия закона дисперсии. Свойства амплитуд колебаний. Свойства ортонормированности и полноты собственных векторов динамической матрицы. Акустические и оптические ветви колебаний. Нормальные координаты и нормальные колебания. Квантование нормальных колебаний. Перестановочные соотношения. Операторы рождения, уничтожения, числа частиц. Элементарные возбуждения в решетке – фононы. Оператор Гамильтона решетки. Полная энергия решетки как энергия газа фононов. Вектор смещения атомов решетки в операторном виде.

Раздел 6.

Взаимодействие электронной подсистемы с колебаниями решетки в приближении Борна-Оппенгеймера; условие применимости подхода. Эффекты изменения фононных частот и равновесных положений ядер при электронных переходах – возможность совершить электронный переход с неизменным числом фононов, но с изменением их частот. Переход с многоэлектронного на одноэлектронный язык. Основные модели электрон-фононного взаимодействия: модель жестких ионов; модель деформированных ионов; деформационный потенциал. Взаимодействие электронов с продольными фононными модами в полярных кристаллах.

Раздел 7.

Экранировка продольного электрического поля в рамках теории возмущений – формула Линдхарда. Экранирование статических полей в металлах – коновская особенность и сингулярность диэлектрической функции в длинноволновом пределе. Экранирование переменных длинноволновых полей. Плазменная частота. Плазменные колебания – плазмоны. Особенности экранирования статических полей в диэлектриках/полупроводниках – формула Линдхарда для этого случая.

Раздел 8.

Парамагнитная восприимчивость Кюри. Внутреннее (молекулярное) поле Вейсса. Намагниченность, решение уравнения для намагниченности. Закон Кюри-Вейсса. Температура Кюри. Ферромагнетик. Обменное взаимодействие электронов и магнетизм. Обменная энергия – возможность понижения энергии системы для конфигураций со спиновой поляризацией. Модель магнетизма свободных электронов. Условие на концентрацию газа электронов для реализации поляризованного состояния. Обменное взаимодействие в атоме – незаполненные d- и f-оболочки переходных и редкоземельных металлов. Межатомное обменное взаимодействие – магнетизм и спиновый гамильтониан в молекуле Гайтлера-Лондона. Модель Гейзенберга – обменный спиновый гамильтониан.

Раздел 9.

Опыты Капицы с жидким He4. Элементарные возбуждения в He4. Условие сверхтекучести Ландау. Спектр элементарных возбуждений в He4.

Раздел 10.

Экспериментальные факты, сверхтекучесть электронного газа. Электрон-фононное взаимодействие – притяжение электронов. Образование куперовских пар в окрестности сферы Ферми – спаривание электронов с противоположными импульсами и спинами. Основное состояние сверхпроводника – размытая ферми-сфера. Функция распределения пар по энергиям – вероятность заселения электронами состояний с противоположными импульсами. Энергия основного состояния сверхпроводника – выигрыш в энергии по сравнению с заполненной ферми-сферой нормального металла. Спектр элементарных возбуждений сверхпроводника: образование энергетической щели; плотность состояний элементарных возбуждений; длина когерентности. Условие сверхтекучести. Сверхток и его критическое значение.

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.

нет

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 - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Задача 1: Для кристалла с простой кубической решеткой найти закон дисперсии электронов в рамках модели сильной связи и построить блоховские волновые функции из атомных функций d -типа. Учесть взаимодействие только с ближайшими соседями.

Задача 2: Для простой квадратной решетки (постоянная решетки a) найти величину энергии перекрытия первой (самой нижней) и второй энергетических зон в приближении свободных электронов.

Задача 3: Волновые функции d -электронов в изолированном атоме, принадлежащие одному уровню энергии, можно представить в действительном виде:

$$\psi_1 = f(r)yz; \quad \psi_2 = f(r)zx; \quad \psi_3 = f(r)xy; \quad \psi_4 = f(r)(x^2 - y^2); \quad \psi_5 = f(r)(3z^2 - r^2).$$

Одинаково ли нормированы эти функции? Снимет ли пятикратное вырождение атомного уровня кристаллическое поле окружения, если это поле будет иметь кубическую симметрию? Какой простейшей функцией полиномиального типа это поле может быть промоделировано?

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Предложенная задача решена с использованием оригинального подхода.
отлично	Предложенная задача решена.
очень хорошо	Предложенная задача решена с небольшими неточностями.
хорошо	Предложенная задача решена с подсказками преподавателя.
удовлетворительно	Предложенная задача решена с существенной помощью преподавателя.
неудовлетворительно	Предложенная задача не решена.
плохо	Отсутствует понимание условий задачи.

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

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор 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 умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

			объеме	некоторые с недочетами	недочетами	и, выполнены все задания в полном объеме	
<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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и 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. Взаимодействие электронной подсистемы с колебаниями решетки в приближении Борна-Оппенгеймера.

2. Обменное взаимодействие – возможность понижения энергии системы для конфигураций со спиновой поляризацией. Сравнение энергий полностью поляризованного и полностью неполяризованного состояний для газа электронов в модели зоммерфельдовского желе – условие на концентрацию газа.
3. Условие сверхтекучести Ландау. Спектр элементарных возбуждений в He4.
4. Экранировка продольного электрического поля в рамках теории возмущений – формула Линдхарда. Экранирование статических полей в металлах – коновская особенность и сингулярность диэлектрической функции в длинноволновом пределе.
5. Основное состояние сверхпроводника – размытая ферми-сфера. Функция распределения куперовских пар по энергиям. Энергия основного состояния сверхпроводника.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Даны исчерпывающие ответы на все вопросы с использованием оригинального подхода.
отлично	Даны ответы на все вопросы.
очень хорошо	Ответы на вопросы даны с некоторыми неточностями.
хорошо	Даны ответы не на все вопросы.
удовлетворительно	Даны ответы на меньшую часть вопросов.
неудовлетворительно	Ответы на вопросы не даны.
плохо	Отсутствует понимание сути вопросов.

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

Основная литература:

1. Займан Д. М. Принципы теории твердого тела = Principles of the Theory of Solids : пер. со 2-го англ. изд. / под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. - М. : Мир, 1974. - 472 с. : с черт. - 2.21., 69 экз.
2. Харрисон У. Теория твердого тела / пер. с англ. Г. Л. Краско ; под ред. Р. А. Суриса. - М. : Мир , 1972. - 616 с. : ил. - 2.85., 6 экз.
3. Абрикосов Алексей Алексеевич. Основы теории металлов. - Изд. 2-е, доп. и испр. - М. : Физматлит, 2009. - 600 с. - ISBN 978-5-9221-1097-6 : 180.00., 1 экз.
4. Анималу А. О. Е. Квантовая теория кристаллических твердых тел / пер. с англ. Е. Л. Ивченко, А. Л. Эфроса. - М. : Мир, 1981. - 574 с. : ил. - 2.60., 5 экз.

Дополнительная литература:

1. Киттель Чарлз. Квантовая теория твердых тел / пер. с англ. А. А. Гусева. - М. : Наука, 1967. - 491 с. : черт. - 2.31., 97 экз.
2. Ансельм Андрей Иванович. Введение в теорию полупроводников : [учеб. пособие для физ. специальностей вузов]. - 2-е изд., доп. и перераб. - М. : Наука, 1978. - 615 с. : ил. - 1.60., 25 экз.

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

Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ <http://www.lib.unn.ru/>.

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): Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент.

Рецензент(ы): Хомицкий Денис Владимирович, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Бурдов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 30.11.2024, протокол № б/н.