

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 № 6 от 31.05.2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Квантовая теория твердых тел

Уровень высшего образования
бакалавриат

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
профиль «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Квантовая теория твердых тел» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является элективной дисциплиной, преподается на четвертом году обучения, в седьмом и восьмом семестрах. Освоению дисциплины предшествует освоение дисциплин (модулей) «Общая физика», «Квантовая механика», «Физика конденсированного состояния».

Целями освоения дисциплины «Квантовая теория твердых тел» являются:

1. освоение концепции квазичастиц в конденсированных системах;
2. освоение методов квантовой теории поля и статистической физики в теории конденсированного состояния;
3. формирование представления о физической сущности таких явлений, как ферромагнетизм, сверхтекучесть и сверхпроводимость;
4. формирование представления о современных направлениях исследования в физике конденсированного состояния.

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	<i>Демонстрация способности проводить научные исследования с помощью современной приборной базы, сложного физического оборудования и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта</i>	(ПК-3) Знать основные разделы квантовой теории конденсированного состояния, формирующие фундаментальную научно-образовательную базу физики; (ПК-3) Уметь решать типовые и нестандартные задачи по физике, требующие применения аппарата квантовой теории конденсированного состояния; (ПК-3) Владеть навыками постановки и решения основных типов задач квантовой теории конденсированного состояния, требующимися для моделирования профильных задач физики.	Индивидуальные собеседования, тест	Вопросы к экзамену

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	10 7 семестр – 5 8 семестр – 5
Часов по учебному плану	360 180 (7), 180 (80)
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	81 (7), 54 (8)
- занятия лекционного типа	16 (7), 4 (8)
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	64 (7), 48 (8)
- КСР	2
самостоятельная работа	99 (7), 126 (8)
Промежуточная аттестация	36 экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
<u>Седьмой семестр</u>						
1. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. Актуальные проблемы теории твердых тел. Краткий обзор современного состояния теории конденсированных систем. Концепция квазичастиц.	18	2	8	–	10	8
2. Электронные свойства идеальных кристаллов. Теорема Блоха. Закон дисперсии. Приближения сильной и слабой связи. Электронные и дырочные ветви закона дисперсии носителей в полупроводниках.	70	6	24	–	30	40
3. Металлы и полупроводники во внешних полях. Эффект де-Гааза – ван Альфена. Динамика квазичастиц в металлах. Блоховские осцилляции.	91	8	32	–	40	51

Квантование орбит. Динамика квазичастиц в магнитном поле.						
В т.ч. текущий контроль	2	2				–
Промежуточная аттестация – зачет						
<u>Восьмой семестр</u>						
4. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие. Фононы. Закон дисперсии. Квантование фононных возбуждений. Теплоемкость и теплопроводность. Электрон-фононное взаимодействие. Гамильтониан Фрелиха.	33	1	12	–	13	20
5. Кинетические явления и коллективные возбуждения. Неидеальный Бозе-газ. Сверхтекучесть. Экранирование. Плазмоны. Рассеяние квазичастиц. Кинетика. Квантовый отклик. Формула Кубо.	38	1	12	–	13	25
6. Электронные свойства неупорядоченных систем. Неупорядоченные системы. Модели беспорядка. Проводимость случайных сред в квазиклассическом приближении. Плотность электронных состояний в “грязных” металлах. Метод функций Грина в теории неупорядоченных систем. Локализация Андерсона.	38	1	12	–	13	25
7. Системы с парным межчастичным взаимодействием. Ферми-жидкостные эффекты. Взаимодействие квазичастиц. Сильнокоррелированные системы. Модель Хаббарда. Магнетизм. Модели Стонера и Гейзенберга. Магноны. Сверхпроводимость. Фононный механизм сверхпроводимости. Куперон. Концепция щели в спектре. Теория БКШ. Квазичастицы в сверхпроводниках.	33	1	12	–	13	20
В т.ч. текущий контроль	2	2				–
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа студента – неотъемлемая часть подготовки высококвалифицированного специалиста в соответствующей области. Ее цель – формирование у студентов способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа студентов подразумевает проработку лекционного и дополнительного материала, решение домашних контрольных работ с последующей проверкой навыков решения задач.

Проработка лекционного материала осуществляется еженедельно после проведения аудиторных занятий в рамках часов, отведенных студентам на самостоятельную работу. Кроме того, работа с лекционным и дополнительным материалом (рекомендованной литературой, приведенной в конце данной программы) проводится в период сессии при подготовке к экзамену по дисциплине.

Выполнение домашних работ осуществляется еженедельно или раз в две недели в соответствии с графиком изучения соответствующего лекционного материала и проведения практических занятий по соответствующей тематике.

Задачи для выполнения самостоятельных контрольных работ по каждому разделу дисциплины составляются преподавателем самостоятельно при ежегодном обновлении банка тестовых заданий. Количество вариантов зависит от числа обучающихся.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Экзамен	
Превосходно	Превосходная подготовка с очень незначительными погрешностями. Исчерпывающее и логически строгое изложение всех разделов дисциплины. Владение материалом позволяет быстро справиться с видоизмененным заданием. Успешное решение любых типов практических заданий.
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с некоторыми ошибками. Твердое знание всех разделов дисциплины. Допускаются неточности, нарушения в последовательности изложения материала. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Очень хорошо	Хорошая подготовка с рядом заметных недочетов. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения основных типов практических заданий.
Хорошо	В целом, хорошая подготовка, но со значительными ошибками. Твердое знание основных разделов дисциплины. Владение необходимыми приемами и способами решения практических заданий.
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям. Знания основного содержания разделов дисциплины, допускаются грубые неточности, неправильные формулировки, нарушения в последовательности изложения материала. Имеющихся знаний достаточно для освоения дисциплин последующих курсов. Допускаются значительные ошибки при выполнении практических заданий.
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания. Незнание значительной части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная. Отсутствуют знания большей части основного содержания разделов дисциплины. Имеющихся знаний совершенно недостаточно для освоения дисциплин последующих курсов.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

– индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии: практические контрольные задания. Типы практических контрольных заданий:

– *выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).*

Критерии ответа студента на экзамене

Оценка «отлично» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный и полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «хорошо» – Ответ полный и правильный, на основании изученной теории; материал изложен в определенной логической последовательности при этом допущены две–три несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя и правильно; полностью выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «удовлетворительно» – Ответ полный, но при этом допущена существенная ошибка или неполный, несвязный ответ и выполнены индивидуальные практические задания.

Оценка «неудовлетворительно» – Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя, не выполнены индивидуальные практические задания

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1 Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

Вопрос 1. Квазичастицей в твердом теле не является

Ответ:

- а) поляритон;
 - б) рипплон;
 - в) экситон;
 - г) фонон.
- Правильный ответ – б).

Вопрос 2. Базисными функциями в методе сильной связи расчета электронной структуры твердого тела являются

Ответ:

- а) функции Ваннье;
 - б) ортогонализированные плоские волны;
 - в) присоединенные плоские волны;
 - г) функции Кона-Латтинджера.
- Правильный ответ – а).

Вопрос 3. Частота циклотронного резонанса в слабом магнитном поле

Ответ:

- а) не зависит от величины приложенного магнитного поля;
 - б) пропорциональна корню из величины приложенного магнитного поля;
 - в) линейна по приложенному магнитному полю;
 - г) пропорциональна квадрату приложенного магнитного поля.
- Правильный ответ – в).

Вопрос 4. В твердотельной системе с тремя атомами в элементарной ячейке существует в общем случае

Ответ:

- а) 12 дисперсионных ветвей фононов;
- б) 6 дисперсионных ветвей фононов;
- в) 3 дисперсионных ветвей фононов;
- г) 9 дисперсионных ветвей фононов.

Правильный ответ – г).

Вопрос 5. Надщелевые квазичастичные возбуждения в сверхпроводнике описываются уравнением

Ответ:

- а) Гинзбурга-Ландау;
- б) Горькова;
- в) Боголюбова – де Жена;
- г) Узаделя.

Правильный ответ – в).

Вопрос 1. Какой дисперсией обладает спектр одночастичных квазичастичных возбуждений в нормальной ферми-жидкости?

Ответ:

- а) квадратичной;
- б) линейной;
- в) не имеет дисперсии.

Правильный ответ – б).

Вопрос 2. Блоховские осцилляции во внешнем электрическом поле обусловлены:

Ответ:

- а) рассеянием на мелких примесях;
- б) межзонными электронными переходами;
- в) периодичностью электронного закона дисперсии в твердом теле.

Правильный ответ – в).

Вопрос 3. Какой дисперсией обладают акустические фононы вблизи центра зоны Бриллюэна?

Ответ:

- а) линейной;
- б) квадратичной;
- в) не обладают дисперсией.

Правильный ответ – а).

Вопрос 4. Хвосты плотности состояний возникают в системе

Ответ:

- а) с межэлектронным взаимодействием;
- б) с электрон-фононным взаимодействием;
- в) со статическим беспорядком

Правильный ответ – в).

Вопрос 5. Фазовый переход Мотта-Хаббарда в твердом теле обусловлен:

Ответ:

- а) беспорядком;
- б) повышением температуры;
- в) электронными корреляциями.

Правильный ответ – в).

Вопрос 1. При низкой температуре полуметаллом из ниже перечисленных веществ является

Ответ:

- а) висмут;
- б) нитрид бора;
- в) натрий.

Правильный ответ – а).

Вопрос 2. В чем суть явления осцилляций де Гааза-ван Альфена?

Ответ:

- а) периодическое изменение магнитной восприимчивости с изменением величины приложенного магнитного поля;
- б) периодическое изменение проводимости с изменением величины приложенного магнитного поля;
- в) образование решетки вихрей в сверхпроводнике.

Правильный ответ – а).

Вопрос 3. Оптические фононные ветви возникают в кристаллах, элементарная ячейка которых

Ответ:

- а) обладает кубической симметрией;
- б) содержит не менее двух атомов;
- в) имеет характерный линейный размер не менее 1 нм.

Правильный ответ – б).

Вопрос 4. Условие возникновения локализованных состояний в одномерной неупорядоченной электронной системе.

Ответ:

- а) энергетический масштаб беспорядка больше средней кинетической энергии электронов;
- б) энергетический масштаб беспорядка больше средней потенциальной энергии электронов;
- в) все одночастичные состояния в одномерной неупорядоченной системе локализованы.

Правильный ответ – в).

Вопрос 5. В теории Лондонов плотность сверхпроводящего тока линейным образом связана:

Ответ:

- а) с электрическим полем;
- б) со скалярным потенциалом электрического поля;
- в) с векторным потенциалом магнитного поля.

Правильный ответ – в).

6.3.2. Вопросы для итогового контроля сформированности компетенции:

1. Концепция квазичастиц. Электронные свойства идеальных кристаллов.
2. Теорема Блоха.
3. Закон дисперсии. Динамика квазичастиц в магнитном поле.
4. Фононы. Закон дисперсии. Теплоемкость и теплопроводность.
5. Динамика квазичастиц в магнитном поле.

6. Металлы во внешних полях. Эффект де-Гааза – ван Альфена.
7. Квазиклассическая динамика квазичастиц в металлах. Уравнения движения.
8. Плотность электронных состояний в “грязных” металлах.
9. Электрон-фононное взаимодействие. Гамильтониан Фрелиха.
10. Аномальный скин-эффект.
11. Электронные и дырочные ветви закона дисперсии носителей в полупроводниках. Модель Латтинжера.

1. Затухание Ландау в плазме твердых тел.
2. Рассеяние квазичастиц. Кинетика.
3. Квантовый отклик. Формула Кубо.
4. Метод функций Грина в теории неупорядоченных систем. Локализация Андерсона.
5. Неупорядоченные системы. Модели беспорядка.
6. Проводимость сред в квазиклассическом приближении. Теория протекания.
7. Сильнокоррелированные электронные системы. Модель Хаббарда.
8. Магнетики. Модель Стонера. Модель Гейзенберга.
9. Лондоновская электродинамика сверхпроводников.
10. Задача Купера. Концепция щели в спектре.
11. Теория БКШ.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Учебные аудитории могут быть при необходимости оснащены демонстрационным оборудованием для сопровождения учебных занятий презентациями.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Автор(ы):

д. ф.-м. н., доцент В.А. Бурдов.

Рецензенты(ы):

д. ф.-м. н., профессор Д.А. Павлов.

Заведующий кафедрой:

зав. кафедрой теоретической физики физического факультета, д. ф.-м. н., доцент В.А. Бурдов.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 20.05.2023, протокол № б/н.