

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО
решением
Ученого совета ННГУ
протокол от
«_____» _____ 202_ г. № _____

Рабочая программа дисциплины

Микроскопическая теория сверхпроводимости

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Феноменологическая теория сверхпроводимости» относится к Блоку ФТД «Факультативные дисциплины» ООП. Дисциплина является факультативной дисциплиной, преподается на первом году обучения, во втором семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- знакомство студентов с теорией Бардина-Купера-Шриффера, описывающей один из интереснейших физических эффектов - сверхпроводимость, являющей собой проявление квантовых эффектов в макроскопических масштабах;
- формирование у студентов современного представления об основных проявлениях сверхпроводимости и микроскопической теории;
- ознакомление студентов с основными подходами для описания сверхпроводимости;
- формирование у студентов общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
ПК-3 Способен свободно владеть разделами физики и применять результаты научных исследований в профильных областях для решения научно-практических и научно-технологических задач	<i>З1 (ПК-3) Знать</i> основные явления и эффекты физики сверхпроводников. <i>У1 (ПК-3) Уметь</i> пользоваться основными подходами для решения теоретических и экспериментальных задач физики сверхпроводимости. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам сверхпроводимости. <i>В1 (ПК-3) Владеть</i> навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (1 час – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося (39 часов самостоятельная работа в течение семестра).

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
из них						
Тема 1. Основы квантовой механики систем многих частиц и статистической физики	10	2	2		4	6
Тема 2. Гамильтониан электрон-ионной системы. Введение фононов	10	2	2		4	6
Тема 3. Газ электронов, описание в терминах квазичастиц, электронов и дырок	10	2	2		4	6
Тема 4. Электрон-фононное взаимодействие	10	2	2		4	6
Тема 5.Задача Купера	8		2		2	6
Тема 6.Гамильтониан Бардина – Купера - Шриффера	10	2	2		4	6
Тема 7.Основное состояние сверхпроводника	10	2	2		4	6
Тема 8.Квазичастицы	10	2	2		4	6
Тема 9.Эксперименты по проверке существования энергетической щели	10	2			2	8
в т.ч.текущий контроль			2			
Промежуточная аттестация – зачет с оценкой						54

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде решений и последующей проверки домашних контрольных работ, а также в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на экзамене.

4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по

решению практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних заданий, написание рефератов с предоставлением докладов или кратких сообщений, а также теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, мастер-классы экспертов и специалистов в области качественно-численного анализа конкретных современных задач физики сверхпроводимости.

Формой промежуточного контроля знаний студентов по дисциплине является экзамен, в ходе которых оцениваются уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

5. 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 контрольных 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.

Типовые задачи, предлагаемые студентам в качестве домашних контрольных работ:

Задача 1.1

Из теории Г-Л для пространственно однородного случая вывести выражения для $H_c(T)$.

Задача 1.2

С помощью коммутационных соотношений вычислите среднюю кинетическую энергию в состоянии БКШ, напишите её как функцию и сравните её со средней кинетической энергией в состоянии Ферми.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине, включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-2: способностью свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать основные явления и эффекты физики сверхпроводников	отсутствие знаний материала	наличие грубых ошибок в основном материале	знание основного материала с рядом негрубых ошибок	знание основного материала с рядом заметных погрешностей	знание основного материала с незначительными погрешностями	знание основного материала без ошибок и погрешностей	знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей

<u>Умения</u> Уметь пользоваться основными подходами для решения теоретических и экспериментальных задач физики сверхпроводимости. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам сверхпроводимости.	Полное отсутствие умения использовать основные законы теории физики сверхпроводников для решения задач	Неумение использовать основные законы теории физики сверхпроводников для решения задач (демонстрация грубых ошибок, противоречащих основным законам)	Умение использовать основные законы теории физики сверхпроводников для решения стандартных задач с негрубыми ошибками	Умение использовать все изученные законы теории физики сверхпроводников для решения стандартных задач с негрубыми ошибками	Умение использовать все изученные законы теории физики сверхпроводников для решения стандартных задач с незначительными погрешностями	Умение использовать все изученные законы теории физики сверхпроводников для решения стандартных задач и задач повышенной сложности с незначительными погрешностями	Умение использовать все изученные законы теории физики сверхпроводников для решения стандартных задач и задач повышенной сложности
<u>Навыки</u> Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.	Полное отсутствие навыка решения стандартных задач	Не владение навыками решения стандартных задач (демонстрация грубых ошибок, противоречащих основным законам теории физики сверхпроводников)	Владение навыками решения стандартных задач по основным разделам курса с негрубыми ошибками	Владение навыками решения стандартных задач по всем разделам курса с негрубыми ошибками	Владение навыками решения стандартных задач по всем разделам курса с незначительными погрешностями	Владение навыками решения стандартных задач и задач повышенной сложности с незначительными погрешностями	Владение навыками решения стандартных задач и задач повышенной сложности
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания

Промежуточный контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на которых определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме. Устная часть заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и

последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть предусматривает решение двух задач по различным разделам курса.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	<p>Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач.</p> <p>100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий</p>
Отлично	<p>Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше</p>
Очень хорошо	<p>Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с заметными недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 80%.</p>

Удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.
Неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.
Плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

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

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

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

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенций.

Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

- 1) Квантовая механика свободного электрона в кристаллической решетке. Каковы собственные функции одночастичного гамильтониана и квантовые числа.
- 2) С помощью операторов рождения и уничтожения электронов в блоховских состояниях напишите выражение для Гамильтониана идеального электронного газа в периодической кристаллической решетке. Каково основное состояние, что такое химпотенциал и энергия Ферми.
- 3) Напишите минимальный гамильтониан БКШ, учитывающий главные взаимодействия. Какие приближения делаются при расчете основного состояния. Почему?
- 4) Квазичастичное описание электронного газа. Связь операторов \mathbf{a} , \mathbf{a}^+ для частиц и квазичастиц. Коммутационные соотношения. Выведите формулу для дисперсии квазичастиц в нормальном электронном газе. С помощью критерия Ландау докажите, что электронный газ не обладает сверхпроводимостью.
- 5) Покажите, что в модели БКШ химический потенциал определяется таким же выражением, как и в нормальном ферми-газе.
- 6) Фононы в кристаллах. Общая теория. Адиабатическое приближение. В простейшей одномерной модели получите формулу для дисперсии фононов. Акустические и оптические фононы. Возможные поляризации.
- 7) Покажите, что в задаче Купера наиболее сильно связываются электроны с нулевым, относительно Ферми-сферы, суммарным импульсом. Напишите уравнение Шредингера и проанализируйте, как зависит энергия связи от малого суммарного импульса.
- 8) Квантовая механика фононов. Операторы рождения и уничтожения. Связь с операторами смещений и импульсов атомов. Коммутационные соотношения в узельном (координатном) и импульсном представлениях. Гамильтониан фононов и его собственные числа.
- 9) Напишите волновую функцию БКШ через параметры \mathbf{u}_k , \mathbf{v}_k . Используя явные выражения для u , v найдите масштаб размазки Ферми-поверхности и оцените размер куперовской пары
- 10) Природа электрон-фононного взаимодействия. Опишите э-ф взаимодействие в приближении заданного атомного потенциала. Напишите гамильтониан в терминах операторов рождения и уничтожения для электронов и фононов. Напишите выражение матричного элемента э-ф взаимодействия через ионные потенциалы и 1 электронные волновые функции. Покажите, что в приближении сплошной среды при взаимодействии сохраняется импульс.
- 11) Напишите волновую функцию возбужденного состояния БКШ сверхпроводника с одной квазичастицей, докажите что волновая функция возбужденного состояния БКШ сверхпроводника с одной квазичастицей ортогональна основному состоянию.
- 12) Напишите общую формулу теории возмущений для 1 и 2 поправки к энергии и найдите поправку 2 порядка к энергии двух электронов из-за обмена продольным фононом в модели желе. При каких условиях обмен фононом ведет к притяжению между электронами. Выясните, при каких соотношениях поправка к энергии велика. Что происходит при резонансе? Разберитесь с точки зрения законов сохранения энергии и импульса.
- 13) Что такое плотность состояний, выражение для нее в идеальном ферми газе. Что происходит с плотностью состояний при сверхпроводящем переходе.
- 14) Какова типичная дисперсия электронов в периодической решетке. График? Что такое обратная решетка? Что такое зона Бриллюэна.
- 15) Что такое прямой вариационный принцип и пробные функции. Напишите пробную функцию БКШ и объясните физ. смысл $u(k), v(k)$.

- 16) Получите формулы для энергии Ферми и энергии Дебая.
- 17) Как определяется параметр порядка через u, v и другие параметры.
- 18) Что такое дебаевская шуба? Вычислите её толщину в k -пространстве.
- 19) Выведите уравнение самосогласования для Δ в теории БКШ для нулевой температуры. Решите его и проанализируйте зависимость Δ от параметров.
- 20) В представлении операторов рождения и уничтожения напишите гамильтониан электрон-фононной системы с учетом кулоновского взаимодействия. Дайте графическое представление с помощью диаграмм Фейнмана.
- 21) Напишите определение энергии квазичастицы и выведите формулу, описывающую дисперсию квазичастиц в теории БКШ. Нарисуйте график дисперсии квазичастиц в сверхпроводнике, сравните его с дисперсией квазичастиц в идеальном ферми газе.
- 22) Обоснуйте предположение, сделанное БКШ, что взаимодействуют только электроны с противоположными спинами.
- 23) Сформулируйте и обоснуйте критерий сверхтекучести Ландау и докажите, что электронная БКШ жидкость сверхтекуча. Определите критическую скорость и критическую плотность электрического тока, при которой разрушается сверхпроводимость. Нарисуйте дисперсию квазичастиц в движущейся электронной сверхпроводящей жидкости.
- 24) Сформулируйте адиабатическое приближение для расчета фононов. Оцените скорость звука в твердом теле, пользуясь моделью Борна-Оппенгеймера. Выразите её через скорость Ферми в металле.

Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

Для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Задача 1.1

Из теории Г-Л для пространственно однородного случая вывести выражения для $N_s(T)$.

Задача 1.2

С помощью коммутационных соотношений вычислите среднюю кинетическую энергию в состоянии БКШ, напишите её как функцию и сравните её со средней кинетической энергией в состоянии Ферми.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

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

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

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Теория сверхпроводимости»

а) основная литература:

- 1) Основы теории металлов/ Абрикосов А.А.; Под ред. Л.А. Фальковского. - 2-е изд., доп. и испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 600 с. — Режим доступа: ЭБС «Консультант студента»
<http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110976.html>
- 2) Р.Фейнман. Статистическая механика. М. "Мир". 1975. -407 с. -21 экз.
- 3) Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М - Фейнмановские лекции по физике: в 9 т. Т. 8 - 9. - М.: Мир, 1978. - 524 с. -24 экз.
- 4) *Дж.Шриффер*. Теория сверхпроводимости.М.Наука.1970. -311 с. -5 экз.

б) дополнительная литература:

- 1) *Тинкхам*. Введение в сверхпроводимость. 1980. Атомиздат. -310 с. -3 экз.
- 2) *Роуз -Инс*. Введение в физику сверхпроводимости. М. "Мир".1972. -272 с. -3 экз.
- 3) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. - Электродинамика сплошных сред. - М.: Физматгиз, 1959. - 532 с. -7 экз.
- 4) *Тилли Дэвид Р. М.* "Мир" 1977. Сверхтекучесть и сверхпроводимость. -304 с. -2 экз.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- 1) Physical Review B: Condensed matter and materials physics <http://prb.aps.org/>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 03.04.02 Физика.

Автор(ы) _____ Курин В.В.

Рецензент(ы) _____

Зав. кафедрой _____

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии физического факультета ННГУ от «_____» _____ 202_ года, протокол № б/н.

Председатель
Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ _____ / Перов А.А. /