

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 № 13 от 30.11.2022 г.

Рабочая программа дисциплины
Микроскопическая теория сверхпроводимости

Уровень высшего образования
Магистратура

Направление подготовки / специальность
03.04.02 - Физика

Направленность образовательной программы
магистерская программа «Физика конденсированного состояния»

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2023 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Микроскопическая теория сверхпроводимости» относится к вариативной части Блока 1 «Дисциплины, модули» ОПОП. Дисциплина является обязательной для освоения во втором семестре первого года обучения в магистратуре.

Целями освоения дисциплины являются:

1. знакомство студентов с теорией Бардина-Купера-Шриффера, описывающей один из интереснейших физических эффектов - сверхпроводимость, являющей собой проявление квантовых эффектов в макроскопических масштабах;
2. формирование у студентов современного представления об основных проявлениях сверхпроводимости и микроскопической теории;
3. ознакомление студентов с основными подходами для описания сверхпроводимости;
4. 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 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 свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной и проектной деятельности	<i>ПК-3.1. Знание основных законов физики</i> <i>ПК-3.2. Умение решать научно-инновационные задачи в своей инновационной и проектной деятельности</i> <i>ПК-3.3. Навыки применения результатов научных исследований в инновационной и проектной деятельности и зарубежного опыта</i>	(ПК-3) Знать основные явления и эффекты физики сверхпроводников; (ПК-3) Уметь пользоваться основными подходами для решения теоретических и экспериментальных задач физики сверхпроводимости. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам сверхпроводимости; (ПК-3) Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.	Индивидуальное собеседование	Вопросы к экзамену

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144

в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	34
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	110
Промежуточная аттестация	45 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, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
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 – Экзамен						54

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 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.

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)
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

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

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

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 незначительные 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. 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 $H_c(T)$.

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.

6.3.2. 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 a , a^\dagger 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 u_k , 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.

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)

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 ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.04.02 «Физика», профиль «Физика конденсированного состояния».

Автор(ы):

Главный научный сотрудник отдела физики сверхпроводников (отд. 120) ИФМ РАН, д. ф.-м. н.,
В.В. Курин.

Зав. каф. "Физика наноструктур и наноэлектроника" _____

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 17.11.2022, протокол № б/н.