

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Высшая школа общей и прикладной физики

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Теория сверхпроводимости

---

Уровень высшего образования

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

03.04.02 - Физика

---

Направленность образовательной программы

Общая и прикладная физика

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.02 Теория сверхпроводимости 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
ПК-7: Способен планировать и организовывать физические исследования, научные семинары и конференции	ПК-7.1: Демонстрация способности планировать и организовывать физические исследования, научные семинары и конференции	ПК-7.1: Знать основные явления и эффекты физики сверхпроводников. Уметь пользоваться основными подходами для решения теоретических и экспериментальных задач физики сверхпроводимости. Уметь ориентироваться в современной научной литературе по вопросам сверхпроводимости. Владеть навыками решения задач, основанных на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях и умениях.	Задачи	Зачёт: Задачи  Экзамен: Контрольные вопросы Задачи

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>5</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>180</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	3
<b>самостоятельная работа</b>	<b>77</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b>

### 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	
	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
Тема 1. Введение	10	2	2	4	6
Тема 2. Термодинамическое описание сверхпроводников	10	2	2	4	6
Тема 3. Линейная электродинамика сверхпроводников	10	2	2	4	6
Тема 4. Теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау	10	2	2	4	6
Тема 5. Сверхпроводники второго рода	14	4	4	8	6
Тема 6. Эффект Джозефсона	14	4	4	8	6
Тема 7. Основы квантовой механики систем многих частиц и статистической физики	8	2	2	4	4
Тема 8. Гамильтониан электрон-ионной системы. Введение фононов	8	2	2	4	4
Тема 9. Газ электронов, описание в терминах квазичастиц, электронов и дырок	8	2	2	4	4
Тема 10. Электрон-фононное взаимодействие	8	2	2	4	4
Тема 11. Задача Купера	8	2	2	4	4
Тема 12. Гамильтониан Бардина – Купера – Шриффера	9	2	2	4	5
Тема 13. Основное состояние сверхпроводника	9	2	2	4	5
Тема 14. Квазичастицы	7	1	1	2	5
Тема 15. Эксперименты по проверке существования энергетической щели	8	1	1	2	6
Аттестация	36				
КСР	3				3
Итого	180	32	32	67	77

### Содержание разделов и тем дисциплины

Тема 1. Введение

Тема 2. Термодинамическое описание сверхпроводников

Тема 3. Линейная электродинамика сверхпроводников

Тема 4. Теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау

Тема 5. Сверхпроводники второго рода

Тема 6. Эффект Джозефсона

Тема 7. Основы квантовой механики систем многих частиц и статистической физики

Тема 8. Гамильтониан электрон-ионной системы. Введение фононов

Тема 9. Газ электронов, описание в терминах квазичастиц, электронов и дырок

Тема 10. Электрон-фононное взаимодействие

Тема 11. Задача Купера

Тема 12. Гамильтониан Бардина – Купера – Шриффера

Тема 13. Основное состояние сверхпроводника

Тема 14. Квазичастицы

Тема 15. Эксперименты по проверке существования энергетической щели

#### **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.

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.

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

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

#### **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-7:**

##### Задача 1.1

Чему равен экранирующий поверхностный ток в сверхпроводнике, помещенном в магнитное поле.

### Задача 1.2

Чему равен скачок теплоемкости при N-S переходе.

### Задача 1.3

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

### Задача 1.4

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.

### **Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)**

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить

Оценка	Критерии оценивания
	полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.

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

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора 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	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами .	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели	Имеется минимальный набор навыков для решения	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продemonстрированы навыки при решении нестандарт	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартны

	вследствие отказа обучающегося от ответа	место грубые ошибки	стандартны х задач с некоторым и недочетами	х задач с некоторым и недочетами	х задач без ошибок и недочетов	ных задач без ошибок и недочетов	х 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 - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-7

##### Задача 1.1

Чему равен экранирующий поверхностный ток в сверхпроводнике, помещенном в магнитное поле.

##### Задача 1.2

Чему равен скачок теплоемкости при N-S переходе.

##### Задача 1.3

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

##### Задача 1.4

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.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Справедливо одно из следующих утверждений: (1). Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач. (2). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. (3). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. (4). Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами. (5). Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
не зачтено	Справедливо одно из следующих утверждений: (1). Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки. (2). Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.

### 5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-7

#### Задача 1.1

Чему равен экранирующий поверхностный ток в сверхпроводнике, помещенном в магнитное поле.

#### Задача 1.2

Чему равен скачок теплоемкости при N-S переходе.

### Задача 1.3

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

### Задача 1.4

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.

### **Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)**

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом.

Оценка	Критерии оценивания
	Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.

### 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-7

- 1) Нарисовать фазовую диаграмму сверхпроводника (СП) на плоскости  $H, T$ .
- 2) Что такое критическая температура  $T_c$  и критическое поле  $H_c(T)$ .
- 3) Что такое эффект Мейсснера.
- 4) Напишите уравнения Максвелла.
- 5) Какова характерная толщина слоя в которой течет ток, как она зависит от температуры в теории Гинзбурга-Ландау.
- 6) Напишите уравнения двухжидкостной модели сверхпроводника, какие параметры в нее входят.
- 7) Для  $e_i$  процессов написать выражение для проводимости и диэлектрической проницаемости сверхпроводника.
- 8) Написать уравнение Лондонов.
- 9) Написать связь между током и векторным потенциалом для сверхпроводника.
- 10) Написать первое и второе начало термодинамики для сверхпроводника.
- 11) Написать выражение для свободной энергии сверхпроводника.
- 12) Напишите связь между внутренней и свободной энергией сверхпроводника.
- 13) Написать условие равновесия нормальной и сверхпроводящей фазы в образце.
- 14) Написать функционал теории Гинзбурга-Ландау (Г-Л) для пространственно однородного случая.
- 15) Написать уравнения Г-Л без магнитного поля.
- 16) Что такое длина когерентности и как она зависит от температуры в теории Г-Л
- 17) Написать уравнения Г-Л с магнитным полем.
- 18) Написать калибровочное преобразование для  $A$  и  $\psi$  и доказать инвариантность уравнений Г-Л относительно этого преобразования.
- 19) Вывести формулу для кванта потока  $\Phi_0$ .

- 20) Чему равна глубина проникновения магнитного поля в теории Г-Л и как она зависит от температуры.
- 21) Напишите систему единиц, обезразмеривающую систему Г-Л.
- 22) Напишите выражение для критического поля через  $\xi$  и  $\lambda$ .
- 23) Что такое параметр Г-Л -  $\kappa$  в теории Г-Л.
- 24) Чем отличаются сверхпроводники 1 и 2 родов.
- 25) Напишите выражение для энергии N-S границы в критическом магнитном поле через распределения  $V(x)$  и  $\psi(x)$ .
- 26) Нарисуйте график зависимости энергии N-S границы от параметра  $\kappa$ .
- 27) Нарисуйте фазовую диаграмму сверхпроводника 2 рода.
- 28) Что такое верхнее и нижнее критические поля в СП 2 рода.
- 29) СП помещен в во внешнее однородное поле  $H=H_{c2}$ . Напишите зависимость магнитного поля ( $B$  и  $A$ ) в СП от координат.
- 30) Чему равно верхнее критическое поле в теории Г-Л.
- 31) Нарисуйте распределение магнитного поля и параметра порядка в одиночном абрикосовском вихре.
- 32) Квантовая механика свободного электрона в кристаллической решетке. Каковы собственные функции одночастичного гамильтониана и квантовые числа.
- 33) 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.
- 34) Напишите минимальный гамильтониан БКШ, учитывающий главные взаимодействия. Какие приближения делаются при расчете основного состояния. Почему?
- 35) Квазичастичное описание электронного газа. Связь операторов  $a$ ,  $a^+$  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.
- 36) Покажите, что в модели БКШ химический потенциал определяется таким же выражением, как и в нормальном ферми-газе.
- 37) Фононы в кристаллах. Общая теория. Адиабатическое приближение. В простейшей одномерной модели получите формулу для дисперсии фононов. Акустические и оптические фононы. Возможные поляризации.

- 38) 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.
- 39) 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.
- 40) 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
- 41) 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.
- 42) Напишите волновую функцию возбужденного состояния БКШ сверхпроводника с одной квазичастицей, докажите что волновая функция возбужденного состояния БКШ сверхпроводника с одной квазичастицей ортогональна основному состоянию.
- 43) 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.
- 44) Что такое плотность состояний, выражение для нее в идеальном ферми газе. Что происходит с плотностью состояний при сверхпроводящем переходе.
- 45) Какова типичная дисперсия электронов в периодической решетке. График? Что такое обратная решетка? Что такое зона Бриллюэна.
- 46) Что такое прямой вариационный принцип и пробные функции. Напишите пробную функцию БКШ и объясните физ. смысл  $u(k), v(k)$ .
- 47) Получите формулы для энергии Ферми и энергии Дебая.
- 48) Как определяется параметр порядка через  $u, v$  и другие параметры.
- 49) Что такое дебаевская шуба? Вычислите её толщину в  $k$ -пространстве.
- 50) Выведите уравнение самосогласования для  $\Delta$  в теории БКШ для нулевой температуры. Решите его и проанализируйте зависимость  $\Delta$  от параметров.
- 51) В представлении операторов рождения и уничтожения напишите гамильтониан электрон-фононной системы с учетом кулоновского взаимодействия. Дайте графическое представление с помощью диаграмм Фейнмана.

- 52) 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.
- 53) Обоснуйте предположение, сделанное БКШ, что взаимодействуют только электроны с противоположными спинами.
- 54) 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.
- 55) Сформулируйте адиабатическое приближение для расчета фононов. Оцените скорость звука в твердом теле, пользуясь моделью Борна-Оппенгеймера. Выразите её через скорость Ферми в металле.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов. Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок. Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные

Оценка	Критерии оценивания
	умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа. Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа.

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

Основная литература:

1. Абрикосов Алексей Алексеевич. Основы теории металлов : [учеб. пособие] / [под ред. Л. А. Фальковского]. - 2-е изд., доп. и испр. - М. : Физматлит, 2010. - 600 с. - ISBN 978-5-9221-1097-6 : 541.42., 1 экз.
2. Фейнман Р. П. Статистическая механика : курс лекций / пер. с англ. Н. М. Плакиды и Ю. Г. Рудого ; под ред. Д. Н. Зубарева. - 2-е изд. - М. : Мир, 1978. - 407 с. : ил. - 24.00., 7 экз.
3. Фейнман Ричард П. Фейнмановские лекции по физике = The Feynman Lectures on Physics : в 9 т. Т. 8 - 9. Квантовая механика / [пер. с англ. Г. И. Копылова ; под ред. Я. А. Смородинского]. - 2-е изд. - М. : Мир, 1978. - 524 с. - 50.00., 24 экз.
4. Шриффер Дж. Теория сверхпроводимости / пер. с англ. Е. Г. Максимова и Д. И. Хомского ; под ред. Д. А. Киржница. - М. : Наука, 1970. - 311 с. : ил. - 1.28., 2 экз.

Дополнительная литература:

1. Тинкхам Майкл. Введение в сверхпроводимость / пер. с англ. В. К. Корнева и др. ; под ред. К. К. Лихарева. - М. : Атомиздат, 1980. - 310 с. : ил. - 3.40., 2 экз.
2. Роуз-Инс А. Введение в физику сверхпроводимости / пер. с англ. Н. И. Гинзбург ; под ред. В. В. Шмидта. - М. : Мир, 1972. - 272 с. : ил. - 1.13., 2 экз.
3. Ландау Лев Давидович. Электродинамика сплошных сред. - М. : Физматгиз, 1959. - 532 с. : черт. - (Теоретическая физика). - 11.70., 1 экз.

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

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

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами

обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: 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. Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети Интернет и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

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 03.04.02 - Физика.

Автор(ы): Курин Владислав Викторович, доктор физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Викторов Михаил Евгеньевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 07.02.2024, протокол № 4.