

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

1. Квантовая теория твердого тела

2. Лектор

2.1. Д.физ.-мат. наук, профессор Кульбачинский Владимир Анатольевич, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

3. Аннотация дисциплины

Цель курса – дать базовые знания по квантовой теории твердого тела. С помощью концепции квазичастиц, позволяющей рассматривать элементарные возбуждения ансамблей сильно-взаимодействующих частиц в твердом теле как слабо неидеальный газ элементарных возбуждений, строятся модели фононных и электронных систем. Рассматривается симметрия кристаллов. Проводится рассмотрение решеток Браве для двумерных и трехмерных кристаллов. Рассматривается представление Вигнера-Зейтца, обратные решетки. В первую очередь показываются особенности поведения электронов, как фермионов. Вводятся понятия квазиимпульса, блоховской волновой функции электронов в кристалле. Рассматривается зонная структура твердых тел. Для элементарных возбуждений в Ферми-жидкости рассматриваются статистика Ферми-Дирака, термодинамика. Вводится понятие плотности состояний. Строятся зоны Бриллюэна для всех решеток и поверхности Ферми для металлов с разной валентностью. Приводятся сведения по квантованию энергетического спектра электронов в магнитном поле и квантовым осцилляционным эффектам, таким как эффект Шубникова – де Гааза и эффект де Гааза – ван Альфена. Рассчитываются теплопроводность твердых тел и теплоемкость электронной подсистемы. Демонстрируются последние достижения и открытия в этой области.

4. Цели освоения дисциплины.

Цель курса - освоение студентами фундаментальных знаний в области квантовой теории твердого тела, кристаллических решеток, электронов, их законов дисперсии, плотности состояний, квантовых эффектов, практического применения кристаллов.

5. Задачи дисциплины.

- формирование базовых знаний в области квантовой теории твердого тела как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей фундамент знаний в области физики конденсированного состояния;
- обучение студентов основным понятиям в квантовой теории твердого тела, понятию элементарных возбуждений и концепции квазичастиц в квантовой теории твердого тела;
- формирование подходов к выполнению самостоятельных исследований студентами в области физики конденсированного состояния вещества в рамках выпускных работ на степень бакалавра.

6. Компетенции.

6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ОНК-1, ПК-1; ОНК-5; ИК-1; ИК-2; ИК-3; ИК-4

6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

ПК-2; ПК-3; ПК-6

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать

- современные проблемы квантовой теории твердого тела;
- теоретические модели в квантовой теории твердого тела и ее приложениях;
- концепцию квазичастиц в квантовой теории твердого тела

уметь

- рассчитывать параметры квазичастиц в твердом теле, такие как эффективные массы, концентрации, энергии Ферми электронов в кристаллах;
- уметь использовать и строить модели энергетического спектра электронов в кристаллах;

владеть

- основными методами расчета параметров квазичастиц в кристаллах

иметь опыт деятельности

- выполнения простейших квантово-механических расчетов и подготовки научных сообщений

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр 7	Всего
Общая трудоёмкость, акад. часов	72	72
Аудиторная работа:	36	36
Лекции, акад. часов	36	36
Семинары, акад. часов	-	-
Лабораторные работы, акад. часов	-	-
Самостоятельная работа, акад. часов	36	36
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)	экзамен	экзамен

N раз- дела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий			Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа		Самостоятельная работа		
		Лекции	Семинары			Лабораторные работы
1	Тепловые возбуждения решетки – фононы. Теплоемкость, теплопроводность.	№1. 2 часа. Локальные и квазилокальные фононы. Взаимодействия фононов. Анггармонизм колебаний атомов. Нормальное рассеяние фононов и процессы переброса.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Взаимодействия фононов. Рассмотрение материала об анггармонизме колебаний.	Оп, Об, Дз
		№2. 2 часа. Теплопроводность диэлектриков, металлов и сплавов. Рассеяние фононов на точечных дефектах и границах кристаллитов.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Теплопроводность диэлектриков, металлов и сплавов. Рассмотрение материала о теплопроводности Решение задач на тему “Теплопроводность”	
		№3. 2 часа. Теплоемкость трехмерных и двумерных решеток. Поверхностные фононы. Фононы и ротоны в жидком гелии.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Теплоемкость двумерных и трехмерных кристаллических решеток. Решение задач на тему "Теплоемкость"	ДЗ, Оп, Об
2.	Электронная Ферми-жидкость. Фермиевские электроны, зонная структура твердого тела, квазиимпульс электрона	№4. 2 часа. Модель Ферми-жидкости. Волновая функция электрона. Одноэлектронное приближение, адиабатическое приближение. Теорема Блоха. Квазиимпульс электрона.			2 часа. Работа с лекционным материалом: модель Ферми-жидкости. Решение задач на тему "Нахождение волновых функций электрона и энергии"	
		№5. 2 часа. Закон дисперсии электрона в решетке. Энергетические зоны.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Зонная структура твердого тела. Решение задач на тему "Энергетические зоны в кристалле"	
3.	Зоны Бриллюэна. Заполнение зон Бриллюэна электронами.	№6. 2 часа. Зоны Бриллюэна. Заполнение зон Бриллюэна электронами.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Заполнение зон Брилллюэна электронами. Построение вторых и третьих зон Бриллюэна для различных решеток. Подготовка к контрольной работе.	КР, Оп, Об
		№7. 2 часа. Свойства границ зон Бриллюэна, Диэлектрики, металлы, полупроводники.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Диэлектрики, металлы, полупроводники. Работа с лекционным материалом. Построение зон Бриллюэна для различного типа решеток.	

4.	Плотность электронных состояний. Особенности Ван Хофа в плотности состояний.	№8. 2 часа. Плотность электронных состояний в трехмерном случае. Электронные системы с квадратичным законом дисперсии. Плотность электронных состояний в двумерном и одномерном случае. Системы с произвольным законом дисперсии.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Плотность электронных состояний. Решение задач на тему "Плотность электронных состояний в кристалле"	Оп, Об, Дз
		№9. 2 часа. Особенности Ван Хофа в плотности состояний в трехмерном, двумерном и одномерном случаях.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Особенности Ван Хофа в плотности состояний.	
5.	Поверхности Ферми, построение поверхностей Ферми. Метод Харрисона	№10. 2 часа. Заполнение зон Бриллюэна электронами. Метод Харрисона построения поверхностей Ферми. Поверхности Ферми металла с плоской квадратной решеткой при различной валентности.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Метод Харрисона построения поверхностей Ферми. Решение задач на тему "Построение поверхностей Ферми для двумерных решеток"	Дз, Оп, Об
		№11. 2 часа. Поверхности Ферми щелочных металлов.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Поверхности Ферми щелочных металлов.	
		№12. 2 часа. Поверхности Ферми благородных металлов.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Поверхности Ферми благородных металлов. Построение поверхностей Ферми для различного типа решеток и валентностей металлов	
		№13. 2 часа. Поверхности Ферми металлов с простой гексагональной решеткой. Классификация поверхностей Ферми.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Классификация поверхностей Ферми. Построение поверхностей Ферми для различного типа решеток и валентностей металлов	
6.	Эффективная масса электрона. Электронная теплоемкость, электропроводность, теплопроводность. Формула Лифшица.	№14. 2 часа. Эффективная масса электрона. Эффективная масса плотности состояний. Ферми-жидкостная и электрон-фононная перенормировка эффективной массы электронов в металлах. Циклотронная масса электрона. Электронная теплоемкость.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Эффективная масса электрона. Решение задач на тему "Расчет эффективной и циклотронной массы электрона при разных законах дисперсии"	Дз, Оп, Об

		№15. 2 часа. Электропроводность металлов. Феноменологическое описание электропроводности. Электропроводность в модели фермиевских электронов. Формула Лифшица. Электронная теплопроводность.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Электропроводность в модели Фермиевских электронов. Подготовка к контрольной работе	
7.	Квантование энергии электрона в магнитном поле.	№16. 2 часа. Квантование энергетического спектра свободных электронов в магнитном поле. Уровни Ландау. Квазиклассическое приближение. Квантование энергетического спектра электронов в магнитном поле в реальных металлах. Спиновое расщепление уровней Ландау.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Уровни Ландау, их вырождение. Решение задач на тему "Квантование энергии электронов в магнитном поле".	Оп, Об, Кр
		№17. 2 часа Траектория движения электрона в кристалле в магнитном поле в пространстве импульсов и в реальном пространстве.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Связь траекторий электрона в импульсном и реальном пространствах.	
		№18. 2 часа. Распределение квантованных магнитным полем электронов в пространстве импульсов. Спектральная плотность состояний электронов в магнитном поле. Квантовые осцилляционные эффекты.			2 часа. Работа с лекционным материалом: Спектральная плотность состояний в магнитном поле. Решение задач на тему "Связь частот осцилляций с параметрами электронной системы в кристаллах"	

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина является обязательной.
2. Вариативная часть, профессиональный блок, модуль «Дисциплины профиля».
3. Курс неразрывно связан с дисциплинами общей физики и математики младших курсов и является теоретическим базисом к специальному физическому практикуму, последующим дисциплинам специализации.

3.1. Курс базируется на дисциплинах: Термодинамика, Механика, Электромагнетизм, Оптика, Введение в квантовую физику, Физика атомного ядра и частиц, Математический анализ, Теория функций комплексной переменной, Дифференциальные уравнения. Введение в специальность – физика низких температур, Введение в физику конденсированного состояния.

3.2. Этот курс необходим как предшествующий для специального физического практикума, научно-исследовательской практики, научно-исследовательской работы, курсовой работы, дисциплин: «Экспериментальные методы физики низких температур», «Введение в физику сверхпроводимости», "Введение в физику магнитных явлений", "Основы физики полупроводников", "Экспериментальные методы физики конденсированного состояния", "Упругие и тепловые свойства твердых тел", "Низкотемпературные фазовые переходы".

10. Образовательные технологии

использование средств компьютерного сопровождения учебного процесса, преподавание дисциплины в форме авторского курса по программе, составленной на основе результатов исследований научной школы Н.Б. Брандта МГУ.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Образцы домашних заданий:

1. Оценить энергию Ферми и скорость Ферми электронов в металле.
2. Рассчитать плотность состояний на уровне Ферми в металле.
3. Оценить температуру, при которой теплоемкость решетки в металле сравнивается с электронной теплоемкостью.
4. Получить численное значение электронной части теплопроводности металла при комнатной температуре.
5. Построить поверхность Ферми ПК решетки, $z=4$.
6. Построить поверхность Ферми ГЦК решетки, $z=4$.
7. Рассчитать концентрацию электронов в металле с эффективной массой электронов $m^*=0,1m_0$ и энергией Ферми 5 эВ.
8. Какова энергия Ферми электронов, если частота осцилляций Шубникова-де Гааза 100 Тл, эффективная масса электронов $m^*=0,1m_0$.

Пример письменной контрольной работы:

1. Рассчитать численно разницу энергий между 1 и 3 уровнями Ландау (в эВ) в магнитном поле 10 Тл, если эффективная масса электронов $m^*=0,11m_0$.
2. Квантовые осцилляционные эффекты. Связь частоты осцилляций с концентрацией электронов и экстремальным сечением поверхности Ферми.
3. Оценить фермиевский импульс электронов в кристалле с концентрацией электронов 10^{19}см^{-3} .
4. Энергия Ферми в некотором кристалле равна 100 мэВ, эффективная масса электронов $m^*=0,01m_0$. Чему равна частота осцилляций Шубникова – де Гааза при сферической поверхности Ферми?

Пример вопросов для опроса

1. Роль электронов в теплопроводности металлов.
2. Условия наблюдения квантовых осцилляционных эффектов.

3. Траектория движения электрона в реальном пространстве в магнитном поле и ее связь с поверхностью Ферми.
4. Особенности Ван Хова в плотности состояний.
5. Фазовые переходы 2,5 рода.
6. Понятия зон Бриллюэна для электронов.

Пример тем для обсуждения

1. Связь топологии поверхности Ферми с проводимостью кристаллов.
2. Влияние на эффективную массу электронов электрон-фононного взаимодействия.
3. Возможность восстановления поверхности Ферми по отдельным ее сечениям.
4. Квазилокальные колебания и их проявление в свойствах кристаллов.

Контрольные вопросы к экзамену:

1. Кристаллическая структура и ее описание.
2. Кристаллические решетки Браве. Элементы симметрии.
3. Ячейка Вигнера-Зейтца, ее построение.
4. Обратная решетка. Построение обратных решеток для трехмерных решеток Браве.
5. Невзаимодействующие электроны в потенциальном ящике. Энергия и импульс Ферми.
6. Электрон в поле периодического потенциала кристаллической решетки. Эффективный потенциал. Волновая функция электрона.
7. Одноэлектронное приближение, адиабатическое приближение. Теорема Блоха.
8. Квазиимпульс электрона.
9. Закон дисперсии электрона в решетке. Энергетические зоны.
10. Зоны Бриллюэна. Построение зон Бриллюэна для двумерной квадратной решетки.
11. Зоны Бриллюэна для различных трехмерных кристаллических решеток.
12. Заполнение зон Бриллюэна электронами. Диэлектрики, металлы, полупроводники.
13. Метод Гаррисона построения поверхностей Ферми.
14. Поверхности Ферми металла с плоской квадратной решеткой при различной валентности.
15. Поверхности Ферми щелочных металлов. Поверхности Ферми благородных металлов.
16. Поверхности Ферми металлов с простой гексагональной решеткой.
17. Поверхности Ферми металлов с гексагональной плотноупакованной решеткой.
18. Классификация поверхностей Ферми.
19. Плотность электронных состояний в трехмерном случае. Электронные системы с квадратичным законом дисперсии.
20. Плотность электронных состояний в двумерном и одномерном случае.
21. Плотность электронных состояний для систем с произвольным законом дисперсии.
22. Особенности Ван Хова в плотности состояний.
23. Эффективная масса электрона. Эффективная масса плотности состояний.
24. Циклотронная масса электрона.
32. Ферми-жидкостная и электрон-фононная перенормировка эффективной массы электронов в металлах.
25. Теплопроводность диэлектриков, металлов и сплавов.
26. Электронная теплоемкость.
27. Электропроводность металлов. Феноменологическое описание электропроводности.
28. Электропроводность в модели фермиевских электронов. Формула Лифшица.
29. Температурная зависимость электропроводности металлов.
30. Теплопроводность диэлектриков, металлов и сплавов.
31. Энергетический спектр свободных электронов в магнитном поле. Уровни Ландау.
32. Энергетический спектр электронов в магнитном поле в реальных металлах.
33. Спиновое расщепление уровней Ландау.
34. Траектория движения электрона в кристалле в магнитном поле в пространстве импульсов и в реальном пространстве.
35. Распределение электронов в пространстве импульсов в магнитном поле.

36. Спектральная плотность состояний электронов в магнитном поле.

37. Эффект Шубникова-де Гааза, эффект де Гааза-ван Альфена.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература:

1. Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский, Квазичастицы в физике конденсированного состояния, Москва, Физматлит, 2016, 634 стр.

Дополнительная литература:

1. Ч. Киттель, Квантовая теория твердых тел, Москва, Наука, Главная редакция физ. мат. литературы, 1967, 492 стр.

2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Статистическая физика, М. Наука, 1964, 568 стр.

3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Электродинамика сплошных сред, М. Наука, 1982, 624 стр.

13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Лекции читаются в криогенном корпусе (кафедра физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ, ул. академика Хохлова, строение 8, 2 этаж, аудитория 2-05. В аудитории имеется проекционное оборудование, ноутбук, экран, доска.