

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Квантовая физика твердого тела
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики сверхпроводимости и квантовых материалов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Экзамен

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: П.Д. Григорьев, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики сверхпроводимости и квантовых материалов 21.02.2025

Аннотация

В данном курсе рассматриваются квантовые физические свойства твердых тел, включая металлы, диэлектрики, аморфные тела и квазикристаллы. В курсе излагаются основы квантового транспорта заряда, свойства Ферми-жидкостного состояния. Курс рассчитан на студентов-магистров ЛФИ (МФТИ), в основном, экспериментаторов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Ознакомить студентов с развитием представлений об электронных свойствах, электронной структуре твёрдых тел. Научить студентов анализировать экспериментальные данные на основе современной электронной теории твердых тел.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области квантовой физики твердого тела как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности в области современной нанoeлектроники;
- понимание ключевых теоретических результатов, лежащих в основе современного описания свойств твердых тел;
- формирование подходов к выполнению студентами исследований и расчетов в области электронных свойств твердых тел в рамках выпускных работ на степень магистра, формирование базовых знаний и умений для дальнейших исследований в рамках выпускных квалификационных работ.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.

УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
	УК-5.2 Способен определять теоретическое и практическое значение культурно-языкового фактора при взаимодействии различных философских и научных традиций
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

1. Современные проблемы квантовой физики твердых тел.
2. О взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.
3. Теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
4. Принципы симметрии, топологии, и законы сохранения.
6. Основные электронные свойства твердых тел, требуемые для исследований в низкотемпературных экспериментах.
7. Научные задачи, над которыми работают в базовых лабораториях образовательной программы.

уметь:

1. Эффективно использовать на практике теоретические знания: понятия, результаты, гипотезы, законы.
2. Представлять панораму универсальных методов и законов современной квантовой физики низкоразмерных систем.
3. Абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических процессов и явлений.
4. Делать численные оценки масштаба ожидаемых эффектов.
5. Планировать оптимальное проведение экспериментов для решения поставленных задач.

владеть:

1. Теоретическими основами экспериментальных методов проведения измерений в области квантовой физики твердых тел с использованием транспортных, туннельных, термодинамических, ВЧ, оптических и резонансных методов.
2. Информацией о современном состоянии исследований в области квантовой физики твердого тела.
3. Теоретическими моделями фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
4. Методами анализа и обработки экспериментальных данных.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение и базовые знания стат. физики	3			3
2	Структура и упругие свойства кристаллов	2			2
3	Теплоемкость идеальных кристаллов диэлектриков	2			2
4	Теплопроводность идеальных кристаллов диэлектриков, аморфных тел и квазикристаллов	2			2
5	Вырожденный газ Ферми, его термодинамические и кинетические свойства	2			2
6	Явления переноса в металлах	2			2
7	Кинетические свойства металлов в магнитном поле. Методы изучения электронной структуры металлов	2			2
8	Электронный спектр одномерной цепочки (дираковская гребенка). Движение электрона в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях	3			3
9	Вычисление компонент тензора проводимости в эффекте Холла, квазиклассический предел. Рассеяние электрона с переворотом спина	3			3
10	Вычисление термо-эдс термопары, эффект Пельтье Уравнение Шредингера для электрона в магнитном поле	3			3
11	Вычисление статистической суммы двумерного ферми-газа в магнитном поле с уровнями Ландау. Осциллирующая часть магнитного момента ферми-газа	3			3
12	Вычисление статистической суммы двумерного ферми-газа в магнитном поле	3			3
13	Введение в магнетизм твердых тел	3			3

14	Ферромагнетизм	2			2
15	Антиферромагнетизм и ферромагнетизм	2			2
16	Дополнительные вопросы магнетизма	2			2
17	Дефекты в кристаллах. Прыжковая проводимость	2			2
18	Волны зарядовой плотности	2			2
19	Рамановская спектроскопия	2			2
20	Прецессия спина в магнитном поле. Магнитный резонанс и измерение обменных полей в магнетиках методом рассеяния мюонов	3			3
21	Волны зарядовой и спиновой плотности: решение уравнений Боголюбова-де Женна	3			3
22	Аналитические свойства функции Грина	3			3
23	Связь функции Грина электрона с вольт-амперной характеристикой электрического микроконтакта	3			3
24	Связь функции Грина электрона с сечением магнитного рассеяния нейтронов в металле	3			3
Итого часов		60			60
Подготовка к экзамену		60 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение и базовые знания стат. физики

Основы статистической физики и теория возмущений. Кристаллическая структура и методы ее исследования. Типы связи в твердых телах.

2. Структура и упругие свойства кристаллов

Структура и упругие свойства кристаллов. Жидкие кристаллы и квазикристаллы. Фононы. Их классификация и закон дисперсии.

3. Теплоемкость идеальных кристаллов диэлектриков

Теплоемкость идеальных кристаллов диэлектриков. Модели Дебая и Эйнштейна.

4. Теплопроводность идеальных кристаллов диэлектриков, аморфных тел и квазикристаллов

Теплопроводность идеальных кристаллов диэлектриков. Теплоемкость и теплопроводность аморфных тел и квазикристаллов. Диэлектрическая восприимчивость изоляторов. Различные вклады в диэлектрическую восприимчивость и их частотная зависимость.

5. Вырожденный газ Ферми, его термодинамические и кинетические свойства

Вырожденный газ Ферми. Его теплоемкость. История развития области: теории Друде и Зоммерфельда. Электроны в кристаллической решетке и их закон дисперсии в приближениях сильной и слабой связи. Теорема Блоха. Поверхность Ферми.

6. Явления переноса в металлах

Явления переноса в металлах. Кинетическое уравнение для электронов в металлах. Электропроводность и теплопроводность металлов и их температурные зависимости. Закон Видемана Франца и область его применимости. Термоэлектрические эффекты в металлах.

7. Кинетические свойства металлов в магнитном поле. Методы изучения электронной структуры металлов

Металлы в магнитном поле. Магнитосопротивление и эффект Холла. Металлы в высокочастотном электромагнитном поле. Скин-эффект. Методы изучения электронной структуры металлов. Фотоэффект с угловым разрешением (ARPES) и магнитные квантовые осцилляции.

8. Электронный спектр одномерной цепочки (дираковская гребенка). Движение электрона в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях

Практическое занятие: вычисление электронного спектра одномерной цепочки (дираковская гребенка)- точное решение и решение в приближении слабой связи. Движение электрона в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях. Скорость дрейфа. Магнитосопротивление.

9. Вычисление компонент тензора проводимости в эффекте Холла, квазиклассический предел. Рассеяние электрона с переворотом спина

Практическое занятие по теме: Вычисление компонент тензора проводимости в эффекте Холла для двумерного электронного газа, квазиклассический предел. Рассеяние электрона с переворотом спина. Вклад магнитного рассеяния в электросопротивление в эффекте Кондо.

10. Вычисление термо-эдс термопары, эффект Пельтье Уравнение Шредингера для электрона в магнитном поле

Практическое занятие по теме: Вычисление термо-эдс термопары, эффект Пельтье в контакте двух проволок из разных металлов. Решение уравнения Шредингера для электрона в магнитном поле: плотность состояний, степень вырождения уровней Ландау.

11. Вычисление статистической суммы двумерного ферми-газа в магнитном поле с уровнями Ландау. Осциллирующая часть магнитного момента ферми-газа

Практическое занятие по теме: Вычисление статистической суммы двумерного ферми-газа в магнитном поле с уровнями Ландау. Осциллирующая часть магнитного момента ферми-газа.

12. Вычисление статистической суммы двумерного ферми-газа в магнитном поле

Практическое занятие по теме: Вычисление статистической суммы двумерного ферми-газа в магнитном поле с двумя магнитными подзонами: парамагнетизм Паули. Парамагнитная восприимчивость идеального ферми-газа.

Семестр: 2 (Весенний)

13. Введение в магнетизм твердых тел

Магнетизм. Диамагнетики и парамагнетики. Природа этих эффектов и различные вклады в магнитную восприимчивость. Природа и типы обменного взаимодействия.

14. Ферромагнетизм

Ферромагнетизм. Температурная зависимость намагниченности и закон дисперсии магнонов в ферромагнетиках. Домены.

15. Антиферромагнетизм и ферримагнетизм

Антиферромагнетизм и ферримагнетизм. Температурная зависимость и анизотропия намагниченности в антиферромагнетиках. Закон дисперсии магнонов. Экспериментальные методы обнаружения и исследования антиферромагнетиков. Магнитный резонанс. Адиабатическое размагничивание.

16. Дополнительные вопросы магнетизма

Магнитные фрустрации и спиновые стекла. Зонный ферромагнетизм (Стонеровская неустойчивость). Спин-орбитальное взаимодействие в металлах.

17. Дефекты в кристаллах. Прыжковая проводимость

Дефекты в кристаллах. Прыжковая проводимость.

18. Волны зарядовой плотности

Волны зарядовой плотности. Неустойчивость Пайерлса.

19. Рамановская спектроскопия

Рамановская спектроскопия. Перовскиты.

20. Прецессия спина в магнитном поле. Магнитный резонанс и измерение обменных полей в магнетиках методом рассеяния мюонов

Практическое занятие по теме: Прецессия спина в магнитном поле. Магнитный резонанс и измерение обменных полей в магнетиках методом рассеяния мюонов.

21. Волны зарядовой и спиновой плотности: решение уравнений Боголюбова-де Женна

Практическое занятие по теме: Волны зарядовой и спиновой плотности. Решение уравнений Боголюбова-де Женна.

22. Аналитические свойства функции Грина

Практическое занятие по теме: Аналитические свойства функции Грина. Функция Грина идеального ферми-газа. Связь мнимой части функции Грина со спектральной плотностью электронных уровней энергии.

23. Связь функции Грина электрона с вольт- амперной характеристикой электрического микроконтакта

Практическое занятие по теме: Связь функции Грина электрона с вольт- амперной характеристикой электрического микроконтакта.

24. Связь функции Грина электрона с сечением магнитного рассеяния нейтронов в металле

Практическое занятие по теме: Связь функции Грина электрона с сечением магнитного рассеяния нейтронов в металле.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Компьютер, проектор, доска.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель ; под общ. ред. А. А. Гусева ; пер. с 4-го амер. изд. А. А. Гусева, А. В. Пахнева - М.Наука,1978
2. Квантовая теория твердых тел [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ч. Киттель ; пер.с англ. А. А. Гусева .— М. : Наука, 1967 .— 491с.

Дополнительная литература

1. Основы теории металлов [Текст] : учеб. руководство / А. А. Абрикосов .— М. : Наука, 1987 .— 520 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Т. 7: Теория упругости, 1965
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Т.3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория, 1989
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Т.5: Статистическая физика, 1964

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. Займан Д., Принципы теории твердого тела Электронная библиотека, Москва: Мир, 1974
2. Векилов Ю. Х., Кузьмин Ю. М., Мухин С. И., Муковский Я. М., Векилов Ю. Х., Курс теоретической физики в задачах и упражнениях: учеб. пособие для студ. вузов спец. 'Физика металлов' и 'Металловедение и терм. обраб. металлов', Электронная библиотека, М.: Учеба, 2005
3. Векилов Ю. Х., Кузьмин Ю. М., Мухин С. И., Муковский Я. М., Векилов Ю. Х., Курс теоретической физики в задачах и упражнениях: учебное пособие для студ. вузов спец. - 'Физика металлов', 'Металловедение и термическая обработка металлов', Электронная библиотека М.: Учеба, 2007
4. Векилов Ю. Х., Иванов И. А., Матвеева Ю. Л., др., Мухин С. И., Электронная теория металлов: сб. задач, М.: Изд-во МИСиС, 2013

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Adobe Acrobat, Adobe Reader, Power point. Zoom, MS Office, LMS Canvas, MS Teams

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, знать ключевые эксперименты и экспериментальные основы базовых теорий, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики сверхпроводимости и квантовых материалов
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Экзамен
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: П.Д. Григорьев, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
	УК-5.2 Способен определять теоретическое и практическое значение культурно-языкового фактора при взаимодействии различных философских и научных традиций
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая физика твердого тела» обучающийся должен:

знать:

1. Современные проблемы квантовой физики твердых тел.
2. О взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.
3. Теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
4. Принципы симметрии, топологии, и законы сохранения.
6. Основные электронные свойства твердых тел, требуемые для исследований в низкотемпературных экспериментах.
7. Научные задачи, над которыми работают в базовых лабораториях образовательной программы.

уметь:

1. Эффективно использовать на практике теоретические знания: понятия, результаты, гипотезы, законы.
2. Представлять панораму универсальных методов и законов современной квантовой физики низкоразмерных систем.
3. Абстрагироваться от несущественных факторов при моделировании реальных физических процессов и явлений.
4. Делать численные оценки масштаба ожидаемых эффектов.
5. Планировать оптимальное проведение экспериментов для решения поставленных задач.

владеть:

1. Теоретическими основами экспериментальных методов проведения измерений в области квантовой физики твердых тел с использованием транспортных, туннельных, термодинамических, ВЧ, оптических и резонансных методов.
2. Информацией о современном состоянии исследований в области квантовой физики твердого тела.
3. Теоретическими моделями фундаментальных процессов и явлений в физике конденсированного состояния.
4. Методами анализа и обработки экспериментальных данных.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

Примеры контрольных заданий:

1. В германии при $T=300$ К наблюдается подвижность электронов $\mu=4800$. Каково время релаксации импульса и дрейфовая скорость в поле $E=1\text{В/см}$? Учесть, что в германии $m^*=0.1m$.
2. Два стержня из разных металлов, обладающих электронной и дырочной проводимостью, образуют контакт. Место контакта охлаждается жидким азотом (77 К), свободные концы находятся при комнатной температуре. Каковы величина и знак термо-э.д.с. между свободными концами?
3. Найти, каково должно быть минимальное напряжение, чтобы скомпенсировать теплопроводность в металле с помощью эффекта Пельтье, если разность температур между концами составляет 30 К?

4. Показать, чем отличается вывод и результат формулы для намагниченности N спинов $1/2$ с магнитным моментом в магнитном поле B согласно классической физике (формула Ланжевена) и квантовой физике.
5. Найти вклад в теплоемкость от N спинов $1/2$ с магнитным моментом в магнитном поле B . Найти асимптотики этого вклада в пределах высокой и низкой температуры.
6. Найти вклад в теплоемкость от магнонов в ферромагнетиках и в антиферромагнетиках. Сравнить результат со вкладом от фононов.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Семестр 9.

1. Структура периодически-упорядоченных кристаллов.
2. Обратная решетка периодически-упорядоченных кристаллов. Зона Бриллюэна.
3. Методы экспериментального определения структуры кристаллов.
4. Классификация решеток Браве.
5. Влияние температуры на рассеяние рентгеновского излучения; фактор Дебая–Уоллера.
6. Несоизмеримо модулированные кристаллы. Квазикристаллы.
7. Жидкие кристаллы и полимеры; примеры.
8. Вещества в аморфном состоянии. Гели, аэрогели и опалы.
9. Теплоемкость твердых тел. Температура Дебая.
10. Нормальные моды монокристаллической линейной цепочки.
11. Нормальные моды двухатомной линейной цепочки; щель в спектре колебательных возбуждений. Оптические и акустические фононы.
12. Нормальные колебательные моды решетки Браве и решетки с базисом в двумерном и трехмерном случаях.
13. Плотность колебательных состояний.
14. Число независимых компонент тензора модулей упругости кристаллов и аморфных сред.
15. Закон Гука в кристаллах.
16. Межатомные взаимодействия и связь в твердых телах.
17. Теплопроводность.
18. Фононные процессы с перебросом.
19. Металлы, полуметаллы, полупроводники, диэлектрики. Понимание графиков зонной структуры.
20. Движение электрона в периодическом потенциале. Теорема Блоха.
21. Приближения слабой и сильной связи для расчета энергетических спектров металлов.
22. Термоэлектронные явления в металле. Закон Видемана-Франца.
23. Эффект Пельтье. Термо-э.д.с.
24. Металл в высокочастотном электромагнитном поле. Нормальный скин-эффект.
25. Аномальный скин-эффект. Концепция неэффективности.
26. Диамагнетизм Ландау и парамагнетизм Паули идеального ферми-газа.
27. Уровни Ландау. Спектр энергии электрона в магнитном поле.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Влияние температуры на рассеяние рентгеновского излучения; фактор Дебая–Уоллера.
2. Диэлектрики. Различные вклады в поляризуемость диэлектриков.
3. Вычисление ориентационной восприимчивости.
4. Температурная зависимость электрической проводимости в металлах.

Семестр 10.

1. Диэлектрики. Различные вклады в поляризуемость диэлектриков.

2. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости и восприимчивости диэлектриков. Ее описание с помощью вынужденных колебаний.
3. Вычисление ориентационной восприимчивости.
4. Комплексная диэлектрическая проницаемость и ее физический смысл.
5. Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики.
6. Различные вклады в магнитную восприимчивость парамагнетиков и их температурную зависимость.
7. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм в приближении среднего поля: температурная зависимость их магнитной восприимчивости и намагниченности.
8. Спиновые волны в ферро- и антиферромагнетиках. Их закон дисперсии. Магноны.
9. Вклад магнонов в температурную зависимость теплоемкости в ферро- и антиферромагнетиках.
10. Температурная зависимость намагниченности ферромагнетиков. Результат среднего поля, экспериментальный и теоретический с участием магнонов.
11. Природа и типы обменного взаимодействия в магнетиках.
12. Дефекты в кристаллах.
13. Прыжковая проводимость.
14. Адиабатическое размагничивание как метод охлаждения.
15. Спиновые стекла и фрустрированные магниты.
16. Волны зарядовой и спиновой плотности.

Примеры экзаменационных билетов :

Билет 2.

1. Нормальные моды двухатомной линейной цепочки; щель в спектре колебательных возбуждений.
2. Структурный фактор кристаллической решетки и его роль при экспериментальном методе определения кристаллической решетки. Атомный форм фактор.
3. Антиферромагнетизм. Переходы спин-флоп и спин-флип.
4. Дисперсия магнонов и их вклад в теплоемкость.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в письменной форме по билетам с дополнительной устной беседой. В каждом билете экзамена представлены четыре вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.