

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра теоретической физики**

д.ф.-м.н. _____



УТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ
В.Е. Блинов
_____ 2023 г.

Рабочая программа дисциплины

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА 2

Направление: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль): Физическая информатика

Форма обучения: Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)						Промежуточная аттестация (в часах)					
		Контактная работа обучающихся с преподавателем					Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем				
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
6	180	48	48			16	44	18	4				2
Всего	180	48	48			16	44	18	4				2
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 118 часов													
Компетенции: ОПК-2													

Ответственный за образовательную программу
д.ф.-м.н., проф.

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2023

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	5
5. Перечень учебной литературы.....	9
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	10
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	10
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.....	10
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	11

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 2» имеет своей целью дать набор необходимых сведений в области физики твёрдого тела и научить применению этой дисциплины в качестве основы для оценок возможностей элементной базы вычислительных устройств, систем обработки информации, аппаратного и программного обеспечения физических установок.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ОПК-2. Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные</p>	<p>ОПК - 2.1. Применяет теоретические основы и базовые знания для проведения научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики.</p> <p>ОПК – 2.2. Применяет современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование) для организации научного исследования.</p> <p>ОПК -2.4. Проводит научные изыскания в избранной области экспериментальных и/или теоретических физических исследований.</p>	<p>Знать классические постановки вопроса о корпускулярно-волновом дуализме частиц, способы формализации задач квантовой механики, понятия микроканонического и канонического распределения, особенности бозе- и ферми-частиц; основные принципы нерелятивистской квантовой механики и статистической физики в качестве основ физики конденсированного состояния вещества.</p> <p>Уметь решать типовые задачи квантовой механики и термодинамики и статистической физики, проводить оценки нахождение квантовых и термодинамических величин; применять основные принципы нерелятивистской квантовой механики и статистической физики для оценки свойств кристаллических конденсированных тел в качестве элементной базы приборов; увязывать требования к программному обеспечению с физическими свойствами элементной базы; работать с учебной литературой по квантовой физике и статистической термодинамике, методами и подходами решения классических задач квантовой механики и статистической термодинамики; применять технику расчета энергетических уровней в электрических и магнитных полях; применять</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		технику решения уравнений Шрёдингера и Паули для одно-, дву- и трёхмерных систем и технику расчёта термодинамических свойств макроскопически большого числа ферми- и бозе-частиц в таких полях.

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 2», изучаемая в 6-м семестре, представляет собой начальный курс термодинамики и статистической физики.

Целью освоения дисциплины является ознакомление студентов с:

- 1) основными понятиями термодинамики и статистической физики;
- 2) со свойствами классических и вырожденных идеальных газов
- 3) вычислением упругих и неупругих сечений рассеяния в конденсированных средах с целью получения информации о структуре и спектре квазичастиц;
- 4) теорией фазовых переходов;
- 5) методами статистического описания макросистем, включая расчёты их термодинамических и кинетических характеристик;
- 6) ограничениями, налагаемыми фундаментальной физикой на процессы получения и обработки информации.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 2» реализуется в 6-м семестре 3-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки **03.03.02 Физика**. Курс является одной из обязательных общеобразовательных дисциплин, реализуемых кафедрой теоретической физики, и посвящен разделу «Статистическая физика и термодинамика». Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как механика, электродинамика и оптика, также по математике (высшая алгебра и математический анализ, функциональный анализ).

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области применения квантовой механики к анализу пределов измерений, ознакомлению студентов с наиболее интересными результатами из текущей научной литературы по квантовой информатике, по опытам с конденсатами Бозе-Эйнштейна и т.п. Специально указываются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе. Материал курса увязывается с общефизическими и математическими дисциплинами, изучаемыми студентами-физиками (электродинамика, высшая алгебра, элементы функционального анализа и т.д.). В свою очередь курс «Физика конденсированного состояния вещества» является предпосылкой для изучения курсов «Физические основы микроэлектроники» и «Физические основы информатики».

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)

		Контактная работа обучающихся с преподавателем					Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6	180	48	48			16	44	18	4			2
Всего	180	48	48			16	44	18	4			2
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 118 часов												
Компетенции: ОПК-2												

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, прием заданий, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: обеспечивается двумя контрольными работами в семестре, еженедельным приёмом семестровых заданий для самостоятельного решения, а также подразумевает диалог с преподавателем в формате вопрос-ответ во время практических занятий.

Промежуточная аттестация: итоговый экзамен в конце 6-го семестра.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **180** академических часов / **5** зачетных единиц:

- занятия лекционного типа – 48 часов;
- практические занятия – 48 часов;
- прием заданий – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 44 часа;
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающихся с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, приём заданий, групповые консультации, экзамен) составляет 118 часов.

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

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 2» представляет собой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 6-м семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачётных единиц, 180 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)							Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем				
3 курс, 6 семестр «Статистическая физика и термодинамика»											
1.	Основные понятия термодинамики. Термодинамика магнетиков и диэлектриков	1	11	3	4		2	2			
2.	Статистический подход к описанию макроскопических тел. Микроканоническое, каноническое и большое каноническое распределения.	2	10	3	4			3			
3.	Статистическая механика классического идеального газа. Химическое равновесие.	3	9	3	4			2			
4.	Статистические свойства идеального вырожденного Ферми-газа	4	12	3	4		2	3			
5.	Зонная структура спектра кристаллов.	5-6	14	5	4		2	3			
6.	Контрольная работа по пройденным темам	6	8				2	4	2		
7.	Идеальный бозе-газ.	7	9	3	4			2			
8.	Базовые понятия теории кристаллических структур.	8	11	3	3		2	3			
9.	Колебания атомов в кристаллах. Фононы. Модель Дебая.	9	11	3	3		2	3			
10.	Термодинамические флуктуации	10	8	3	3			2			
11.	Спектральное разложение флуктуаций.	11	9	3	3			3			
12.	Неидеальные газы. Фазовые переходы первого рода.	12	10	3	3		2	2			
13.	Магнетизм вещества.	13-14	12	6	3			3			
14.	Элементы теории фазовых переходов второго рода.	15	8	3	3			2			
15.	Кинетическое уравнение Больцмана и электропроводность металлов.	16	10	4	3			3			
16.	Контрольная работа по пройденным темам	16	8				2	4	2		
17.	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18						18		
18.	Экзамен		2							2	
	Всего 6 семестр		180	48	48		16	44	18	4	
	Итого									2	

Программа и основное содержание лекций (48 часов)

Раздел 1. Основные понятия термодинамики (3 часа)

Температура и энтропия, второе начало термодинамики. Термодинамические потенциалы при разных внешних условиях. Термодинамика диэлектриков и магнетиков. Условия термодинамического равновесия. Демон Максвелла, роль термодинамики в анализе работы компьютеров. Диссипация тепла при стирании информации и предел Ландауэра.

Раздел 2. Статистический подход к описанию макроскопических сред (3 часа)

Плотность энергетических уровней макросистем, статистическая энтропия. Вывод термодинамических соотношений из микроканонического, канонического и большого канонического распределений.

Раздел 3. Статистическая механика классического идеального газа (3 часа)

Критерий классического описания идеального газа. Статистическая сумма и вычисление термодинамических функций одно-, двух- и многоатомных идеальных газов. Системы с переменным числом частиц, реакции и химическое равновесие. Ионизационное равновесие и формула Саха.

Раздел 4. Идеальный ферми-газ (3 часа)

Характеристики одночастичных состояний в макроскопическом объёме. Функция распределения Ферми-Дирака при нулевой и конечной температуре. Теплоёмкость ферми-газа с произвольным законом дисперсии. Роль поверхности Ферми.

Раздел 5. Зонная структура спектра кристаллов (5 часов)

Зонная структура кристаллических твёрдых тел в приближении слабой связи. Подсчёт числа квантовых состояний. Металлы, полупроводники и изоляторы. Энергетический спектр и функции распределения электронов и дырок для полупроводников без примесей. Полупроводники с примесями. Оценка энергии ионизации донорных уровней, концентрации носителей, качественный анализ p-n перехода.

Раздел 6. Идеальный бозе-газ (3 часа)

Статистические и термодинамические свойства фотонного газа. Формула Планка для спектральной плотности космического фонового излучения. Бозе-газ частиц, число которых сохраняется, термодинамические функции газа. Конденсация Бозе-Эйнштейна для частиц идеального газа. Бозе-конденсация в реальных системах разрежённых газов из щелочных элементов.

Раздел 7. Базовые понятия теории кристаллических структур (3 часа)

Базовые понятия теории кристаллических структур на примере кубических решёток. Прямая и обратная решётки, их базисные векторы. Рассеяние частиц на периодических структурах, формула Вульфа-Брэггов. Структурный фактор решётки, индексы Миллера.

Раздел 8. Колебания атомов в кристаллах. Фононы. Модель Дебая (3 часа)

Классическое рассмотрение колебаний атомов в цепочке в случае одного и двух атомов в элементарной ячейке. Квантование этих колебаний, фононы. Модель Дебая для решёточной теплоёмкости кристаллов.

Раздел 9. Термодинамические флуктуации (3 часа)

Формула Эйнштейна для плотности вероятности термодинамических флуктуаций макросистем. Гауссово распределение и его применение для расчётов флуктуаций и корреляционных функций термодинамических и механических величин. Пределы чувствительности измерительных приборов.

Раздел 10. Спектральное разложение флуктуаций (3 часа)

Стационарные случайные процессы на примере броуновского движения. Случайные блуждания, диффузия и уравнение Ланжевена. Спектральное разложение и корреляционные функции случайных величин в разные моменты времени. Флуктуации в электрических цепях и формула Найквиста.

Раздел 11. Неидеальные газы (3 часа)

Вирialное разложение и вирialное уравнение состояния. Уравнение Ван дер Ваальса, критическая точка. Условия равновесия фаз и фазовые переходы первого рода.

Раздел 12. Магнетизм вещества (6 часов)

Эффект Зеемана и магнитные моменты атомов. Парамагнетизм Паули. Диамагнетизм Ландау. Квантовый целочисленный эффект Холла. Обменное взаимодействие и физическая природа ферромагнетизма. Гамильтониан Гейзенберга, спиновые волны. Описание ферромагнитного перехода в теории среднего поля.

Раздел 13. Элементы теории фазовых переходов второго рода (3 часа)

Теория Ландау фазовых переходов второго рода как переходов с изменением симметрии системы. Параметр порядка. Скачок теплоёмкости. Неоднородное упорядочение и пространственный профиль доменной стенки.

Раздел 14. Кинетическое уравнение Больцмана и электропроводность металлов (4 часа)

Теорема Лиувилля. Уравнение Больцмана с интегралом столкновений. Вывод равновесных бозе-и ферми-распределений из условия зануления интеграла столкновений. Интеграл столкновений в случае рассеяния на примесях, τ -приближение и электропроводность электронного газа. Теплопроводность электронного газа и закон Видемана-Франца.

Программа практических занятий (48 часов)

Занятие 1. Вычисление термодинамических функций газа с уравнением состояния Ван дер Ваальса с произвольной температурной зависимостью теплоёмкости. Вычисление разности теплоёмкостей диэлектрика в конденсаторе при заданном потенциале и заданном заряде. **(4 часа)**

Занятие 2. Микроканоническое распределение на примере осциллятора и одномерной модели резины. Система спинов в магнитном поле в рамках микроканонического распределения. **(4 часа)**

Занятие 3. Каноническое распределение. Применение к осциллятору, газу дипольных молекул и к спиновому парамагнетизму газа с малой плотностью. Двухуровневая система с большой кратностью вырождения верхнего уровня. **(4 часа)**

Занятие 4. Каноническое распределение. Применение к осциллятору, газу дипольных молекул и к спиновому парамагнетизму газа с малой плотностью. **(4 часа)**

Занятие 5. Вычисление температурной зависимости числа актов термоядерной реакции с заданной зависимостью от энергии полного сечения реакции. Вычисление констант равновесия химических реакций. **(4 часа)**

Занятие 6. Идеальный вырожденный ферми-газ. Оценки характерных размеров белых карликов и нейтронных звёзд. Термодинамика и парамагнитная восприимчивость. Эффекты внешнего поля на примере однородного поля тяжести и осцилляторного потенциала. **(4 часа)**

Занятие 7. Полупроводники без примесей. Вычисление теплоёмкости. Полупроводники с примесями n-типа. Вычисление химического потенциала. **(3 часа)**

Занятие 8. Термодинамические функции газа фотонов; уравнение адиабаты. Бозе-газ сохраняющихся частиц. Изотермы в широком интервале температур. Бозе-конденсация во внешнем поле (на примере однородного поля тяжести). **(2 часа)**

Занятие 9. Кубические кристаллические решетки. Построение обратных решёток и зон Бриллюэна. Получения закона дисперсии и вычисление эффективных масс электронов. **(3 часа)**

Занятие 10. Фононы. Вычисление флуктуации положения атомов в кристаллической решетке в модели Дебая. Критерий плавления. Вычисление коэффициента линейного расширения в простой модели. **(2 часа)**

Занятие 11. Вычисление флуктуаций и корреляций в термодинамических и механических системах (упругая струна) с гауссовым распределением вероятностей. **(2 часа)**

Занятие 12. Корреляция флуктуаций во времени. Уравнение Ланжевена. Примеры вычисления для конкретных систем (частица в среде с трением, осциллятор с трением, электрические цепи с емкостью, индуктивностью и сопротивлением.) Оценка чувствительности гальванометра. **(3 часа)**

Занятие 13. Вычисление вириальных коэффициентов в простых моделях. Процесс Джоуля-Томпсона. Применение уравнения Клапейрона-Клаузиуса. Критический радиус капли в насыщенном паре. **(3 часа)**

Занятие 14. Вычисление температурной зависимости магнитной восприимчивости в модели Кюри-Вейса. Упорядочение бинарного сплава, вычисление скачка теплоёмкости. **(3 часа)**

Занятие 15. Вычисление коэффициента электропроводности в магнитном поле, классический эффект Холла. Расчёт коэффициентов теплопроводности и вязкости максвелловского газа. **(3 часа)**

Самостоятельная работа студентов 6 семестр (62 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	18
Подготовка к контрольным работам	8
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	18
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. Кн. 2: Квантовая механика. — Москва: Наука, 1972. — 368 с.: ил. (160 экз)
2. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. — Изд. 3-е, стер. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во: Изд-во Новосиб. ун-та, 2001. — 608 с.: ил. (52 экз)
3. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1992. — 879 с.: ил. (59 экз)

4. Кубо Р. Статистическая механика. — Изд. 2-е, стер. — М.: УРСС: КомКнига, 2007. — 452 с.: ил. (56 экз)
5. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. — Москва: Наука, 1978. — 790 с.: ил. (51 экз)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Кожевников А.А. Графен и квантовые вычисления: дополнительные главы к курсу "Введение в физику твёрдого тела": учебное пособие: [для студентов отделения информатики Физ. фак. НГУ]. — М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. теорет. Физики. — Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2011. — 104 с.: ил.
2. Коткин Г.Л., Образовский Е.Г. Задачи по статистической физике: учебное пособие: [для студентов физического факультета НГУ]. — Федер. агентство по образованию, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2007. — 159 с.: ил.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

7.1 Ресурсы сети Интернет

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.2 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

8.1 Перечень программного обеспечения

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

8.2 Информационные справочные системы

Не используются.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Физика конденсированного состояния вещества» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.
3. Терминальный класс.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по отдельным темам дисциплины.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также проведения коротких самостоятельных работ в начале каждого занятия с решением типовых задач, разобранных на предыдущем занятии. Студентам необходимо успешно выполнить четыре контрольные работы, предполагающие решение задач из разделов «Идеальный ферми-газ», «Идеальный бозе-газ», «Термодинамические флуктуации» и «Неидеальные газы».

В течение семестра проводится прием выполненных обучающимся заданий/задач в отведенное время. Примеры заданий/задач приведены в п.10.3. Термин «сдать задание/задачу» означает объяснение хода ее решения и при необходимости ответы на дополнительные вопросы преподавателей.

Промежуточная аттестация.

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-2 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния вещества в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце 6-го семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-2.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все

компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<p>ОПК - 2.1. Применяет теоретические основы и базовые знания для проведения научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики.</p>	<p>Знать классические постановки вопроса о корпускулярно-волновом дуализме частиц, способы формализации задач квантовой механики, понятия микроканонического и канонического распределения, особенности бозе- и ферми-частиц; основные принципы нерелятивистской квантовой механики и статистической физики в качестве основ физики конденсированного состояния вещества.</p>	<p>Опрос Контрольная работа Экзамен.</p>
<p>ОПК – 2.2. Применяет современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование) для организации научного исследования.</p> <p>ОПК -2.4. Проводит научные изыскания в избранной области экспериментальных и/или теоретических физических исследований.</p>	<p>Уметь решать типовые задачи квантовой механики и термодинамики и статистической физики, проводить оценки нахождение квантовых и термодинамических величин; применять основные принципы нерелятивистской квантовой механики и статистической физики для оценки свойств кристаллических конденсированных тел в качестве элементной базы приборов; увязывать требования к программному обеспечению с физическими свойствами элементной базы; работать с учебной литературой по квантовой физике и статистической термодинамике, методами и подходами решения классических задач квантовой механики и статистической термодинамики; применять технику расчета энергетических уровней в электрических и магнитных полях; применять технику решения уравнений Шрёдингера и Паули для одно-, дву- и трёхмерных систем и технику расчёта термодинамических свойств макроскопически большого числа ферми- и бозе-частиц в таких полях.</p>	<p>Опрос Контрольная работа Экзамен.</p>

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Физика конденсированного состояния вещества».

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ОПК 2.2 ОПК 2.4	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

ЗАДАНИЕ № 1

1. Вычислить в квазиклассическом приближении плотность энергетических состояний для частицы со спином s в поле анизотропного гармонического осциллятора $U(x, y, z) = \frac{m}{2}(\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2)$. То же для частицы с электрическим зарядом q в однородном электрическом поле напряженности $\vec{E} = E_0(0,0,1)$, помещенной в объем $L_x \times L_y \times L_z$. (5 баллов).
2. Плоский конденсатор с площадью пластин Σ и расстоянием между ними L заполнен газом нейтральных двухатомных молекул, обладающих электрическим дипольным моментом p . Число молекул N , температура T . Сколько тепла выделится при изотермической зарядке конденсатора до разности потенциалов U ? Найти изменение температуры газа, если при включении электрического поля газ был теплоизолирован. Считать, что $\frac{pU}{TL} \ll 1$ (5 баллов).
3. N_s атомов, обладающих основным термом $^2S_{1/2}$, помещены в кристаллическую решетку. Число атомов в решетке N_a , $\frac{N_s}{N_a} = 10^{-2}$. Начальная температура системы $T_i = 3$ К, внешнее магнитное поле $H_i = 10$ кГс. Вся система теплоизолирована. Затем магнитное поле адиабатически выключается. Учитывая колебания кристаллической решетки, найти

температуру системы в конце этого процесса, считая, что остаточное магнитное поле (за счет слабых межатомных взаимодействий), действующее на атомы парамагнитной примеси, равно $H_f = 10$ Гс. Учет колебаний кристаллической решетки провести в модели Дебая в предположении, что элементарная ячейка содержит один атом. Температура Дебая $\Theta_D = 100$ К. При вычислениях считать, что $\mu H / k_B T \ll 1$ (5 баллов).

ЗАДАНИЕ № 2

1. Естественное содержание изотопов дейтерия D в водороде H составляет 1.5×10^{-4} . Найти отношение N_{HD} / N_{D_2} в естественной смеси при температуре $T = 300$ К. Частота колебаний молекулы H_2 такова, что $\hbar \omega_{H_2} / k_B = 6100$ К (5 баллов).
2. Графен является двумерной кристаллической модификацией углерода. Электронно-дырочный спектр графена такой же, как у беспримесного полупроводника с нулевой щелью и с линейным законом дисперсии $\varepsilon_{e,h} = \pm v_F \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$, где верхний (нижний) знак относится к электронам e (дыркам h), $v_F = 1 \times 10^8$ см/с – скорость Ферми. (а) Вычислить зависимость от температуры концентрации носителей (то есть числа носителей на единицу площади) и электронно-дырочной теплоёмкости. Ответ довести до числа при $T = 1$ К и 300 К. (б) Найти зависимость концентрации электронов и дырок при наложении однородного электрического поля напряженности E_0 , направленного вдоль оси x образца с геометрическими размерами $L_x \times L_y$. Учесть, что кроме вырождения по проекции спина у электронов в графене есть дополнительное двукратное вырождение. (5 баллов).
3. $N = 10^6$ атомов $^{37}Rb_{87}$ находятся в ловушке, действие которой можно представить потенциалом анизотропного гармонического осциллятора $U(x, y, z) = \frac{m_{Rb}}{2} [\omega_{\perp}^2 (x^2 + y^2) + \omega_z^2 z^2]$. Поперечная и продольная частоты равны $\omega_{\perp} / 2\pi = 10^2$ Гц, $\omega_z / 2\pi = 10$ Гц. Спин ядра атома $^{37}Rb_{87}$ равен $3/2$. Показать, что этот атом является бозоном. Вычислить температуру бозе-эйнштейновской конденсации T_0 для каждого из возможных значений полного момента атома $^{37}Rb_{87}$. Найти теплоёмкость системы ниже этой точки и выяснить характер ее особенности в зависимости от температуры в окрестности T_0 . Взаимодействием атомов между собой пренебречь (5 баллов).

ЗАДАНИЕ № 3

1. Рассчитать геометрический структурный фактор $S(\vec{q})$ для гранецентрированной кубической и объемно-центрированной кубической структур. Зная, что при дифракции на кристалле рентгеновских лучей с длиной волны 1.542 ангстрема наблюдались брэгговские углы $12.3^\circ, 14.1^\circ, 20.2^\circ, 24.0^\circ, 25.1^\circ, 29.3^\circ, 32.2^\circ$ и 33.1° , определить соответствующие индексы Миллера. Какой из двух указанных кубических решеток принадлежит исследуемый кристалл? Найти из экспериментальных данных размер элементарной ячейки (5 баллов).
2. Заряженная частица движется в газе, испытывая действие однородного магнитного поля напряженности B_0 , направленного вдоль оси z . Сила трения, действующая на частицу со

стороны газа, пропорциональна скорости: $\vec{f} = -\gamma\vec{v}$. Температура среды T . Вычислить спектральные плотности величин $(v_{x,y,z}^2)_\omega$, $(v_x v_y)_\omega$, $(v_{x,y} v_z)_\omega$. Найти коэффициенты диффузии D_x, D_y и D_z частицы вдоль трех декартовых координат (5 баллов).

3. Найти равновесную степень диссоциации газа двухатомных молекул вида AB с потенциалом межатомного взаимодействия $U(r) = U_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right]$. Считать, что полный электронный спин молекулы и проекция электронного орбитального момента на ось симметрии равны нулю. Атомы A и B , из которых составлена молекула, имеют основные термы $^2S_{1/2}$ (5 баллов).

Примерный вариант контрольной работы

1. Два тела имеющие различные температуры T_1 и T_2 , и теплоемкости C_1 и C_2 приводят в тепловой контакт. Найти изменение энтропии каждого из тел и изменение энтропии всей системы. (5 баллов).
2. В термостате находится система, состоящая из N невзаимодействующих частиц. Каждая частица может находиться только на одном из трех энергетических уровней с энергиями: $-e, 0, +e$. Уровень с энергией 0 двукратно вырожден. Найти теплоемкость системы (5 баллов).
3. В цилиндре под поршнем помещена вода, над которой находится смесь воздуха и насыщенных паров. Начальное давление равно атмосферному. Затем давление на поршень увеличивается в два раза. На сколько процентов изменится давление пара в цилиндре, если температура $T=300$ К сохраняется неизменной (5 баллов).
4. Найти распределение по компоненте скорости вдоль оси x , dw/dv_x , для вырожденного ферми газа при нулевой температуре, $T = 0$. Определить среднюю энергию частиц газа, соударяющихся со стенкой (5 баллов).

Примерные вопросы на экзамене

На проверку сформированности компетенции ОПК-2:

1. Основные понятия термодинамики. Температура и энтропия. Термодинамические потенциалы в разных условиях. Условия равновесия.
2. Канонический ансамбль и каноническое распределение. Вычисление термодинамических функций и получение уравнения состояния в каноническом ансамбле.
3. Оценить температуру вырождения жидкого гелия, имеющего плотность $\rho \approx 0.2$ г/см³.
4. Металл с плотностью электронов проводимости $n = 10^{24}$ см⁻³ находится при температуре $T = 1000$ К. Являются ли электроны проводимости в таком металле вырожденными?
5. Статистическая механика классического идеального газа. Распределение Максвелла – Больцмана. Критерий применимости. Теорема о равномерном распределении.
6. В очень плотных нейтронных звездах возможно химическое равновесие по отношению к реакциям $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ и $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, причем нейтроны и протоны являются ультрарелятивистскими. Считая, что химические потенциалы нейтрино ν_e и антинейтрино $\bar{\nu}_e$ равны нулю, а звезда электронейтральна, вычислить относительные равновесные концентрации электронов, протонов и нейтронов.

7. Газ двухатомных молекул. Учет колебательных и вращательных степеней свободы. Поведение теплоемкости в зависимости от температуры.
8. Вычислить химический потенциал двумерного электронного газа при произвольной температуре T . Число электронов N , площадь, занимаемая ими в координатном пространстве A .
9. Химические реакции и химическое равновесие. Закон действующих масс. Константа равновесия. Теплота реакции
10. Найти теплоемкости молекул H_2O (угол между связями OH примерно 105 градусов) и CO_2 (линейная молекула) при комнатной температуре.
11. Идеальный ферми-газ. Одночастичная функция распределения по энергиям. Химический потенциал и энергия Ферми. Теплоемкость при низких температурах.
12. Найти энтропию газа с уравнением состояния $PV = NT$. Теплоемкость считать постоянной.

Пример экзаменационного билета

1. Найти энергию, энтропию давление и теплоёмкость газа фотонов в тепловом равновесии при температуре T в объёме V .
2. Оценить величину энергии Ферми для электронов в металле.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Физика конденсированного состояния вещества 2»
Направление: 03.03.02 Физика
Направленность (профиль): Физическая информатика**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного