

**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**



**Рабочая программа дисциплины  
ТЕРМОДИНАМИКА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА 2**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения: **Очная**

Семестр	Общий объём	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	Прием заданий			Консультации	Зачёт	Дифференцированный зачёт	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	144	32	32	16	40	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 80 часов										
Компетенции: ОПК-1										

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

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## 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. Структура и содержание дисциплины .....	6
5. Перечень учебной литературы.....	8
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	9
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	9
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	9
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	10

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

Дисциплина (курс) «Термодинамика и статистическая физика 2» имеет своей целью научить студентов пользоваться методами термодинамики и статистической физики в широком круге приложений, знакомство с началами физической кинетики и теоретическими методами, применяемыми при описании неравновесных явлений. В связи с этим рассматриваются: отдельные вопросы физики полупроводников, конденсация Бозе-Эйнштейна, свойства равновесного излучения, тепловые колебания твёрдых тел, фазовые переходы второго рода, термодинамические флуктуации и связанные с ними явления, неравновесные термоэлектрические явления в металлах и распространение колебаний в плазме. Курс должен служить основой для изучения последующих физических курсов и спецкурсов профильных выпускающих кафедр.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1.</b> Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК-1.4</b> Использует терминологию и понятийный аппарат базовых физико-математических дисциплин.</p>	<p><b>Знать</b> основные законы термодинамики, основные принципы статистической физики, основные понятия и методы физической кинетики, основы метода вторичного квантования, применительно к колебаниям атомов в твёрдом теле, основные положения теории Ландау для фазовых переходов второго рода, вывод кинетического уравнения Больцмана и его свойства, вывод уравнений газовой динамики из кинетического уравнения, вывод соотношений симметрии для кинетических коэффициентов.</p> <p><b>Уметь</b> производить расчёты концентраций носителей заряда в полупроводнике, расчёты термодинамических величин для бозе-газа и равновесного излучения, использовать модель Дебая для вычисления термодинамических величин, связанных с колебаниями атомов в твёрдых телах, получать формулы для флуктуаций термодинамических величин, получать линеаризованную форму кинетического уравнения и кинетические коэффициенты для термоэлектрических явлений, находить закон дисперсии и декремент затухания Ландау для продольных колебаний в плазме.</p> <p><b>Владеть:</b> методами получения термодинамических соотношений между физическими величинами, методами</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		нахождения термодинамических характеристик вещества, пользуясь основными положениями статистической физики и физической кинетики и законами взаимодействия отдельных частиц.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс относится к циклу общефизических дисциплин и реализуется в осеннем семестре 4-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 03.03.02 Физика. В результате прохождения курса студенты отделения общей и фундаментальной физики физического факультета должны овладеть основными понятиями и методами термодинамики и статистической физики, познакомиться с началами физической кинетики и теоретическими методами, применяемыми при описании неравновесных явлений. Для успешного освоения курса необходимо знание основ линейной алгебры, математического анализа, теории функций комплексной переменной, методов математической физики, хорошие знания физических курсов, изучаемых студентами ранее: классической и квантовой механики, электродинамики, физики сплошных сред, термодинамики и статистической физики, также необходимо умение применять эти знания при решении задач.

## 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.

Семестр	Общий объём	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	Прием заданий			Консультации	Зачёт	Дифференцированный зачёт	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	144	32	32	16	40	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 80 часов										
Компетенции: ОПК-1										

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, задачи для самостоятельного решения, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачётные единицы:

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- прием заданий- 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 40 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультация и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 80 часов.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Термодинамика и статистическая физика 2» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 4-м курсе физического факультета НГУ в 7 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 144 академических часа / 4 зачётные единицы.

Все практические занятия проводятся в интерактивной форме. Каждый студент группы решает задачи (примеры заданий приведены в разделе 10), при этом преподаватель отслеживает ход решения каждого студента и корректирует его индивидуально по мере необходимости. Практикуется коллективное обсуждение решений. Умение студента объяснять свой метод решения и отстаивать его, отвечая на вопросы сокурсников и преподавателя, развивает профессиональные навыки, которые будут незаменимы в дальнейшей профессиональной деятельности. Важным элементом является еженедельный «приём заданий», на котором происходит индивидуальное обсуждение задач с каждым студентом. Это позволяет вовремя выявлять проблемы и помочь студенту с освоением материала курса.

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
1	Электрон в периодическом поле, зонная структура. Электроны и дырки в полупроводниках, примесные полупроводники.	1	6	2	2	1	1			
2	Вырожденный бозе-газ, конденсация Бозе-Эйнштейна, термодинамические величины бозе-газа.	2	8	2	2	2	2			
3	Равновесное излучение – газ фотонов, термодинамические величины для излучения, формула Планка для спектра. Квантование колебаний атомов в одномерном кристалле, фононы – кванты колебаний решётки.	3	8	2	2	1	3			
4	Предельные результаты для колебаний решётки в области высоких и низких температур. Модель Дебая.	4	8	2	2	1	3			
5	Фазовые переходы второго рода. Модель Вейса для ферромагнетизма, одномерная и двумерные модели Изинга (в последнем случае обсуждение результатов). Теория Ландау для фазовых переходов второго рода.	5	8	2	2	1	3			
6	Флуктуации основных термодинамических величин. Рассеяние света, формула Рэлея. Тонкая структура линии рассеяния, дублет Мандельштама-Бриллюэна.	6	8	2	2	1	3			
7	Флуктуации параметра порядка при фазовых переходах второго рода. Критерий применимости теории Ландау вблизи точки перехода.	7	6	2	2	1	1			

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
8	Зависимость флуктуаций от времени на примере броуновского движения и флуктуаций тока в электрических цепях. Спектральное разложение флуктуаций. Неравновесный идеальный газ, вывод равновесных распределений Ферми и Бозе из условия максимума для энтропии.	8	8	2	2	1	3			
9	Кинетическое уравнение, интеграл столкновений и его свойства. Н-теорема Больцмана.	9	8	2	2	1	3			
10	Переход от кинетического уравнения к уравнениям газовой динамики, уравнение Навье-Стокса. Проводимость металла при низких температурах вследствие рассеяния электронов на примесях и дефектах решётки.	10	8	2	2	1	3			
11	Коэффициент теплопроводности электронного газа и другие кинетические коэффициенты для термоэлектрических явлений. Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.	11	8	2	2	1	3			
12	Продольные волны в бесстолкновительной плазме, затухание Ландау.	12	8	2	2	1	3			
13	Термодинамика необратимых процессов. Термодинамические силы и потоки. Кинетические коэффициенты и соотношения симметрии Онзагера.	13-14	12	4	4	1	3			
14	Обобщённая восприимчивость и её аналитические свойства, связь с диссипацией.	15	8	2	2	1	3			
15	Флуктуационно-диссипационная теорема.	16	8	2	2	1	3			
16	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18					18		
17	Консультации		4						4	
18	Экзамен		2						2	
	<b>Всего</b>		<b>144</b>	<b>32</b>	<b>32</b>	<b>16</b>	<b>40</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

### Программа практических занятий (32 часа)

Занятие (каждое занятие – 2 часа)*
Концентрация свободных носителей в полупроводниках, роль примесных атомов (4.13-4.14). Свойства p-n перехода.
Бозе-эйнштейновская конденсация, термодинамические величины бозе-газа (5.2, 5.10).

Свойства равновесного излучения (5.6, 5.12). Квантование колебаний атомов одномерного кристалла, рассмотреть также случай, когда решётка состоит из чередующихся атомов разной массы, $m$ и $M$ , акустическую и оптическую ветви спектра.
Вывести формулу для среднеквадратичного отклонения атома в узле решётки (5.7). Термодинамические величины для колебаний решётки в модели Дебая.
Упорядочивание сплава CuZn (латунь) и скачок теплоёмкости в точке перехода (6.14). Термодинамические величины в теории Ландау для фазовых переходов.
Поверхностное натяжение и толщина доменной стенки при фазовых переходах второго рода (6.17). Оценить размер равновесных доменов для тонкого плоского слоя ферромагнетика.
Флуктуации основных термодинамических величин и их корреляции (7.1, 7.4, 7.8).
Флуктуации в электрических цепях и броуновское движение (7.13, 7.15, 7.7).
Кинетическое уравнение, интеграл столкновений (9.6, 9.7). Электропроводность электронного газа и эффект Холла (9.10).
Вязкость электронного газа в $\tau$ -приближении, выразить $\tau$ через сечение упругого рассеяния электронов на примесях (9.13).
Расчёт коэффициента теплопроводности и других кинетических коэффициентов для термоэлектрических явлений в металле.
Статическая диэлектрическая проницаемость плазмы (9.3) и экранирование заряда.
Продольная и поперечная диэлектрическая проницаемость плазмы (9.2).
Продольные волны в плазме, закон дисперсии, декремент затухания Ландау.
Найти диэлектрическую проницаемость $\epsilon(\omega, k)$ и закон дисперсии продольных волн в тонкой металлической плёнке, рассматривая последнюю как двумерный слой бесстолкновительной электронной плазмы.
Теорема Онзагера о симметрии кинетических коэффициентов в приложении к термоэлектрическим явлениям, связь между коэффициентами Томсона и Пельтье и соотношение Томсона для термоэдс.

\* дана нумерация по задачнику

[Коткин Г.Л., Образовский Е.Г. Задачи по статистической физике.]

### Самостоятельная работа студентов (58 часов)

Перечень занятий на СРС	Объём, час
Подготовка к практическим занятиям.	20
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	20
Подготовка к экзамену	18

### 5. Перечень учебной литературы.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, Ч.1. — Изд. 3-е, доп. — М.: Наука, 1976. — 583 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. V).
2. Коткин Г.Л. Лекции по статистической физике: учебное пособие: [для студентов физических факультетов вузов]. — М-во образования Рос. Федерации, Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2003. — 171 с.: ил.
3. 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.



4. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Ч.2. Теория конденсированного состояния. — 1978. — 447 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. IX).
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — 1982. — 620 с.: ил. — («Теоретическая физика», том VIII).
6. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. — Москва: Наука, 1979. — 527 с.: граф. — (Теоретическая физика, т. X).
7. 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.
8. Гинзбург И.Ф. Введение в физику твёрдого тела Основы квантовой механики и статистической физики с отдельными задачами физики твёрдого тела: учеб. пособие [для вузов]. — Санкт-Петербург и др.: Лань, 2007. — 537 с.

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

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, Ч.1. — Изд. 3-е, доп. — М.: Наука, 1976. — 583 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. V).
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Ч.2. Теория конденсированного состояния. — 1978. — 447 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. IX).
3. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. — Москва: Наука, 1979. — 527 с.: граф. — (Теоретическая физика, т. X).

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

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

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

##### **7.1. Современные профессиональные базы данных**

Не используются.

##### **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

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

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.

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

Для реализации дисциплины «Термодинамика и статистическая физика 2» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

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.

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 на практических занятиях путём отслеживания преподавателем хода решения задач каждым студентом и в форме интерактивного приёма задач из задания. В течение каждого семестра проводится приём заданий. Результаты текущего контроля служат основанием для выставления оценок в ведомость контрольной недели на факультете, а решение, и сдача всех задач из задания является необходимым условием получения положительной оценки на экзамене.

#### ***Промежуточная аттестация.***

Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен в конце семестра. 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.

Освоение компетенции оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области термодинамики и статистической физики в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенции принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда компетенция освоена 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
<b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.	<b>Знать</b> основные законы термодинамики, основные принципы статистической физики, основные понятия и методы физической кинетики, основы метода вторичного квантования, применительно к колебаниям атомов в твёрдом теле, основные положения теории Ландау для фазовых переходов второго рода, вывод кинетического уравнения Больцмана и его свойства, вывод уравнений газовой динамики из кинетического уравнения, вывод соотношений симметрии для кинетических коэффициентов.	Опрос Контрольная работа Экзамен.
<b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.	<b>Уметь</b> производить расчёты концентраций носителей заряда в полупроводнике, расчёты термодинамических величин для бозе-газа и равновесного излучения, использовать модель Дебая для вычисления термодинамических величин, связанных с колебаниями атомов в твёрдых телах, получать формулы для флуктуаций термодинамических величин, получать линеаризованную форму кинетического уравнения и кинетические коэффициенты для термоэлектрических явлений, находить закон дисперсии и декремент затухания Ландау для продольных колебаний в плазме.	Опрос Контрольная работа Экзамен.
<b>ОПК-1.4</b> Использует	<b>Владеть:</b> методами получения термодинамических соотношений между	Опрос Контрольная работа

терминологию и понятийный аппарат базовых физико-математических дисциплин.	физическими величинами, методами нахождения термодинамических характеристик вещества, пользуясь основными положениями статистической физики и физической кинетики и законами взаимодействия отдельных частиц.	Экзамен.
--	---	----------

**Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Термодинамика и статистическая физика 2».**

**Таблица 10.2**

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (2 балла)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК-1.1	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-1.2	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.
Наличие навыков (владение опытом)	ОПК-1.4	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

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

*ЗАДАНИЕ №1*

1. Найти вклад в теплоемкость от электронов и дырок в чистом полупроводнике.

- Идеальный бозе-газ находится в центральном поле  $U(r)=m\omega^2 r^2/2$ . Ниже точки бозе-конденсации найти энтропию, теплоемкость газа и скачок теплоемкости в этой точке. Также, ниже точки бозе-конденсации, найти значение концентрации газа в точке  $r=0$ .
- Определить скорость звука  $v_s^2=(dP/d\rho)_S$  в газе, нагретом до столь высокой температуры, что давление равновесного излучения сравнимо с давлением самого газа.
- В модели Дебая найти средний квадрат отклонения от равновесного положения  $\langle u^2 \rangle$  атомов углерода в решетке алмаза при комнатной температуре (Температура Дебая для алмаза  $\Theta=2000$  К). Определить отношение  $u/d$  в точке плавления калия  $T_{ml}=336$  К ( $\Theta=130$  К). Среднее расстояние между ближайшими соседями в решетке калия равно  $d=4.5 \times 10^{-8}$  см.

### ЗАДАНИЕ №2

- Возбужденное ядро железа,  $Fe^{57*}$ , находясь в одном из узлов кристаллической решетки испускает  $\gamma$ -квант,  $Fe^{57*} \rightarrow Fe^{57} + \gamma$ , с энергией  $\hbar\omega_\gamma=14.4$  кэВ. Используя модель Дебая, оценить вероятность излучения гамма-кванта без отдачи (эффект Мессбауэра) при комнатной температуре (температура Дебая для железа  $\Theta=460$  К).
- Найти скачок коэффициента теплового расширения в модели Ландау фазовых переходов второго рода.
- Найти скачок теплоемкости латуни состава  $Cu_{1+k}Zn_{1-k}$  в точке упорядочивания сплава. Кристаллическая решетка – кубическая объемноцентрированная. Использовать приближение молекулярного поля, учитывая лишь взаимодействия ближайших соседей.
- Найти квазистатические флуктуации энергии в объеме  $V$ , если объем тела и число частиц в нем фиксированы  $\langle (\Delta E)^2 \rangle_{V,N}$ , если объем может флуктуировать  $\langle (\Delta E)^2 \rangle_N$ , а число частиц фиксировано, в случае, если фиксирован объем, но переменено число частиц  $\langle (\Delta E)^2 \rangle_V$ .

### ЗАДАНИЕ №3

- Для бинарного раствора найти флуктуации интенсивных термодинамических параметров: давления  $P$ , температуры  $T$ , концентрации  $c=n/N$ . Получить также выражения для корреляций флуктуаций этих величин  $\langle \Delta P \Delta T \rangle$ ,  $\langle \Delta c \Delta T \rangle$ ,  $\langle \Delta c \Delta P \rangle$ .
- При температуре  $T$  к струне приложена сила  $F$  так, что ее равновесное состояние – отрезок длины  $L$ . Найти среднюю флуктуацию отклонения точек струны в поперечном направлении,  $\langle \zeta^2(x) \rangle$ , в зависимости от  $x$ , положения точки от конца струны.
- Контур состоит из двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , температуры которых равны  $T_1$  и  $T_2$ , и катушки индуктивности  $L$ , соединенных последовательно (кольцом). Найти, какая энергия передается от одного сопротивления к другому за счет флуктуации тока в цепи.
- Хорошо сколламированный электронный пучок радиуса 1 мм выпускают в воздух. Энергия электронов 5 МэВ. Оценить поперечный размер пучка на расстоянии 1 м.

### ЗАДАНИЕ №4

- Найти изменение сопротивления проводника при включении магнитного поля  $\mathbf{B}$ , перпендикулярно электрическому полю  $\mathbf{E}$ , если есть два типа носителей заряда, например, электроны и дырки.
- Рассматривается бесстолкновительная плазма с вырожденной электронной компонентой и невырожденной ионной. Найти закон дисперсии продольных волн, скорость которых много больше тепловых скоростей ионов, но много меньше скоростей электронов (ионный звук). Сравнить скорость волн со скоростью звука, определяемым соотношением  $v_s^2=dP/d\rho$ , где давление обеспечивается электронным газом, а плотность – ионами.

3. Вычислить коэффициент теплопроводности для газа нейтральных молекул, принимая для интеграла столкновений  $\tau$ - приближение.

### Примерные вопросы на экзамен

*На проверку сформированности компетенции ОПК-3:*

Электроны и дырки в полупроводниках.

Найти первую квантовую поправку в выражении для химического потенциала для слабо-вырожденного бозе-газа,  $(mT)^{3/2}/(2\pi\hbar)^3 \gg N/V$ , и поправку к теплоемкости.

Вырожденный бозе-газ. Бозе конденсация.

Из точки  $\mathbf{r} = 0$  одновременно стартуют одинаковые броуновские частицы массы  $m$ . Сила трения, действующая на частицу,  $\mathbf{f}_{\text{тр}} = -\alpha \mathbf{v}$ . Найти размер образуемого ими облака через большой интервал времени  $t$ .

Газ фотонов. Формула Планка.

Для газа фотонов найти флуктуацию числа частиц,  $\langle \Delta N_\gamma^2 \rangle$ . Для объема  $V=1 \text{ см}^3$ , оценить величину температуры, при которой равновесное число фотонов,  $N_\gamma$ , совпадает с их флуктуацией,  $\langle \Delta N_\gamma^2 \rangle = N_\gamma^2$ .

Одномерный кристалл, квантование одномерной цепочки. Интерпретация результатов в терминах газа фононов.

Найти коэффициент вязкости электронного газа в металле в  $\tau$ - приближении.

Колебания твердых тел в пределах высоких и низких температур.

На ранних стадиях эволюции Вселенной температура значительно превосходила энергию покоя электрона,  $T \gg m_e c^2$ . Найти концентрации электронов и фотонов при таких температурах.

Модель Дебая.

Найти среднеквадратическое смещение  $\langle x^2 \rangle$  частицы за время  $t$ . Уравнение движения (одномерное,  $m=1$ ) имеет вид  $dv/dt = \zeta(t)$ , где  $v = dx/dt$  – скорость частицы,  $\zeta(t)$  -- случайная сила с корреляторами  $\langle \zeta(t) \rangle = 0$ ,  $\langle \zeta(t_1) \zeta(t_2) \rangle = D \delta(t_1 - t_2)$ . Начальные условия:  $v(0) = 0$ ,  $x(0) = 0$ .

Модель Вейсса для ферромагнетизма. Закон Кюри-Вейсса.

Электрическая цепь составлена из соединенных последовательно катушки индуктивности  $L$ , сопротивления  $R$  и конденсатора  $C$ . Найти корреляционную функцию заряда на конденсаторе  $\langle q(t_1) q(t_2) \rangle$ .

Параметр порядка. Теория Ландау фазовых переходов второго рода.

Найти первую квантовую поправку в выражении для химического потенциала для слабо-вырожденного бозе-газа,  $(mT)^{3/2}/(2\pi\hbar)^3 \gg N/V$ , и поправку к уравнению состояния.

Квазистационарные флуктуации (флуктуации основных термодинамических величин).

Найти энтропию бозе-газа в однородном поле  $U(z) = \begin{cases} \infty & \text{при } z < 0, \\ f & \text{при } z > 0 \end{cases}$  и температуре  $T$  ниже температуры конденсации Бозе-Эйнштейна.

Флуктуации числа частиц. Корреляция флуктуаций числа частиц и температуры,  $\langle \Delta N \Delta T \rangle$ .

Найти энтропию электронно-дырочного газа в чистом полупроводнике. Считать, что температура  $T$  мала по сравнению с шириной запрещенной зоны  $\Delta$ .

Рассеяние света за счет флуктуаций, формула Рэлея. Дублет Мандельштама-Бриллюэна.  
Найти отношение флуктуаций  $\langle(\Delta V)^2\rangle_s/\langle(\Delta V)^2\rangle$  (определяющее отношение интенсивности рассеянного света в “крыльях” дублета Мандельштама-Бриллюэна к полной интенсивности рассеянного света).

Флуктуации параметра порядка. Критерий применимости теории Ландау.  
Найти химический потенциал бозе-газа в поле одномерного гармонического осциллятора при высоких и низких температурах.

Корреляция флуктуаций во времени на примере броуновского движения и флуктуаций в электрических цепях.

В объеме  $V$  находятся  $N$  частиц идеального бозе-газа при температуре ниже температуры конденсации Бозе-Эйнштейна. Найти давление и энтропию этого газа.

Неравновесный идеальный газ. Вывод равновесных распределений Ферми и Бозе из условия максимума энтропии.

Найти корреляцию флуктуаций энергии и числа частиц при постоянном объеме,  $\langle\Delta E\Delta N\rangle_v$ .

Кинетическое уравнение Больцмана.

Оценить температуру, при которой электронная теплоемкость металла сравнима по величине с теплоемкостью, связанной с колебаниями кристаллической решетки. Провести расчет для меди: атомная концентрация  $n=8.52\times 10^{22}$  см<sup>-3</sup>; температура Дебая  $\Theta=315$  К.

Закон возрастания энтропии. H- теорема Больцмана.

Найти температуру конденсации Бозе-Эйнштейна для бозе-газа в центральном поле  $U(r)=\alpha r^3$  и теплоемкость при температуре  $T$  ниже температуры конденсации.

Переход от кинетического уравнения к уравнениям газовой динамики.

Для двумерного бозе-газа найти флуктуацию числа частиц.

Интеграл столкновений для рассеяния электронов на примесях. Проводимость металла.

Используя модель Дебая, определить вклад в энтропию кристалла, связанный с колебаниями кристаллической решетки. Упростить выражение в случае высоких,  $T\gg\Theta$ , и низких  $T\ll\Theta$ , температур.

Расчет коэффициента теплопроводности электронного газа и других кинетических коэффициентов, описывающих термоэлектрические явления в металле (использовать  $\tau$ - приближение для интеграла столкновений).

Найти флуктуацию давления вырожденного ферми-газа при постоянном объеме.

Термоэлектрические явления: эффекты Зеебека, Пельтье, Томсона.

Используя модель Дебая, найти количество фононов в кристалле (фононы – кванты возбуждения кристаллической решетки). Упростить выражение в случае высоких,  $T\gg\Theta$ , и низких  $T\ll\Theta$ , температур.

Бесстолкновительная плазма. Продольные плазменные волны. Затухание Ландау.

На ранних стадиях эволюции Вселенной температура значительно превосходила энергию покоя электрона,  $T\gg m_e c^2$ . Сравнить энергии, приходящиеся на один электрон и один фотон. Можно ли считать электронный и фотонный газы, в этих условиях, невырожденными?

Термодинамика необратимых процессов. Термодинамические силы и потоки. Кинетические коэффициенты и соотношения симметрии Онзагера.

Найти флуктуацию числа частиц для вырожденного ферми-газа при постоянном объеме.

Обобщенная восприимчивость и ее аналитические свойства, связь с диссипацией.

Используя модель Дебая, найти флуктуацию энергии колебаний кристаллической решетки. Упростить выражение в случае высоких,  $T \gg \Theta$ , и низких  $T \ll \Theta$ , температур.

Флуктуационно-диссипационная теорема.

Используя модель Дебая, найти вклад в теплоемкость колебаний атомов двумерной решетки (атомы адсорбированы на поверхности). Упростить выражение в случае высоких,  $T \gg \Theta$ , и низких  $T \ll \Theta$ , температур.

### Дополнительные вопросы для экзамена

Оценить температуру, при которой происходит ионизация атомов донорной примеси в полупроводнике n-типа. Для оценки использовать следующие значения параметров полупроводника: ширина запрещенной зоны  $\Delta=1$  эВ, энергия ионизации атома примеси  $E_d=0.045$  эВ, концентрация примесных атомов  $n_d=10^{14}$  см<sup>-3</sup>, Эффективные массы электронов и дырок можно считать равными массе свободного электрона.

Для двумерного бозе-газа найти зависимость химического потенциала от температуры.

Для двумерного ферми-газа найти флуктуацию числа частиц.

На ранних стадиях эволюции Вселенной температура значительно превосходила энергию покоя электрона,  $T \gg m_e c^2$ . Найти удельную энтропию, приходящуюся при этом на один электрон и один фотон. Можно ли считать электронный и фотонный газы, в этих условиях, невырожденными?

Найти флуктуацию объема больцмановского газа, ограниченного поршнем, площади  $S$ , который удерживается пружиной жесткости  $k$ . Внешнее давление  $P_0$ , температура  $T_0$ . В равновесии пружина не растянута.

Найти корреляционную функцию напряжения на концах сопротивления – проводника длиной  $L$ , поперечным сечением  $S$ , в котором хаотически движется  $N$  электронов проводимости, рассматриваемые как броуновские частицы.  $\tau$ - время затухания “броуновских” электронов.

### Пример экзаменационного билета

1. Корреляция флуктуаций во времени на примере броуновского движения и флуктуаций в электрических цепях
2. Найти химический потенциал бозе-газа в поле одномерного гармонического осциллятора при высоких и низких температурах



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 «Термодинамика и статистическая физика 2»  
по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

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