

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор-директор ФТИ  
\_\_\_\_\_ О.Ю. Долматов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

**БАЗОВАЯ РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА  
(Статистическая физика)**

Направление (специальность) ООП 011200 Физика

Профиль(и) подготовки (специализация, программа)  
**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА**

Квалификация (степень) бакалавр  
Базовый учебный план приема 2011 г.  
Курс 3 семестр б  
Количество кредитов 2  
Код дисциплины ДИСЦ.БЗ, Б2.4

Виды учебной деятельности	Временной ресурс по очной форме обучения	
Лекции, ч		36
Аудиторные занятия, ч		36
Самостоятельная работа, ч		27
ИТОГО, ч		63

Вид промежуточной аттестации экзамен  
Обеспечивающее подразделение кафедра общей физики

Заведующий кафедрой,  
к.ф.-м.н., доцент Лидер А.М.

\_\_\_\_\_  
(ФИО)

Руководитель ООП,  
к.п.н., доцент Склярова Е.А.

\_\_\_\_\_  
(ФИО)

Преподаватель,  
д.ф.-м.н., профессор Бехтерева Е.С.

\_\_\_\_\_  
(ФИО)

2014 г.

## 1. Цели освоения модуля (дисциплины)

Целью данного курса является ознакомление студентов с основными понятиями и принципами статистической физики и термодинамики. Студенты научатся пользоваться основными распределениями статистической физики, будут способны применять их для исследования простейших систем со многими степенями свободы: идеального больцмановского газа (одноатомного и двухатомного), идеальных ферми- и бозе-газов элементарных частиц, черного излучения, а также для решения простейших задач. Овладение статистической физикой в таком объеме позволит студентам в будущем изучать другие разделы современной физики.

В соответствии с целями ФГОС и ООП **011200 - Физика**

целью освоения дисциплины является:

- подготовка бакалавра к разработке проектов научных исследований в области профессиональной деятельности, к проведению маркетингового прогнозирования и менеджмента разработанного проекта, к выявлению экологически чистых научных исследований и энергосберегающих производств в профессиональной сфере;
- подготовка бакалавра к получению новой информации, к моделированию физических явлений, к работе в междисциплинарных областях научных исследований;
- подготовка выпускника к работе в интернациональной команде, организации творческого коллектива и его работы над проектом научных исследований, в том числе за рубежом.
- подготовка бакалавра, способного представить, обосновать и отстаивать результаты собственных исследований и выводов, осознавать ответственность за принятие профессиональных решений.

## 2. Место модуля (дисциплины) в структуре ООП

Дисциплина «Теоретическая физика: Статистическая физика» относится к профессиональному циклу ООП и предусматривает освоение студентами базовых знаний в области статистической физики, необходимых для создания современных представлений о физических явлениях, используемых в высокотехнологичных производственных циклах, необходимых для дальнейшего изучения фундаментальных и технических дисциплин, служит основой, на которой строится дальнейшее обучение студентов.

Дисциплине предшествует освоение дисциплин (ПРЕРЕКВИЗИТЫ):

- **Математический анализ** (пределы, анализ бесконечно малых, дифференцирование и интегрирование, криволинейные интегралы, двойные интегралы, многомерные интегралы, числовые ряды, функциональные ряды, признаки сходимости рядов, ряды Фурье).
- **Молекулярная физика и термодинамика** (идеальный и реальный газы, распределения Больцмана и Максвелла, циклические процессы, основы термодинамики, явления переноса, молекулярные явления в

жидкостях и твердых телах);

- **Механика** (Из курса Механики студенты должны знать гамильтонов формализм: обобщенные координаты и импульсы, уравнения Гамильтона, скобки Пуассона, законы сохранения);
- **Электричество и магнетизм** (электрическое и магнитное поле, энергия электрического и магнитного поля, электромагнитная индукция);
- **Колебания и волны** (гармонический осциллятор, упругие волны, электромагнитные волны, затухающие и вынужденные колебания, гармоники, гармонический анализ, волновые явления, принцип Гюйгенса, интерференция, дифракция, акустика);
- **Оптика** (дифракция и интерференция света, взаимодействие волн с веществом);
- **Квантовая Механика** (из курса Квантовой механики студентам понадобятся знания самых общих принципов квантовой теории (принцип неопределенности Гейзенберга, принцип суперпозиции состояний); энергетические спектры простейших квантовомеханических систем (гармонический осциллятор, ротатор, атом водорода); понятие тождественности частиц (существование фермионов и бозонов), структура атомов и ионов. Знакомство с представлением чисел заполнения, обычно рассматриваемым во второй части курса, желательно, но необязательно);

Содержание разделов дисциплины «Теоретическая физика: Квантовая механика» согласовано с содержанием дисциплин, изучаемых параллельно (КОРЕКВИЗИТЫ):

- **Физика конденсированного состояния**
- **Физические основы наноматериалов**
- **Методы изучения наноматериалов**
- **Взаимодействие излучения и плазмы с веществом**
- **Металлы и полупроводники: технологии и процессы**
- **Физика поверхности и тонкие пленки**
- **Экспериментальные методы в исследовании конденсированного состояния**
- **Кристаллография**
- **Учебно-исследовательская работа студентов**

«Теоретическая физика: Статистическая физика» является важной дисциплиной для студентов, специализирующихся в области естественных наук, т.к. содержит материал, необходимый для любой дальнейшей научной деятельности. Для овладения предметом «Теоретическая физика: Статистическая физика» студенту необходима активная самостоятельная работа, которая заключается в дополнительной проработке лекционного материала, решении задач по данному курсу.

### 3. Результаты освоения дисциплины «Теоретическая физика: Статистическая физика»

В соответствии с требованиями ООП освоение дисциплины направлено на формирование у студентов следующих компетенций (результатов обучения), в т.ч. в соответствии с ФГОС:

Таблица 1

#### Составляющие результатов обучения, которые будут получены при изучении данной дисциплины

Результаты обучения (компетенции из ФГОС)	Составляющие результатов обучения					
	Код	Знания	Код	Умения	Код	Владение опытом
<p><b>Р1</b> (ОК-1, ОК-2, ОК-7, ОК-8, ОК-11, ОК-19) Способен самостоятельно приобретать новые знания, использовать современные образовательные и информационные технологии, совершенствовать и развивать свой профессиональный уровень</p>	3.1.1	Новые направления в области образовательных и информационных технологий	У1.1	Использовать современные образовательные и информационные технологии	В1.1 В1.3	<p>Анализа информационных источников, в т.ч. Интернет-ресурсов</p> <p>Выступлений с докладами и сообщениями и участия в дискуссиях</p>
<p><b>Р2</b> (ОК-3, ОК-4, ОК-8, ОК-14, ОК-15, ПК-10, ПК-12, ПК-13.) Способен к поиску, обработке и интерпретации с использованием современных информационных технологий данных, необходимых для формирования суждений по соответствующим научным и этическим проблемам как в коллективе, так и</p>	3.2.1	Основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации	У2.1 У2.2 У2.3 У2.5	<p>Пользоваться понятийным и терминологическим аппаратом в профессиональной сфере</p> <p>Самостоятельно находить решения поставленной задачи</p> <p>Применять иностранный язык для профессиональной деятельности</p> <p>Прогнозировать влияние использования технических средств</p>	В2.1	Внутригруппового взаимодействия

				Объективно оценивать свою работу и работу коллег		
<p><b>Р5</b> (ОК-12, ПК-3, ПК-4, ПК-6, ПК-14) Способен применить в проектах по тематике, методы квантовой теории, проводить оценки применимости моделей исследования состояний, исследуемых систем</p>	3 5.1	Знать основные понятия, которыми оперирует статистическая физика, такие как: температура и энтропия.	У 5.1	Пользоваться основными распределениями статистической физики.	В 5.1	Решения конкретных задач, направленных на применение основных принципов статистической физики и смежных наук.
	3 5.2	Знать, когда можно применять микроканоническое, каноническое или большое каноническое распределения.	5.2	Применять основные распределения для исследования простейших систем со многими степенями свободы: идеальный больцмановский газ (одноатомного и двухатомного).		
	3 5.3	Частные случаи: классические распределения Максвелла и Больцмана.				
	3 5.4	Квантовые распределения Ферми-Дирака, Бозе-Эйнштейна и Планка, и вычислять с их помощью средние значения и флуктуации физических величин.	5.3	Применять основные распределения для исследования идеальных ферми- и бозе-газов элементарных частиц.		

В результате освоения дисциплины студентом должны быть достигнуты следующие результаты:

Таблица 2

**Планируемые результаты освоения дисциплины**

№ п/п	Результат
РД1	<p><i>В результате освоения дисциплины студент должен <b>знать:</b></i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Уметь объяснить смысл и содержание всех Начал термодинамики. Нулевого (существование температуры), Первого (сохранение энергии), Второго (возрастание энтропии, максимальный коэффициент полезного действия тепловой машины) и Третьего (теорема Нернста о недостижимости абсолютного нуля температуры).;</li> <li>– понимать, что вероятностный подход лежит не в природе вещей, как в квантовой теории, а связано с невозможностью детального описания систем с</li> </ul>

	<p>огромным числом степеней свободы;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– усвоить понятия температуры и энтропии, и знать, когда можно применять микроканоническое, каноническое или большое каноническое распределения;</li> <li>– частные случаи: классические распределения Максвелла и Больцмана, а также квантовые распределения Ферми-Дирака, Бозе-Эйнштейна и Планка;</li> </ul>
РД2	<p><i>В результате освоения дисциплины студент должен <b>уметь</b>:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вычислять с их помощью средние значения и флуктуации физических величин;</li> <li>- использовать понятийный и терминологический аппарат в профессиональной сфере/ научно-исследовательской работе;</li> <li>- самостоятельно находить решения поставленной задачи;</li> <li>- использовать оценки применимости приближений;</li> <li>- критически оценивать полученные теоретические результаты и сравнение их с экспериментальными данными;</li> <li>- прогнозировать влияние использования наукоёмких, технических средств и нести ответственность за последствия своей деятельности;</li> <li>- предполагать влияние приближений, объяснять на уровне гипотез отклонения полученных экспериментальных данных от известных теоретических и экспериментальных зависимостей;</li> <li>- работать с научно-технической информацией</li> </ul>
РД3	<p><i>В результате освоения дисциплины студент должен <b>владеть опытом</b>:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- анализа информационных источников, в т.ч. Интернет-ресурсов;</li> <li>- выступлений с докладами и сообщениями и участия в дискуссиях;</li> <li>- элементарных навыков в постановке задачи и анализе методов решений и используемых приближений в исследованиях;</li> <li>- разделения научного и ненаучного знания;</li> <li>- работы с современными средствами аналитического программирования для решения задач статистической физики;</li> <li>- самостоятельного решения поставленной проблемы;</li> <li>- учета социальных, правовых и этических аспектов в профессиональной деятельности</li> </ul>

## 4. Структура и содержание дисциплины

### Шестой семестр: лекции – 32 часа

**Раздел 1. Классические и квантовые статистические ансамбли.** Предмет статистической физики. Динамическое и статистическое описание. Статистическое равновесие. Ансамбль Гиббса. Функция статистического распределения. Теорема Лиувилля. Каноническое распределение Гиббса. Квантовомеханическое описание. Статистический оператор (матрица плотности). Статистическая сумма. Распределение по энергии одноатомного идеального газа как целого. Принцип равных вероятностей для замкнутых систем. Микроканоническое распределение. Энтропия и температура. Независимость энтропии от неопределенности энергии системы. Вывод канонического распределения Гиббса из микроканонического. Общее определение энтропии. Аддитивность энтропии. Максимальность энтропии для равновесных распределений. Второе начало термодинамики. Флуктуация энергии в каноническом ансамбле. Термодинамические равенства для канонического ансамбля.

**Раздел 2. Термодинамические потенциалы.** Основное термодинамическое тождество. Работа и тепло. Теплоемкость. Термодинамические потенциалы. Тождества для термодинамических потенциалов. Термодинамические преобразования. Соотношения Максвелла. Температурная зависимость плотности энергии равновесного (черного) излучения. Термодинамическая шкала температур. Теорема Нернста. Максимальная работа. Цикл Карно. Термодинамическое описание шварцшильдовских черных дыр. Температура и энтропия черной дыры. Оценки для черной дыры с массой Солнца. Большое каноническое распределение Гиббса. Химический потенциал. Термодинамические равенства для большого канонического ансамбля. Зависимость термодинамических величин от числа частиц. Условия термодинамического равновесия. Флуктуации числа частиц.

**Раздел 3. Идеальные газы.** Идеальные газы тождественных частиц. Распределение Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Распределение Больцмана. Условие применимости статистики Больцмана. Термодинамические величины больцмановского идеального газа. Ферми- и бозе-газы элементарных частиц. Квантовая поправка к уравнению состояния больцмановского идеального газа. Температура вырождения. Сильно вырожденный ферми - газ. Энергия Ферми. Теплоемкость вырожденного ферми-газа. Флуктуации чисел заполнения квантовых состояний и полного числа фермионов. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Термодинамические функции идеального бозе-газа.

**Раздел 4. Черное излучение.** Распределение Планка. Формула Планка. Термодинамические функции черного излучения. Интенсивность испускания черного тела. Реликтовое излучение. Равновесие в химических реакциях. Закон действующих масс. Ионизационное равновесие. Равновесие по отношению к образованию  $e^+e^-$ -пар. Термодинамические флуктуации. Теорема Найквиста. Космический фон микроволнового излучения.

## 6. Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

### 6.1. Виды и формы самостоятельной работы

Самостоятельная работа студентов включает текущую и творческую проблемно-ориентированную самостоятельную работу (ТСР).

Текущая СРС направлена на углубление и закрепление знаний студента, развитие практических умений и включает<sup>1</sup>:

- работа с лекционным материалом, поиск и обзор литературы и интернет источников информации по темам семинаров;
- подготовка к практическим и семинарским занятиям;
- выполнение домашних работ по теме семинарского занятия
- подготовка к контрольной работе, к коллоквиуму, экзамену.

Творческая самостоятельная работа включает<sup>2</sup>:

- поиск, анализ, структурирование материала, подготовка и презентация реферата-доклада с элементами проектирования к конференц-неделе;
- анализ научных публикаций по заранее определенной преподавателем теме.

### 6.3. Контроль самостоятельной работы

Оценка результатов самостоятельной работы организуется следующим образом:

- тестовый 15-минутный контроль (периодичность -1 раз в три лекции);
- вопросы для самоконтроля;
- выполнение самостоятельных работ;
- вопросы, выносимые на экзамен;
- реферат;
- доклады на конференц-неделях.

Оценка качества освоения дисциплины производится по результатам следующих контролируемых мероприятий:

Контролирующие мероприятия	Результаты обучения по дисциплине
Самостоятельные работы	Знание основных формул и определений
Контрольные тестовые опросы на занятиях	Умение самостоятельно находить решение поставленной задачи
Участие студентов в научной дискуссии по подготовленным и представленным	Овладение опытом анализа информационных



презентациям, рефератам во время проведения конференц-недели	источников; выступлений с докладами и участия в дискуссиях; разделения научного и ненаучного знания;
Выполнение и защита индивидуальных заданий	Знание основных формул и определений. Умение самостоятельно находить решение поставленной задачи
Тестирование	Знание основных формул и определений. Умение самостоятельно находить решение поставленной задачи

Контроль со стороны преподавателя и самоконтроль осуществляется в соответствии с рейтинг-планом дисциплины, во время практических и лабораторных занятий, коллоквиумов, защиты домашних заданий.

Цель контроля состоит в оценке уровня знаний и умений, приобретаемых студентами в процессе изучения всех разделов курса на различных видах занятий и при самостоятельной работе. Применение различных форм контроля знаний студентов расширяет возможности обучающей функции контроля и позволяет целенаправленно развивать творческие способности каждого студента.

### **1. Лекционный курс.**

Коллоквиумы по теоретическому материалу (не менее двух раз в семестр) с введением вопросов, выносимых на самостоятельное изучение.

**2. Полусеместровая контрольная работа** с использованием банка задач. Защита домашних заданий. Контроль усвоения содержания дисциплины ведется также периодическим тестированием студентов, с использованием банка заданий всех уровней, а именно:

**тематический (рубежный)** проводится по итогам изучения студентами одного или нескольких разделов курса статистической физики (не менее 2-х раз в семестр);

**итоговый (комплексные задания)** проводится в пятом семестре по окончании изучения дисциплины по всем разделам.

**Оценка знаний студентов** - применяется сквозная рейтинговая оценка в соответствии с рейтинг-планом, на основании которого каждое занятие завершается оценкой текущей деятельности всех студентов. По завершении всего курса обучения определяется итоговая рейтинговая оценка. Окончательная оценка знаний производится в форме экзамена (с учетом предварительной рейтинговой оценки) по экзаменационным билетам из банка билетов, с включением вопросов, выделенных для самостоятельного изучения.

## **7. Рейтинг качества освоения дисциплины (модуля)**

Оценка качества освоения дисциплины в ходе текущей и промежуточной аттестации обучающихся осуществляется в соответствии с «Руководящими материалами по текущему контролю успеваемости, промежуточной и итоговой аттестации студентов Томского политехнического университета», утвержденными приказом ректора № 77/од от 29.11.2011 г.

В соответствии с «Календарным планом изучения дисциплины»:

- текущая аттестация (оценка качества усвоения теоретического материала (ответы на вопросы и др.) и результаты практической деятельности (решение задач, выполнение заданий, решение проблем и др.) производится в течение семестра (оценивается в баллах (максимально 60 баллов), к моменту завершения семестра студент должен набрать не менее 33 баллов);
- промежуточная аттестация (экзамен, зачет) производится в конце семестра (оценивается в баллах (максимально 40 баллов), на экзамене (зачете) студент должен набрать не менее 22 баллов).

Итоговый рейтинг по дисциплине определяется суммированием баллов, полученных в ходе текущей и промежуточной аттестаций. Максимальный итоговый рейтинг соответствует 100 баллам.

## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

Основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 673 с.
2. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Т. 1.- М.: Физматгиз, 1962. – 528 с.
3. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. - М.: Наука, 1977. – 473 с.
4. Кубо Р. Статистическая механика. - М.: Мир, 1967. – 310 с.
5. В.М. Ермаченко, Б.М. Карнаков, С.Р. Кельнер, А.С. Чернов. Практикум по теоретической физике. Распределения статистической физики. – М.: МИФИ, 1989. – 645 с.

Дополнительная литература:

1. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. - М.: Наука, 1983.
2. Фейнман Р. Статистическая механика. - М.: Мир, 1978.
3. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Т. 1.- М.: Мир, 1978.
4. Майер Дж., Гепперт-Майер М., Статистическая механика, М: Мир, 1980.

## 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Указывается материально-техническое обеспечение дисциплины: технические средства, демонстрационное оборудование и др.

№ п/п	Наименование (компьютерные классы, учебные лаборатории, оборудование)	Корпус, ауд., количество установок
1	Компьютерный класс, программное обеспечение для программирования в системах аналитических вычислений типа MAPLE, MATHEMATICA, пакеты PHYSICS, QUANTUM	Ауд. 431 (3 корпус)
2	Лекционная аудитория с мультимедийным демонстрационным оборудованием.	Ауд. 206 (3 корпус)

Программа составлена на основе Стандарта ООП ТПУ в соответствии с требованиями ФГОС по направлению 011200 Физика.

Программа одобрена на заседании кафедры

\_\_\_\_\_

(протокол № \_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.).

Автор: Бехтерева Елена Сергеевна

Рецензент: Уленеков Олег Николаевич



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 1

по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Каноническое распределение Гиббса. Квантовомеханическое описание. Статистический оператор (матрица плотности). Статистическая сумма.	15
2. Распределение Планка. Формула Планка. Термодинамические функции черного излучения. Интенсивность испускания черного тела. Реликтовое излучение.	15
3. Сформулировать теорему Лиувилля.	5
4. Сформулировать условие применимости статистики Больцмана.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 2  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Вывод канонического распределения Гиббса из микроканонического.	15
2. Химический потенциал. Термодинамические равенства для большого канонического ансамбля.	15
3. Сформулировать теорему Нернста и ее основные следствия.	5
4. Найти свободную энергию больцмановского газа.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 3

по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Динамическое и статистическое описание. Статистическое равновесие. Ансамбль Гиббса. Функция статистического распределения. Теорема Лиувилля.	15
2. Ферми- и бозе-газы элементарных частиц. Квантовая поправка к уравнению состояния больцмановского идеального газа.	15
3. Написать выражение для температуры вырождения газов.	5
4. Написать распределение Планка.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_»\_\_ 2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_»\_\_ 2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 4  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Основное термодинамическое тождество. Работа и тепло. Теплоемкость. Термодинамические потенциалы.	15
2. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Термодинамические функции идеального бозе-газа.	15
3. Получить условие равновесия в химических реакциях.	5
4. Дать определение статистического оператора.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский  
Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 5  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Квантовомеханическое описание. Статистический оператор (матрица плотности). Статистическая сумма. Распределение по энергии одноатомного идеального газа как целого.	15
2. Идеальные газы тождественных частиц. Распределение Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Распределение Больцмана. Условие применимости статистики Больцмана.	15
3. Написать каноническое распределение Гиббса.	5
4. В чем состоит вероятностный смысл Второго начала термодинамики	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_»\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_»\_\_\_\_2014 г.

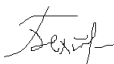





Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 6  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Общее определение энтропии. Аддитивность энтропии. Максимальность энтропии для равновесных распределений. Второе начало термодинамики. Флуктуация энергии в каноническом ансамбле.	15
2. Сильно вырожденный ферми - газ. Энергия Ферми. Теплоемкость вырожденного ферми-газа.	15
3. Доказать, что максимальная работа производится в обратимых процессах.	5
4. Сформулировать условия термодинамического равновесия.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ  Е.С.Бехтерева « \_\_\_ » \_\_\_ 2014г.  
УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ  А.М.Лидер « \_\_\_ » \_\_\_ 2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 7

по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Зависимость термодинамических величин от числа частиц. Термодинамические равенства для системы с переменным числом частиц.	15
2. Теорема Лиувилля.	15
3. Написать распределение Ферми-Дирака.	5
4. Сформулировать условие “идеальности” электрон – протонной плазмы.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 8  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Основное термодинамическое тождество. Работа и количество тепла, теплоемкость. Адиабатический процесс.	15
2. Термодинамические величины ферми- и бозе –газов.	15
3. Найти зависимость числа бозонов в основном состоянии от температуры	5
4. Написать распределение Максвелла по скоростям.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 9  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Общие принципы статистической физики (динамическое и статистическое описание, фазовое пространство, функция распределения).	15
2. Вырожденный электронный газ (при температуре $T=0$ ). Энергия Ферми. Уравнение состояния.	15
3. Найти коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно.	5
4. Написать статистическую сумму канонического распределения Гиббса.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

**Экзаменационный билет № 10**  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Принцип равных вероятностей и микроканоническое распределение.	15
2. Зависимость термодинамических величин от числа частиц. Термодинамические равенства для системы с переменным числом частиц.	15
3. Написать основное термодинамическое тождество.	5
4. Сформулировать условия классического рассмотрения флуктуаций	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 11  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Энтропия для ансамблей. Второе начало термодинамики. Условия термодинамического равновесия.	15
2. Теплоемкость вырожденного электронного газа	15
3. Сформулировать теорему Лиувилля.	5
4. Написать основное термодинамическое тождество.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 12  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Равновесное излучение. Распределение Планка. Формула Планка. Излучение черного тела.	15
2. Большое каноническое распределение Гиббса. Химический потенциал.	15
3. Найти температуру бозе-эйнштейновской конденсации.	5
4. Выразить среднеквадратичную и относительную флуктуации числа частиц через изотермическую сжимаемость.	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_\_\_2014 г.



Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет № 13

по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Максимальная работа в круговом процессе. Цикл Карно.	15
2. Флуктуации термодинамических величин.	15
3. Написать основное термодинамическое тождество для большого канонического ансамбля Гиббса.	5
4. Какими экстремальными свойствами обладают термодинамические потенциалы	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_»\_\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_»\_\_\_\_2014 г.





Национальный исследовательский Томский  
политехнический  
университет

Экзаменационный билет **№ 14**  
по дисциплине:  
Теоретическая физика. Статистическая  
физика  
часть 1  
институт: ФТИ  
курс 3

Вопросы	Макс. балл - 40
1. Теорема Лиувилля.	15
2. Распределения Ферми и Бозе. Распределение Больцмана. Критерий вырождения.	15
3. Получить выражение для энергии Ферми.	5
4. Дать определение статистического веса макроскопического состояния	5

Лектор, профессор КОФ ФТИ

Е.С.Бехтерева «\_\_\_»\_\_\_2014г.

УТВЕРЖДАЮ: зав. КОФ

А.М.Лидер «\_\_\_»\_\_\_2014 г.

## КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»

### ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

**Задача 1.** Доказать, что если каждая из трех переменных  $A, B, C$  является дифференцируемой функцией двух других, рассматриваемых как независимые, то:

$$\text{а) } \left(\frac{\partial A}{\partial B}\right)_C \left(\frac{\partial B}{\partial C}\right)_A \left(\frac{\partial C}{\partial A}\right)_B = -1$$

$$\text{б) } \left(\frac{\partial A}{\partial C}\right)_B = \frac{1}{\left(\frac{\partial C}{\partial A}\right)_B}$$

**Задача 2.** а) Проинтегрировать дифференциальные формы

$$du \equiv dx + dy,$$

$$dv = x(dx + dy).$$

по следующим двум траекториям на плоскости:

(I) прямые линии  $(x_1, y_1) \rightarrow (x_2, y_1) \rightarrow (x_2, y_2)$ ;

(II) прямые линии  $(x_1, y_1) \rightarrow (x_1, y_2) \rightarrow (x_2, y_2)$ .

$P(x_1, y_1), Q(x_2, y_2)$  - две точки и  $x_1 \neq x_2, y_1 \neq y_2$ .

Показать, что

$$\int_{(I)} du = \int_{(II)} du = u(Q) - u(P),$$

где  $u = x + y$ , и

$$\int_{(I)} dv \neq \int_{(II)} dv;$$

обсудить результат.

[Мы будем обозначать дифференциальные формы с такими свойствами через  $pv$  вместо  $dv$  и называть их *неполными* дифференциалами, в то время как  $du$  - *полный* дифференциал. В соотношениях типа  $du(x, y, \dots) = g(x, y, \dots)pv(x, y, \dots)$  функция  $g(x, y, \dots)$  называется *интегрирующим множителем*.]

б) Показать, что если форма

$$dF = X(x, y)dx + Y(x, y)dy$$

Является полным дифференциалом, то

$$\left(\frac{\partial X}{\partial y}\right)_x = \left(\frac{\partial Y}{\partial x}\right)_y.$$

в) Пфаффова форма имеет общий вид

$$dv \text{ (или } pV) = \sum_{j=1}^n X_j(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_j.$$

(т. е.  $dv$  может быть полным или неполным дифференциалом).

Показать, что при  $n=2$ , если  $X_j$  - однозначные, непрерывные и дифференцируемые функции,  $dv$  всегда имеет интегрирующий множитель при условии, что функция  $X_2$  не равна нулю в рассматриваемой области изменения переменных.

г) Убедиться, что пфаффова форма при  $n=3$  не всегда имеет интегрирующий множитель; для этого рассмотреть выражение  $pV = xdy + kdz$ , где  $k$  - не равная нулю константа.

**Задача 3.** Для газов и других простых веществ возможными переменными являются давление  $p$ , объем  $v$  и эмпирическая температура  $t$ . Они связаны уравнением состояния, так что только две из этих переменных являются независимыми. Элементарное количество тепла, полученное при квазистатическом процессе, может быть выражено следующими эквивалентными способами:

$$pQ = C_v dt + l_v dv = C_p dt + l_p dp = m_v dv + m_p dp,$$

где коэффициенты, которые сами могут зависеть от  $p$ ,  $v$  и  $t$ , являются величинами, характерными для данного газа или жидкости. Термин эмпирическая температура относится к произвольной шкале и применяется для отличия от *абсолютной температуры*, обозначаемой через  $T$ .

Доказать, что выполняются следующие соотношения:

$$а) m_v = \frac{l_v C_p}{C_p - C_v}, m_p = -\frac{l_p C_v}{C_p - C_v}, \frac{m_v}{l_v} + \frac{m_p}{l_p} = 1;$$

$$б) \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)_v = -\frac{C_p - C_v}{l_p}, \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p = \frac{C_p - C_v}{l_v}.$$

в) Пояснить физический смысл коэффициентов в выражении для  $pQ$ .

**Задача 4.** Пусть

$$\alpha_p \equiv \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)_p$$

- коэффициент объемного расширения при постоянном давлении, и пусть

$$K_t \equiv -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_t$$

- изотермическая сжимаемость газа или жидкости (используются обозначения задачи 1.3).

а) Показать, что коэффициент Грюнайзена  $\Gamma \equiv \alpha_p v / K_t C_v$  для вещества удовлетворяет соотношению

$$\Gamma = \frac{v(\partial p / \partial t)_v}{C_v}.$$

б) Показать, что отношение теплоемкостей  $\gamma \equiv C_p / C_v$  удовлетворяет соотношениям

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{(\partial p / \partial v)_a}{(\partial p / \partial v)_t}, \\ \frac{1}{\gamma - 1} &= \frac{(\partial v / \partial t)_a}{(\partial v / \partial t)_p}, \\ \frac{\gamma}{\gamma - 1} &= \frac{(\partial p / \partial t)_a}{(\partial p / \partial t)_v}, \end{aligned}$$

где  $(\dots)_a$  обозначает величину, определенную для квазистатического процесса, т.е. при  $pQ=0$ .

в) Доказать, что

$$\frac{K_t}{K_a} = \gamma,$$

где  $K_a$  - адиабатическая сжимаемость.

г) Рассматривая  $d(\ln v)$ , показать, что

$$\left( \frac{\partial \alpha_p}{\partial p} \right)_t = - \left( \frac{\partial K_t}{\partial t} \right)_p.$$

**Задача 5.** Согласно первому закону термодинамики, существует такая функция  $U$ , называемая *внутренней энергией*, что для газов или подобных веществ в дополнение к первому уравнению задачи 1.3 справедливо соотношение

$$pQ = dU + pdv,$$

где  $p$  – давление и  $pdv$  – механическая работа, производимая системой.

а) Показать, что дифференциальное выражение для работы  $dW = pdv$  не является полным дифференциалом.

б) Доказать, что для коэффициента Грюнайзена (см. задачу 1.4) справедливо выражение

$$\Gamma = \frac{v}{\left(\frac{\partial U}{\partial p}\right)_v} = \frac{v}{m_p}.$$

в) Найти наиболее общее уравнение состояния газа, для которого коэффициент Грюнайзена не зависит от давления.

**Задача 6.** Показать, что

а)

$$m_p = \left(\frac{\partial U}{\partial p}\right)_v,$$

$$m_v = \left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_p + p,$$

$$\left(\frac{\partial m_p}{\partial v}\right)_p = \left(\frac{\partial m_v}{\partial p}\right)_p - 1.$$

б)

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_p - \left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)_v = \left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_t \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p.$$

в)

$$C_p - C_v = \left[ \left(\frac{\partial U}{\partial v}\right)_t + p \right] \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)_p.$$

**Задача 7.** а) Если заданы число  $n$  одинаковых частиц в системе, её внутренняя энергия  $U$  и объём  $v$ , то для описания системы удобно использовать микрочанонический ансамбль. Если эти величины изменяются, следует рассмотреть набор ансамблей с близкими значениями параметров  $n$ ,  $U$ ,  $v$ , которые становятся независимыми переменными. Исходя из того, что

$$TdS = dU + pdv - \sum_i \mu_i dn_i, \mu_i \equiv -T \left(\frac{\partial S}{\partial n_i}\right)_{U, v, n_{s \neq i}},$$

Показать, что статистическая сумма  $k(\ln N)$ , удовлетворяет соотношениям

$$\left(\frac{\partial \ln N}{\partial v}\right)_{U,n} = \frac{p}{kT}, \left(\frac{\partial \ln N}{\partial n}\right)_{U,v} = -\frac{\mu}{kT}, \left(\frac{\partial \ln N}{\partial U}\right)_{v,n} = \frac{1}{kT}.$$

Систему, определенную таким образом, можно рассматривать как изолированную.

б) Для канонического ансамбля независимыми переменными являются  $v$ ,  $n$ , и  $T$ , тогда как среднее значение  $U$  теперь задано. Систему, определенную таким образом, можно рассматривать как изолированную, находящуюся в тепловом равновесии с большим тепловым резервуаром (термостатом) при температуре  $T$ . Показать, что статистическая сумма удовлетворяет соотношениям

$$\left(\frac{\partial \ln Z}{\partial v}\right)_{T,n} = \frac{p}{kT}, \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial n}\right)_{T,v} = -\frac{\mu}{kT}, \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T}\right)_{v,n} = \frac{U}{kT^2}.$$

в) Для большого канонического ансамбля независимыми переменными являются  $v$ ,  $T$ , и  $\mu$ , тогда как средние значения  $U$  и  $n$  заданы. Предполагается, что система, определенная подобным образом, находится в равновесии с термостатом при температуре  $T$  и с большим резервуаром частиц с химическим потенциалом  $\mu$ . Показать, что статистическая сумма удовлетворяет соотношениям

$$\left(\frac{\partial \ln \Xi}{\partial v}\right)_{T,\mu} = \frac{p}{kT}, \left(\frac{\partial \ln \Xi}{\partial \mu}\right)_{T,v} = \frac{n}{kT}, \left(\frac{\partial \ln \Xi}{\partial T}\right)_{v,\mu} = \frac{U - \mu n}{kT^2}.$$

г) Получить соотношение

$$\left(\frac{\partial U}{\partial \mu}\right)_{T,v} - \mu \left(\frac{\partial n}{\partial \mu}\right)_{T,v} = T \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_{v,\mu}.$$

**Задача 8.** Система находится при фиксированных значениях химического потенциала и температуры. Показать, что логарифм большой статистической суммы для такой системы пропорционален объему.

[Указание: Полезно воспользоваться результатом задачи 6 пункт «в».]

**Задача 9.** Одномерное нормальное (гауссово) распределение с нулевым средним значением и среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  описывается выражением

$$p(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < x < \infty.$$

а) Показать, что для такого распределения информационная энтропия равна  $k \cdot \ln(2\pi e\sigma^2)/2$ , где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

б) Показать, что для заданного значения  $\int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx \equiv \sigma^2$  нормированного распределения вероятности, имеющего наибольшую информационную энтропию, является одномерным нормальным распределением.

### Задача 10.

Основной колебательно-вращательный (молекулярный) спектр изотропически чистого  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  изображен в нижней части рисунка. Под спектром указаны значения относительной интенсивности  $I_{\text{отн}}$  и волновые числа  $\bar{\omega}$  для каждой линии.

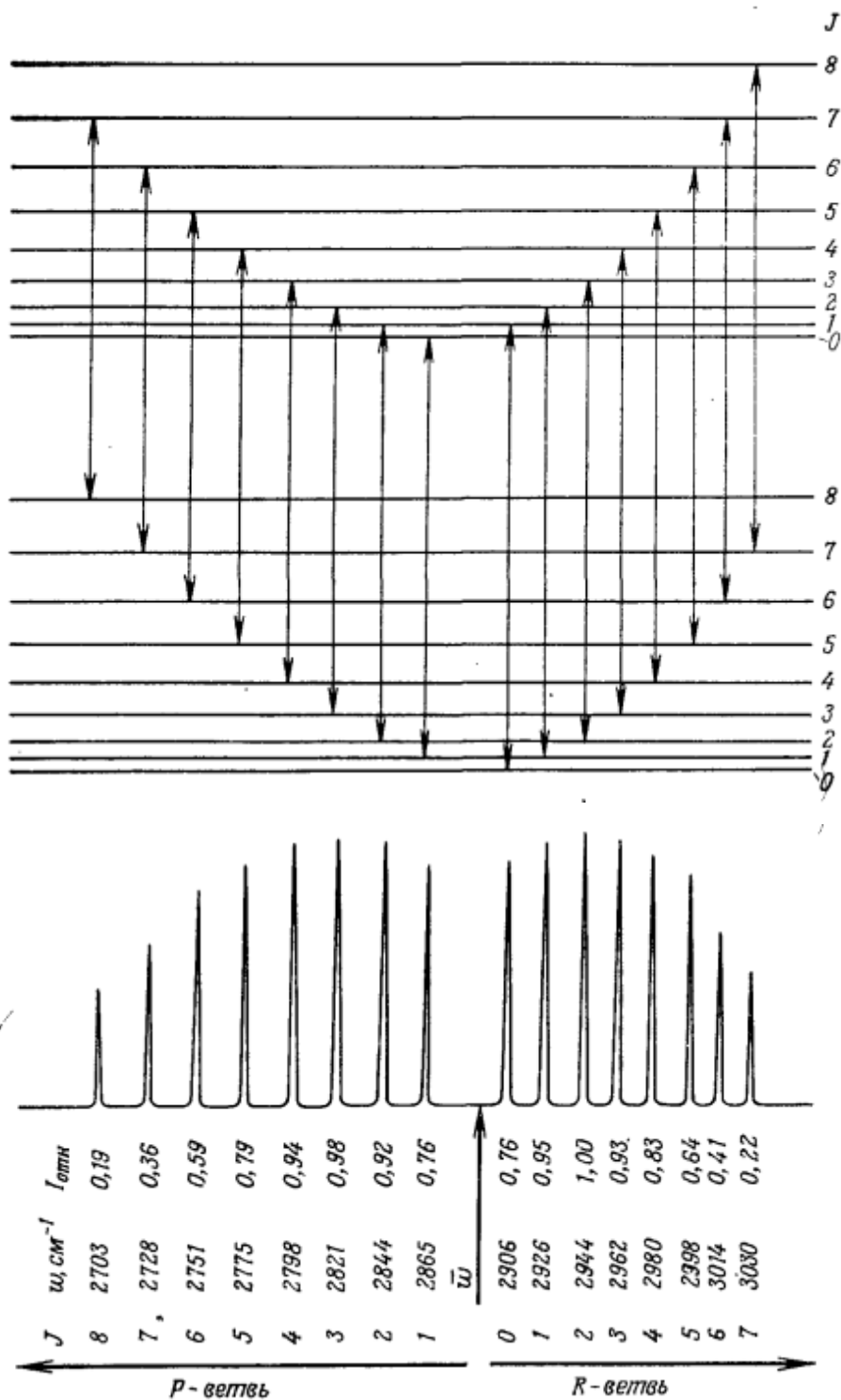


Рисунок 1 – Колебательно-вращательный спектр молекулы  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  (изображены уровни энергии и переходы, приводящие к появлению P- и R-ветвей)



Этот тип спектра получается следующим образом. Увеличение колебательного квантового числа  $V$  на единицу ( $\Delta V=+1$ ) в результате поглощения излучения может повлиять на вращательные уровни энергии двумя способами. При переходе на более высокий колебательный уровень увеличивается длина связи, что сопровождается увеличением момента инерции молекулы. Если молекула поглощает только небольшое количество энергии, то она может перейти на более низкий уровень вращательной энергии ( $\Delta J=-1$ ); при этом возникает P-ветвь спектра. Если поглощается большое количество энергии, то может произойти увеличение вращательной энергии, достаточное для того, что перевести молекулу на более высокий вращательный уровень ( $\Delta J=+1$ ), что приводит к возникновению R-ветви спектра. В верхней части рисунка 1 изображены первые восемь уровней вращательной энергии молекулы; двойные стрелки указывают переходы, приводящие к появлению линии, изображенных под стрелками. Для  $\Delta V=+1$  рассмотренные вращательные переходы изображены стрелками, направленными вверх, тогда как случаю  $\Delta V=-1$  соответствуют стрелки, обращенные вниз.

Правило отбора для колебательно-вращательного спектра гласит:  $\Delta J=0, \pm 1$ . Колебательно-вращательная энергия двухатомной молекулы в модели жесткого ротатора – гармонического осциллятора определяется соотношением:

$$E_{V,R} = (V + 1/2)hc\bar{\omega} + J(J + 1)hcB,$$

где  $\bar{\omega}$  - основная колебательная частота, выраженная в волновых числах, и  $B = h/8\pi^2 Ic$  - вращательная постоянная для определенного колебательного состояния. Постоянная  $c$  есть скорость света, так что постоянная  $B$  также выражена в волновых числах. Приведенное выше уравнение описывает один энергетический уровень, поэтому полная колебательно-вращательная энергия молекулы определяется суммой таких членов, взятой по всем значениям  $V$ . Воспользуемся теперь выражением для  $E_{V,R}$  вместе с правилом Бора:

$$E'_{V,R} - E''_{V,R} = hc\omega,$$

где штрихом и двумя штрихами отмечены верхнее и нижнее колебательные состояния и  $\omega$  - волновое число. Учитывая правила отбора ( $\Delta V=+1$  и  $\Delta J=-1$ ) для P-ветви, получим общее выражение для разности энергии двух уровней. Набор частот  $P(J)$  в P-ветви дается соотношением:

$$P(J) = \bar{\omega} - (B' - B'')J + (B' - B'')J^2,$$

где  $J$  может принимать любые отличные от нуля целочисленные значения 1, 2, 3 ...

Аналогично набор частот  $R(J)$  в R-ветви определяется соотношением

$$R(J) = \bar{\omega} + 2B' + (3B' - B'')J + (B' - B'')J^2,$$

где  $J$  может принимать любые целочисленные значения включая нуль.

а) Проанализировать спектр  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  следующим способом. Рассчитать комбинационные термы  $R(J)-P(J)$  и  $R(J-1)-P(J+1)$  и, рассматривая терм как функцию от  $2J+1$ , определить  $B'$  и  $B''$  соответственно; получить отсюда основную колебательную частоту  $\bar{\omega}$ .

б) Вращательная постоянная в колебательном состоянии связана с равновесным значением  $B_e$  соотношением  $B_v = B_e - (v + 1/2)\alpha$ , где  $\alpha$  - колебательно-вращательная постоянная. Вычислить  $B_e$  и определить ее с помощью равновесный момент инерции для молекулы  $\text{H}^{35}\text{Cl}$ .

$$B_e = h/8\pi^2 = 5,0553 \cdot 10^{11} \text{ а.е.м.} \times \text{Å}^2 \cdot \text{Гц}$$

в) Считая вырождение  $J$ -ого вращательного уровня энергии равным  $2J+1$  вывести выражение для плотности заселенности вращательных уровней энергии, основанное на законе распределения Больцмана. Показать, что наиболее плотно заселен уровень, для которого

$$J_{\text{макс}} = \frac{kT}{2Bh} - 1/2.$$

г) Площадь, ограниченная контуром наблюдаемого пика в спектре, пропорциональна интенсивности спектральной линии, которая в свою очередь пропорциональна плотности заселенности энергетического уровня. Абсолютные интенсивности трудно измерить, но относительные интенсивности легко определяются при наблюдении спектра. Показать что тангенс угла наклона зависимости  $\ln[I_{\text{отн}}/(2J-1)]$  от  $J(J-1)$  равен  $hB/kT$ . Исследовать  $R$ -ветвь спектра и определить температуру газа.

д) Вычислить энтропию, свободную энергию и теплоемкость для  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  при 300 К и давлении 1 атм. (Молекулярный вес  $\text{H}^{35}\text{Cl}$  равен 35,9877).

**Задача 11.** Рассмотрим систему из  $n$  одинаковых слабо взаимодействующих спинов. Каждый из спинов занимает один из  $2s + 1$  равноудаленных невырожденных энергетических уровней с энергией  $mW$  ( $m = -s, -s+1, \dots, +s$ ); средняя энергия каждого спина равна  $u_0$ . Найти распределение, дающее максимум энтропии, а также соотношение между  $u_0$  и температурным параметром  $\beta$ . Вычислить статистическую сумму системы и теплоемкость как функцию  $\beta$  для положительных и отрицательных значений  $\beta$ . (Используя соотношение  $\beta = 1/kT$  как определение температуры при отрицательных значениях  $\beta$ ). Найти упрощенные выражения для случая  $s = 1/2$ .

## КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»

### КОЛЛОКВИУМ № 1

1. Фазовое пространство, статистический ансамбль, функция распределения по состояниям в фазовом пространстве. Понятия подсистемы, статистической независимости, радиуса корреляции. Среднеквадратичные флуктуации аддитивных величин. Полное и неполное описание.
2. Теорема Лиувилля. Уравнение Лиувилля для функции распределения. Эволюция физических величин.
3. Статистическое распределение для квантовых систем. Чистое и смешанное состояния. Статистический оператор (матрица плотности). Уравнение Неймана (квантовое уравнение Лиувилля) для эволюции матрицы плотности. Полное и неполное описание в квантовой статистике. Правила соответствия квантовой и классической статистик.
4. Энтропия квантовых и классических систем. Экстремальный энтропийный принцип. Равновесные и квазиравновесные распределения.
5. Микроканоническое распределение, статистический вес и температура. Эргодическая гипотеза. Каноническое распределение, статистическая сумма и свободная энергия.
6. Большое каноническое распределение, большой термодинамический потенциал, большая статистическая сумма и химический потенциал. Изотермо-изобарический ансамбль, термодинамический потенциал, давление.
7. Эквивалентность статистических ансамблей. Вывод канонического распределения из микроканонического (теорема Гиббса о каноническом распределении). Основное термодинамическое соотношение в статистической физике. Естественные переменные основных термодинамических потенциалов. Теорема о малых добавках. Зависимость термодинамических величин от чисел частиц. Соотношение Гиббса-Дюгема.

## КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»

### КОЛЛОКВИУМ № 2

1. Работа и количество тепла. Первое начало термодинамики. Второе начало термодинамики. Неравенство Клаузиуса. Проблема необратимости. Закон возрастания энтропии. Минимальная работа, производимая над телом, находящимся во внешней среде.
2. Максимальная работа, совершаемая системой тел, цикл Карно. Термодинамические неравенства. Третье начало термодинамики. Теорема Нернста.
3. Фазы вещества, фазовое равновесие, правило фаз Гиббса, формула Клапейрона-Клаузиуса. Образование новой фазы.
4. Распределение по импульсам и координатам. Распределение Максвелла. Идеальный газ, распределение Больцмана. Свободная энергия и уравнение состояния больцмановского идеального газа. Идеальный газ с постоянной теплоемкостью. Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ. Химический потенциал одноатомного идеального газа. Двухатомный газ: вращения и колебания молекул.
5. Распределение Ферми. Распределение Бозе. Термодинамика Ферми- и Бозе-газа. Вырожденный электронный газ. Вырожденный Бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна.
6. Черное излучение. Распределение Планка. Термодинамика черного излучения.

## **КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»**

### **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

#### **ОСНОВНАЯ**

1. Я.П.Терлецкий, Статистическая физика, «Высшая школа», Москва, 1994.
2. Дж.Уленбек, Дж.Форд, Лекции по статистической механике, Издательство «Мир», Москва, 1965.
3. Ю.Б.Румер, Ю.Ш.Рывкин, Термодинамика, статистическая физика и кинетика, Издательство «Наука», Москва, 1972.
4. В.Г.Левич, Ю.А.Вдовин, В.А.Мямлин, Курс теоретической физики, том 2, Издательство «Наука», Москва, 1971.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. – М.: Наука. Физматлит, Москва, 1995.
6. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. - М.: Наука, 1977.
7. Кубо Р. Статистическая механика. - М.: Мир, 1967
8. В.М. Ермаченко, Б.М. Карнаков, С.Р. Кельнер, А.С. Чернов. Практикум по теоретической физике. Распределения статистической физики. – М.: МИФИ, 1989.
9. Задачи по термодинамике и статистической физике, под редакцией П.Ландсберга, Издательство «Мир», Москва, 1974.
10. Г.Ф.Караваяев, В.В.Герасимов, Основы термодинамики и статистической физики в задачах, Издательство «Феникс», Ростов на Дону, 2012.

#### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ**

1. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. - М.: Наука, Москва, 1983.
2. Фейнман Р. Статистическая механика. - М.: Мир, Москва, 1978.
3. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. Т. 1.- М.: Мир, Москва, 1978.
4. Майер Дж., Гепперт-Майер М., Статистическая механика, М: Мир, Москва, 1980.

## КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»

### ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

#### Лекция 1.

1. Написать распределение Максвелла по скоростям.
2. Написать распределение Максвелла по энергии.
3. Найти среднее значение, среднеквадратичную и относительную флуктуации энергии молекулы идеального газа.
4. Сформулировать теорему Лиувилля.
5. Написать каноническое распределение Гиббса.

#### Лекция 2.

1. Дать определение статистического оператора.
2. Написать статистический оператор канонического распределения Гиббса.
3. Написать среднее значение любой наблюдаемой для ансамбля Гиббса.
4. Написать статистическую сумму канонического распределения Гиббса.
5. Найти среднее значение, среднеквадратичную и относительную флуктуации энергии идеального газа при заданной температуре.

#### Лекция 3.

1. Дать определение статистического веса макроскопического состояния.
2. Написать микроканоническое распределение.
3. Дать определение энтропии и температуры.
4. Выразить энтропию идеального газа через температуру, объем и число частиц.
5. Получить каноническое распределение Гиббса из микроканонического распределения.

#### Лекция 4.

1. Дать определение информационной энтропии.
2. Доказать аддитивность энтропии.
3. Доказать, что каноническое распределение Гиббса соответствует максимуму информационной энтропии при фиксированном значении средней энергии.
4. В чем состоит вероятностный смысл Второго начала термодинамики?
5. Выразить среднеквадратичную и относительную флуктуации энергии в каноническом ансамбле.

## Лекция 5.

1. Написать основное термодинамическое тождество.
2. В чем состоит статистический смысл работы и тепла?
3. Дать определения термодинамических потенциалов (сводной энергии Гельмгольца, Гиббса и энтальпии) и написать для них термодинамические равенства.
4. Какими экстремальными свойствами обладают термодинамические потенциалы?
5. Выразить разность теплоемкостей  $C_p - C_v$  через коэффициент теплового расширения и изотермическую сжимаемость.

## Лекция 6.

1. Выразить давление равновесного излучения через плотность энергии.
2. Найти температурную зависимость плотности энергии равновесного излучения.
3. Сформулировать теорему Нернста и ее основные следствия.
4. Доказать, что максимальная работа производится в обратимых процессах.
5. Найти коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно.

## Лекция 7.

1. Чему равен шварцшильдовский радиус Солнца (до какого размера нужно сжать Солнце, чтобы оно стало черной дырой)?
2. Чему бы равнялась температура черной дыры с массой Солнца?
3. Выразить планковскую длину через размерные фундаментальные константы.
4. Выразить энтропию черной дыры через площадь его горизонта.
5. Во сколько раз изменится энтропия Солнца, рассматриваемого как идеальный газ нуклонов, если его сжать под горизонт событий?

## Лекция 8.

1. Написать большое каноническое распределение Гиббса и дать определение химического потенциала.
2. Написать основное термодинамическое тождество для большого канонического ансамбля Гиббса.
3. Сформулировать условия термодинамического равновесия.
4. Привести примеры экстенсивных и интенсивных термодинамических величин.
5. Выразить среднеквадратичную и относительную флуктуации числа частиц через изотермическую сжимаемость.

### **Лекция 9.**

1. Написать большую статистическую сумму для идеального газа.
2. Написать распределение Ферми-Дирака.
3. Написать распределение Бозе-Эйнштейна.
4. Написать распределение Больцмана.
5. Сформулировать условие применимости статистики Больцмана.

### **Лекция 10.**

1. Найти свободную энергию больцмановского газа.
2. Найти химический потенциал больцмановского газа.
3. Выразить большой термодинамический потенциал через внутреннюю энергию газа.
4. Найти квантовую поправку к уравнению состояния больцмановского идеального газа.
5. Написать выражение для температуры вырождения газов.

### **Лекция 11.**

1. Получить выражение для энергии Ферми.
2. Сформулировать условие “идеальности” электрон – протонной плазмы.
3. Найти поправку к химическому потенциалу вырожденного ферми-газа при низких температурах
4. Чему равна теплоемкость вырожденного ферми-газа?
5. Найти флуктуацию полного числа частиц в вырожденном ферми-газе.

### **Лекция 12.**

1. Найти температуру бозе-эйнштейновской конденсации.
2. Найти зависимость химического потенциала от температуры при стремлении температуры к нулю.
3. Найти зависимость числа бозонов в основном состоянии от температуры.
4. Найти энергию и теплоемкость бозе-газа при температурах, меньших температуры бозе-эйнштейновской конденсации.
5. Найти энергию и теплоемкость вырожденного бозе-газа при температурах, больших температуры бозе-эйнштейновской конденсации.

### **Лекция 13.**

1. Доказать, что химический потенциал фотонного газа равен нулю.
2. Написать распределение Планка.
3. Выписать спектральную плотность равновесного излучения (формула Планка).
4. Написать выражения для свободной энергии, энтропии и теплоемкости равновесного излучения.
5. Оценить среднюю плотность числа реликтовых фотонов.



#### Лекция 14.

1. Получить условие равновесия в химических реакциях.
2. Сформулировать закон действующих масс.
3. Вычислить степень диссоциации молекулярного водорода.
4. Написать уравнение Саха для тепловой ионизации атомарного водорода.
5. Найти условие равновесия по отношению к образованию  $e^+e^-$ -пар.

#### Лекция 15.

1. Получить общее выражение для среднеквадратичной флуктуации термодинамической величины.
2. Сформулировать условия классического рассмотрения флуктуаций.
3. Найти среднеквадратичную флуктуацию объема системы.
4. Сформулировать теорему Найквиста.
5. Дать определение шумовой температуры приемной антенны.

## КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»

### ВАРИАНТ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Ниже приводится вариант семестрового домашнего задания. Семестровое домашнее задание выдается студентам в середине семестра (после прохождения достаточного объема материала), принимается в конце семестра на последнем семинарском занятии и (если понадобится) на зачетной неделе.

#### СЕМЕСТРОВОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Для  $N$  квантовых осцилляторов найти зависимость средней энергии и теплоемкости от температуры.
2. Найти распределение вероятностей  $W_i$ , исходя из максимальности энтропии при  $\bar{\epsilon} = E$ .
3. Вычислить диэлектрическую проницаемость газа дипольных молекул. Рассмотреть случай сильных полей.
4. Вычислить теплоемкость ангармонического осциллятора.
5. Вычислить поправку в высокотемпературном разложении теплоемкости квантового ротатора.
1. Вычислить  $\bar{v}$  и  $\overline{v^2}$  для молекул, вылетающих из малого отверстия в банке с максвелловским распределением по скоростям.
2. Вычислить среднее сечение столкновений молекул, взаимодействующих по закону  $U(r) = \infty, r < d$ ;  $U(r) = -\alpha/r^6, r > d$ .
3. Выразить  $C_V$  через величины, легко измеримые для твердого тела.
4. Вычислить степень ионизации атомарного водорода.
5. Найти число столкновений со стенкой в электронном газе при  $T = 0$ .
6. Найти ток термоэлектронной эмиссии.
7. Вычислить спиновую парамагнитную восприимчивость электронного газа при  $T = 0$ .
8. Найти концентрации свободных носителей в собственном полупроводнике.
9. Оценить температуру на Солнце, исходя из равновесия на Земле.

## КУРС «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. СТАТФИЗИКА»

### ВАРИАНТЫ ОСНОВНЫХ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ

Ниже приводятся вопросы к экзамену по курсу «Статистическая физика». Каждый экзаменационный билет содержит два из перечисленных ниже вопроса. На подготовку к ответу студенту предоставляется один астрономический час. Кроме вопросов экзаменационного билета студенту предлагается ответить на ряд (как правило 2-3) дополнительных вопроса, уже не столь громоздких как основные.

1. Общие принципы статистической физики (динамическое и статистическое описание, фазовое пространство, функция распределения).
2. Теорема Лиувилля.
3. Принцип равных вероятностей и микроканоническое распределение.
4. Каноническое распределение Гиббса. Температура.
5. Распределение по энергии идеального газа как целого.
6. Энтропия для ансамблей. Второе начало термодинамики. Условия термодинамического равновесия.
7. Основное термодинамическое тождество. Работа и количество тепла, теплоемкость. Адиабатический процесс.
8. Термодинамические потенциалы. Термодинамические равенства для потенциалов. Экстремальные свойства термодинамических потенциалов.
9. Максимальная работа в круговом процессе. Цикл Карно.
10. Теорема Нернста (третье начало термодинамики).
11. Большое каноническое распределение Гиббса. Химический потенциал.
12. Зависимость термодинамических величин от числа частиц. Термодинамические равенства для системы с переменным числом частиц.
13. Термодинамические величины идеального классического одноатомного газа.
14. Распределение Максвелла и формула Больцмана. Вычисление средних.
15. Распределения Ферми и Бозе. Распределение Больцмана. Критерий вырождения.
16. Термодинамические величины ферми- и бозе –газов.
17. Слабо вырожденные ферми- и бозе –газы.
18. Вырожденный электронный газ (при температуре  $T=0$ ). Энергия Ферми. Уравнение состояния.
19. Теплоемкость вырожденного электронного газа
20. Вырожденный бозе-газ. Бозе-конденсация.
21. Равновесное излучение. Распределение Планка. Формула Планка. Излучение черного тела.
22. Равновесие в химических реакциях. Закон действующих масс.
23. Флуктуации термодинамических величин.