

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор института нано-, био-,
информационных, когнитивных
и социогуманитарных наук и
технологий**

П.А. Форш

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Статистическая физика
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и физического материаловедения
курс:	3
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: В.Г. Орлов, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и физического материаловедения 20.03.2020

Аннотация

Курс «Статистическая физика» является одним из курсов теоретической физики, ему предшествуют курсы по механике, теории поля, квантовой механике.

Основные разделы курса «Статистическая физика»:

1. Основы статистической термодинамики.
2. Идеальные газы, классические и квантовые.
3. Неидеальные квантовые газы.
4. Основы кинетической теории.

Первые два раздела курса содержат материал, входящий в стандартные курсы статистической физики. В частности, обосновывается необходимость введения вероятностного описания динамического состояния систем, содержащих большое число частиц. На основе метода ансамблей Гиббса вводятся основные распределения статистической теории: микроканоническое распределение, каноническое распределение Гиббса с постоянным числом частиц и распределение Гиббса с переменным числом частиц (большой канонический ансамбль). Для каждого из распределений приводится схема расчетов основных термодинамических величин, дается статистическое определение энтропии, решаются задачи, требующие вычислений статистических сумм и средних значений физических измеримых величин (идеальный одноатомный газ, термодинамические свойства двухуровневых систем, вращательная и колебательная теплоемкость газа из двухатомных молекул, теплоемкость орто- и параводорода).

Содержание третьего и четвертого разделов курса обусловлено необходимостью познакомить студентов ИНБИКСТ, проходящих практику в лабораториях НИЦ «Курчатовский институт», с экспериментальными фактами явления сверхпроводимости и основами феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау, а также с некоторыми подходами неравновесной статистической механики.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- познакомить студентов с закономерностями, имеющимися в макроскопических системах с большим числом частиц, как классических, так и квантовых, а также с методами, которые применяются в статистической физике для описания свойств таких систем. При этом системы из большого числа частиц будут рассматриваться, главным образом, в состоянии статистического равновесия. Небольшая часть курса будет посвящена изучению основ неравновесной статистической механики.

Задачи дисциплины

- научить студентов, исходя из микроскопической модели строения вещества, пользуясь методами статистической физики, рассчитывать свойства макроскопических систем, такие как уравнение состояния, теплоемкость, магнитная и диэлектрические восприимчивости и другие.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научной, технической и (или) иной информации	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности

обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные распределения в статистической термодинамике классических и квантовых систем, содержащих большое число частиц: микроканоническое распределение, каноническое распределение Гиббса с постоянным числом частиц и распределение Гиббса с переменным числом частиц, а также условия, при которых реализуются данные распределения;
- статистические определения энтропии для микроканонического и канонического распределений;
- основные термодинамические неравенства;
- определения химического потенциала в системах с переменным числом частиц для различных термодинамических потенциалов;
- критерии вырождения и идеальности ферми-газа,
- основные особенности явления бозе-конденсации в идеальном бозе-газе;
- условия, при которых ферми- и бозе-статистики переходят в больцмановскую статистику;
- симметричные свойства волновых функций систем тождественных частиц, описываемых ферми- и бозе-статистиками;
- особенности подхода к описанию свойств квантовых систем взаимодействующих частиц с помощью языка квазичастиц;
- общие представления о микроскопической теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера;
- основные положения теории фазовых переходов Прода Ландау на примере феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау;
- общие представления о стационарном и нестационарном эффектах Джозефсона и их применении для создания сверхпроводящих квантовых интерферометров;
- особенности подхода к описанию неравновесных процессов с помощью кинетического уравнения Больцмана и уравнения кинетического баланса Паули.

уметь:

- находить средние значения физических измеряемых величин с помощью функции распределения в классической статистике и с помощью матрицы плотности в квантовой статистике;
- вычислять статистические суммы для идеального одноатомного газа, газа двухатомных молекул, идеальных квантовых ферми- и бозе-газов;
- находить температурную зависимость колебательной и вращательной теплоемкостей двухатомного газа молекул, состоящих как из разных, так и из одинаковых атомов;
- выводить термодинамические соотношения для двухуровневых систем;
- вычислять флуктуации физических измеряемых величин в термодинамической теории флуктуаций;
- находить выражения для свободной энергии, химического потенциала, энергии, теплоемкости, уравнения состояния идеального классического Больцмановского газа и идеальных квантовых ферми- и бозе-газов;
- находить температурную зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости классического идеального газа магнитных диполей и квантового газа атомов, имеющих орбитальный и спиновый моменты;
- вычислять парамагнитную и диамагнитную восприимчивости идеального электронного ферми-газа;
- находить температурную зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости ферромагнетика в модели Изинга в приближении метода самосогласованного поля;
- находить температурную зависимость колебательной теплоемкости кристаллической решетки в модели Дебая;
- описывать термодинамические свойства сверхпроводящего состояния в модели Гинзбурга-Ландау;
- находить величины термодинамического критического магнитного поля для сверхпроводников I рода и величины нижнего и верхнего критических магнитных полей в сверхпроводниках II рода;
- вычислять в $\hbar\omega \ll kT$ -приближении кинетические коэффициенты вырожденного электронного газа в металле;
- решать уравнение кинетического баланса Паули для двухуровневой и n-уровневой системы.

владеть:

- основными методами статистической физики – методом ансамблей Гиббса;
- методом вычисления средних величин с помощью матрицы плотности;
- методом вторичного квантования;
- методом функционала Гинзбурга-Ландау для феноменологического описания фазовых переходов второго рода на примере сверхпроводящего перехода;
- методом самосогласованного поля для систем взаимодействующих частиц;
- простейшими методами описания неравновесных явлений с помощью кинетического уравнения Больцмана и уравнения кинетического баланса Паули.

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

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

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Идеальные газы.	8	8		5
2	Неидеальные квантовые газы.	8	8		15
3	Основы кинетической теории.	6	6		15
4	Основы статистической термодинамики.	8	8		10
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	135 час., 3 зач.ед.
--------------------	---------------------

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

Семестр: 6 (Весенний)

1. Идеальные газы.

Идеальный одноатомный газ. Распределение Максвелла–Больцмана. Термодинамические свойства двухуровневых систем. Внутренние степени свободы атомов и молекул.

Вращательная и колебательная теплоемкость газа из двухатомных молекул. Влияние спинов ядер на температурную зависимость теплоемкости орто- и параводорода. Закон равнораспределения.

Большой статистический ансамбль для ферми- и бозе-газа. Распределение Ферми–Дирака и Бозе–Эйнштейна. Переход к распределению Больцмана.

Симметрия волновых функций систем, состоящих из большого количества тождественных частиц. Метод вторичного квантования. Вырожденный идеальный ферми-газ. Химический потенциал, плотность состояний на поверхности Ферми, теплоемкость электронов в металле. Уравнение состояния, случай низких температур, высоких плотностей и высоких температур, малых плотностей. Парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау.

Конденсация Бозе–Эйнштейна. Химический потенциал, теплоемкость и уравнение состояния идеального бозе-газа. Фононы и модель Дебая.

2. Неидеальные квантовые газы.

Гипотеза квазичастиц. Элементарные возбуждения в идеальном ферми-газе. Неидеальный ферми-газ со слабым притяжением. Задача Купера о связанном состоянии двух электронов над ферми-поверхностью. Гамильтониан модели Бардина–Купера–Шриффера и спектр возбуждений в сверхпроводниках. Функция распределения частиц по состояниям. Скачок теплоемкости и термодинамическое критическое поле в феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау. Параметр порядка, флуктуации параметра порядка. Ограничения на применимость теории фазовых переходов II рода Ландау. Квантование магнитного потока в сверхпроводниках. Сверхпроводники I и II рода. Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона. Сверхпроводящие квантовые интерферометры.

3. Основы кинетической теории.

Кинетика больцмановского газа. Функция распределения. Уравнение переноса Больцмана и область его применимости. H-теорема Больцмана, парадоксы "обратимости" и "возврата". Уравнение Больцмана в \hbar -приближении и без учета столкновений. Уравнение Власова–Ландау. Кинетические коэффициенты металла.

Феноменологическое описание неравновесных процессов. Принцип симметрии кинетических коэффициентов Онсагера. Уравнение кинетического баланса Паули.

4. Основы статистической термодинамики.

Вероятностное описание динамического состояния систем, содержащих большое число частиц. Метод ансамблей. Функция распределения и равновесная матрица плотности. Микроканоническое распределение. Статистическое определение энтропии. Вывод термодинамических соотношений в микроканоническом распределении.

Каноническое распределение Гиббса. Статистическая сумма. Вычисление основных термодинамических величин, термодинамические потенциалы. Флуктуации энергии в каноническом распределении. Эквивалентность канонического и микроканонического ансамблей.

Системы с переменным числом частиц, большой канонический ансамбль. Флуктуации числа частиц, эквивалентность большого канонического ансамбля и канонического ансамбля. Термодинамические неравенства. Термодинамическая теория флуктуаций.

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

учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010 .— 616 с.
2. Физическая кинетика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский .— М. : Наука, 1979 .— 528 с.

Фонд литературы кафедры

3. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Часть 2. Теория конденсированного состояния. — М.: Физматлит, 2004.— 496 с.

Дополнительная литература

1. Статистическая механика : Современный курс с задачами и решениями [Текст] = Statistical mechanics : [учеб. пособие для вузов] / Р. Кубо ; сост. при участии Х. Ичимура, Ц. Усуи, Н. Хасизуме ; пер. с англ. под ред. Д. Н.Зубарева .— М : Мир, 1967 .— 452 с.
2. Введение в современную статистическую физику [Текст] : курс лекций для вузов / Р. О. Зайцев .— 4-е изд., испр. и сущ. доп. — М. : ЛИБРОКОМ, 2013 .— 504 с.

Фонд литературы кафедры

3. Хуанг К. Статистическая механика. — М.: Мир, 1966. — 521 с.

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

1. <http://lib.mipt.ru>— электронная библиотека Физтех.
2. <http://www.Sci-lib.com> — Большая научная библиотека.
3. <http://physics.nglib.ru/catalog.jsp?rubric=14>— литература по физике в электронной Библиотеке Технической Литературы «Нефть и Газ».
4. <http://arXiv.org>— CornellUniversityLibrary — Библиотека Корнельского Университета, электронный ресурс arXiv.

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

На лекционных занятиях демонстрируются презентации с помощью мультимедийных технологий.

В процессе самостоятельной работы обучающиеся могут использовать программные средства MATLAB, Mathcad, WolframMathematica.

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

Для успешного освоения курса, помимо посещения лекций и семинаров, от студентов требуется самостоятельная работа. В основном, это время отводится на самостоятельное решение задач, входящих в два задания. Самостоятельные занятия включают в себя также повторение материала лекций, семинарских занятий и подготовку к промежуточным тестированиям, которые проводятся для текущего контроля за усвоением материала. Всего предполагается провести за семестр 4 теста, выполнить итоговую контрольную работу по решению задач в конце семестра и защитить каждое из двух самостоятельно выполненных заданий. Студенты, успешно прошедшие все формы промежуточного контроля, допускаются к сдаче экзамена по дисциплине.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и физического материаловедения
курс:	3
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	В.Г. Орлов, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Статистическая физика» обучающийся должен:

знать:

- основные распределения в статистической термодинамике классических и квантовых систем, содержащих большое число частиц: микроканоническое распределение, каноническое распределение Гиббса с постоянным числом частиц и распределение Гиббса с переменным числом частиц, а также условия, при которых реализуются данные распределения;
- статистические определения энтропии для микроканонического и канонического распределений;
- основные термодинамические неравенства;
- определения химического потенциала в системах с переменным числом частиц для различных термодинамических потенциалов;
- критерии вырождения и идеальности ферми-газа,
- основные особенности явления бозе-конденсации в идеальном бозе-газе;
- условия, при которых ферми- и бозе-статистики переходят в больцмановскую статистику;
- симметричные свойства волновых функций систем тождественных частиц, описываемых ферми- и бозе-статистиками;
- особенности подхода к описанию свойств квантовых систем взаимодействующих частиц с помощью языка квазичастиц;
- общие представления о микроскопической теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера;
- основные положения теории фазовых переходов Прода Ландау на примере феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау;
- общие представления о стационарном и нестационарном эффектах Джозефсона и их применении для создания сверхпроводящих квантовых интерферометров;
- особенности подхода к описанию неравновесных процессов с помощью кинетического уравнения Больцмана и уравнения кинетического баланса Паули.

уметь:

- находить средние значения физических измеряемых величин с помощью функции распределения в классической статистике и с помощью матрицы плотности в квантовой статистике;
- вычислять статистические суммы для идеального одноатомного газа, газа двухатомных молекул, идеальных квантовых ферми- и бозе-газов;
- находить температурную зависимость колебательной и вращательной теплоемкостей двухатомного газа молекул, состоящих как из разных, так и из одинаковых атомов;
- выводить термодинамические соотношения для двухуровневых систем;
- вычислять флуктуации физических измеряемых величин в термодинамической теории флуктуаций;
- находить выражения для свободной энергии, химического потенциала, энергии, теплоемкости, уравнения состояния идеального классического Больцмановского газа и идеальных квантовых ферми- и бозе-газов;
- находить температурную зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости классического идеального газа магнитных диполей и квантового газа атомов, имеющих орбитальный и спиновый моменты;
- вычислять парамагнитную и диамагнитную восприимчивости идеального электронного ферми-газа;
- находить температурную зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости ферромагнетика в модели Изинга в приближении метода самосогласованного поля;
- находить температурную зависимость колебательной теплоемкости кристаллической решетки в модели Дебая;
- описывать термодинамические свойства сверхпроводящего состояния в модели Гинзбурга-Ландау;
- находить величины термодинамического критического магнитного поля для сверхпроводников I рода и величины нижнего и верхнего критических магнитных полей в сверхпроводниках II рода;
- вычислять в $\hbar \omega \ll kT$ -приближении кинетические коэффициенты вырожденного электронного газа в металле;
- решать уравнение кинетического баланса Паули для двухуровневой и n-уровневой системы.

владеть:

- основными методами статистической физики – методом ансамблей Гиббса;
- методом вычисления средних величин с помощью матрицы плотности;
- методом вторичного квантования;
- методом функционала Гинзбурга-Ландау для феноменологического описания фазовых переходов второго рода на примере сверхпроводящего перехода;
- методом самосогласованного поля для систем взаимодействующих частиц;
- простейшими методами описания неравновесных явлений с помощью кинетического уравнения Больцмана и уравнения кинетического баланса Паули.

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

В целях текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущих занятий по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Промежуточная аттестация по дисциплине «Статистическая физика» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Примерный перечень вопросов в тестах

1. Условия, при которых реализуется микроканоническое распределение. Явный вид функции распределения для микроканонического распределения в классической статистике.
2. Написать выражение для среднего значения физической измеримой величины, записанное с помощью функции распределения в классической статистике.
3. Написать выражение для оператора плотности и матрицы плотности.
4. Написать выражение для среднего значения физической измеримой величины, записанное с помощью матрицы плотности в квантовой статистике.
5. Условия, при которых реализуется микроканоническое распределение. Явный вид матрицы плотности для микроканонического распределения в квантовой статистике.
6. Написать выражение для числа квазиклассических состояний с энергией, меньшей или равной E , для замкнутой системы с N частицами, находящимися в объеме V .
7. Статистическое определение энтропии для микроканонического распределения.
8. Написать выражения для температуры и давления в условиях, когда реализуется микроканоническое распределение.
9. Условия, при которых реализуется распределение Гиббса с постоянным числом частиц (каноническое распределение). Явный вид функции распределения для канонического распределения в классической статистике.
10. Написать выражения для статистического интеграла, свободной энергии и энтропии в условиях, когда реализуется распределение Гиббса с постоянным числом частиц.
11. Условия, при которых реализуется распределение Гиббса с постоянным числом частиц (каноническое распределение). Явный вид матрицы плотности для канонического распределения в квантовой статистике. Написать выражение для среднего значения физической измеримой величины в распределении Гиббса с постоянным числом частиц для квантовой статистики.
12. Написать выражения для дифференциалов внутренней энергии и свободной энергии, если в системе число частиц переменное. Дать определение химического потенциала, исходя из выражений для вышеупомянутых дифференциалов.
13. Написать выражения для дифференциалов энтальпии и термодинамического потенциала, если в системе число частиц переменное. Дать определение химического потенциала, исходя из выражений для вышеупомянутых дифференциалов.
14. Написать выражения для функции распределения Гиббса с переменным числом частиц, статистической суммы и Ω -потенциала в классической статистике.
15. Дать определение Ω -потенциала. Написать выражение для дифференциала Ω -потенциала.
16. Написать выражения для матрицы плотности в распределении Гиббса с переменным числом частиц, статистической суммы и Ω -потенциала в квантовой статистике.

17. Написать выражение для среднего значения физически измеримой величины в квантовой статистике для случая, когда реализуется распределение Гиббса с переменным числом частиц.
18. Написать выражения для статистической суммы, Ω -потенциала и функции распределения частиц по состояниям для идеального Ферми-газа.
19. Написать выражения для статистической суммы, Ω -потенциала и функции распределения частиц по состояниям для идеального Бозе-газа.
20. Написать выражения для энергии Ферми и условия вырождения для идеального Ферми-газа.
21. Написать выражение для плотности состояний на Ферми-поверхности для идеального Ферми-газа.
22. Написать формулу для температурной зависимости химического потенциала идеального ферми-газа в области температур, малых по сравнению с энергией Ферми.
23. Нарисовать на графике температурную зависимость химического потенциала идеального ферми-газа.
24. Написать формулу для температурной зависимости теплоемкости идеального ферми-газа в области температур, малых по сравнению с энергией Ферми.
25. Нарисовать график температурной зависимости теплоемкости идеального ферми-газа в широком температурном интервале.
26. Написать формулу для зависимости давления от объема идеального ферми-газа в области температур, малых по сравнению с энергией Ферми.
27. Нарисовать график зависимости давления от объема при фиксированной температуре (изотерму) для идеального ферми-газа.
28. Написать выражение для температуры бозе-конденсации для идеального бозе-газа.
29. Нарисовать на графике температурную зависимость химического потенциала идеального бозе-газа.
30. Нарисовать график температурной зависимости теплоемкости идеального бозе-газа в широком температурном интервале.
31. Нарисовать график зависимости давления от объема при фиксированной температуре (изотерму) для идеального бозе-газа.

Примерный перечень контрольных вопросов в билетах.

1. Микроканоническое распределение (классическое и квантовое), термодинамика классического идеального газа. Статистическое определение энтропии.
2. Матрица плотности, микроканонический и канонический квантовые ансамбли систем.
3. Каноническое распределение Гиббса (распределение Гиббса с постоянным числом частиц), переход к микроканоническому распределению в пределе $N \gg 1$. Статсумма. Вычисление средних значений термодинамических величин.
4. Термодинамические потенциалы в системах с переменным числом частиц. Химический потенциал.
5. Флуктуации энергии, термодинамические неравенства.
6. Классический идеальный газ. Статсумма, свободная энергия, теплоемкость, уравнение состояния.
7. Распределение Гиббса с переменным числом частиц. Большая статсумма.
8. Теплоемкость колебаний кристаллической решетки в модели Дебая.
9. Ферми и бозе-газы с переменным числом частиц, статистические суммы, Ω -потенциалы, функции распределения.
10. Термодинамика вырожденного ферми-газа: химический потенциал, энергия, теплоемкость, уравнение состояния. Критерии вырождения и идеальности ферми-газа.

11. Идеальный бозе-газ, конденсация Бозе-Эйнштейна. Термодинамика идеального бозе-газа: химический потенциал, энергия, теплоемкость, давление, уравнение состояния.
12. Задача Купера о связанном состоянии двух взаимодействующих электронов, находящихся вблизи поверхности Ферми. Длина когерентности.
13. Феноменологическая теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау. Параметр порядка, энтропия, скачок теплоемкости, термодинамическое критическое поле.
14. Феноменологическая теория сверхпроводимости. Уравнения Гинзбурга-Ландау.
15. Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник, параметр Гинзбурга-Ландау, сверхпроводники I и II рода.
16. Квантование магнитного потока в сверхпроводниках.
17. Стационарный и нестационарный эффекты Джозефсона.
18. Кинетическое уравнение Больцмана, уравнение Власова-Ландау, τ -приближение.
19. Уравнение кинетического баланса Паули, его свойства (нормировка вероятности, поведение энтропии, спектр).

Примерный перечень задач в контрольных заданиях.

Задание № 1.

1. Система состоит из N независимых частиц, каждая из которых может находиться в одном из двух квантовых состояний с энергиями 0 и ε . Определить энтропию S состояния системы с энергией $E = n\varepsilon$ ($N \gg n \gg 1$). Определить понятие температуры. Найти равновесную долю частиц в состоянии с энергией ε при температуре T и поведение энтропии при $T \rightarrow 0$.
2. N молекул идеального газа находятся в объеме V . Определить вероятность того, что в объеме $v < V$ находятся n молекул. Получить приближенное выражение, когда $v \ll V$ (распределение Пуассона). Найти среднее число частиц n в объеме v , его среднюю абсолютную и относительную флуктуации. Найти вид распределения в случае $v \ll V$, $n \gg 1$ (распределение Гаусса).
3. Найти число состояний с энергией $\leq E$ для замкнутой классической системы с N частицами, находящимися в объеме V . Рассмотреть схему вычисления термодинамических функций для микроканонического распределения на примере этой системы.
4. На примере системы, состоящей из N молекул идеального газа, показать, что каноническое распределение Гиббса по энергиям в пределе $N \gg 1$ переходит в микроканоническое распределение.
5. Классический идеальный газ магнитных диполей μ находится в магнитном поле H при температуре T . Найти намагниченность $M(T)$ и магнитную восприимчивость $\chi(T)$.
6. Газ атомов с моментом J , спином S и орбитальным моментом L помещен в слабое магнитное поле H , температура и расщепление в магнитном поле малы по сравнению с интервалом тонкой структуры. Найти χ и исследовать случаи: а) расщепление в магнитном поле $\gg T$; б) расщепление в магнитном поле $\ll T$.
7. Гамильтониан ферромагнетика в модели Изинга имеет вид $\hat{H} = \sum_i \mu H s_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} V_{ij} s_i s_j$, где переменные s_i принимают значения ± 1 , индексы i, j нумеруют узлы кристаллической решетки. В приближении самосогласованного поля определить точку фазового перехода T_c и температурную зависимость магнитной восприимчивости χ и спонтанной намагниченности вблизи T_c .
8. Определить $C_p - C_v$ в переменных: а) V, T ; б) P, T . Определить $C_p - C_v$ для: а) идеального бальмановского газа, б) газа Ван-дер-Ваальса, в) идеального вырожденного ферми-газа при $T \rightarrow 0$, г) фотонного газа.

9. Найти колебательную и вращательную теплоемкости двухатомных молекул, составленных из разных атомов. Сравнить колебательную и вращательную постоянные. Исследовать случаи низких и высоких температур.
10. Найти температурную зависимость вращательной теплоемкости молекул пара- и ортоводорода.
11. Найти: а) флуктуации (ΔS^2) , (ΔP^2) , (ΔE^2) , $(\Delta S \Delta P)$, $(\Delta V \Delta P)$, $(\Delta S \Delta T)$; б) флуктуации плотности $n = N/V$.

Задание № 2

1. Считая He^4 идеальным бозе-газом, вычислить его химический потенциал при нормальных условиях ($T=273 \text{ К}$, $P=1 \text{ атм}$). Полагая плотность газа n равной плотности жидкого гелия He^4 , $n = 0.022 \text{ (А)}^{-3}$, оценить температуру T , при которой становятся существенными квантовые эффекты.
2. Построить изотермы идеальных ферми- и бозе-газов. Качественно рассмотреть переход к больцмановскому случаю.
3. Найти спиновую магнитную восприимчивость вырожденного электронного газа (парамагнетизм Паули свободных электронов в металле) при условии, что $\mu H \ll \epsilon_F$ (μ - магнитный момент электрона). Найти поправочный член к этой формуле для температур, отличных от нуля, но малых по сравнению с энергией Ферми.
4. Найти диамагнитную восприимчивость газа свободных электронов (диамагнетизм Ландау) в классическом $T \gg \epsilon_F$ и квантовом $\epsilon_F \gg T \gg \mu H$ пределах.
5. В модели Гинзбурга-Ландау найти температурную зависимость теплоемкости вблизи точки сверхпроводящего перехода, скачок теплоемкости и термодинамическое критическое поле H_c для сверхпроводников I рода.
6. Найти величины нижнего H_{c1} и верхнего H_{c2} критических магнитных полей в сверхпроводниках II рода.
7. Найти критическое магнитное поле и критический ток тонкой сверхпроводящей пленки в теории Лондонов.
8. Найти полный ток через два параллельно соединенных туннельных барьера как функцию от приложенного внешнего магнитного поля.
9. В τ -приближении найти проводимость и теплопроводность вырожденного электронного газа в металле.
10. Решить уравнение кинетического баланса Паули для n -уровневой системы с начальным распределением вероятностей $w_1(0) = 1$, $w_k(0) = 0$ ($k=2, 3, \dots, n$), считая, что все вероятности переходов между различными состояниями одинаковы $P_{ij} = p$ (полагаем, что $n \gg 1$, но произведение np конечно).

4. Критерии оценивания

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач,

		свободное и правильное обоснование принятых решений.
	9	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	8	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.
хорошо	7	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.
	6	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.
	5	Выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.
удовлетворительно	4	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.
	3	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

неудовлетворительно	2	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.
	1	Выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется не менее 40 минут на подготовку. Опрос по билету и ответы на дополнительные вопросы не должен превышать двух астрономических часов. По завершении отведенного на опрос времени, экзаменатор должен выставить обучающемуся оценку в соответствии с вышеприведенными критериями.