

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физическая кинетика
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика и педагогика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (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: 4

Программу составил: Н.М. Щелкачев, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики им. Л.Д. Ландау 23.05.2020

## Аннотация

Значительные успехи в теоретической физике, достигнутые в конце 20го и в начале 21 века, привели к необходимости значительной перестройки курса кинетики, читаемого в Московском физико-техническом институте. В связи с этим в курс включены разделы, посвящённые теории случайных процессов. Показана тесная взаимосвязь физической кинетики и теории марковских цепей. Значительное время отведено квантовой теории открытых систем. Помимо традиционных вопросов, таких как флуктуационно диссипативная теорема, теория линейного отклика, излагается также подход Линдблада, позволяющий написать квантовое уравнение на редуцированную матрицу плотности открытой системы в марковском приближении. В курсе детально обсуждается переход от квантовой теории открытых систем к классической. Большое внимание уделяется так называемым Н-теоремам, как в классическом, так и в квантовом пределе. Подробно обсуждается вопрос, в каких случаях энтропия возрастает, а в каких нет, при рассмотрении открытых систем. Для лучшего усвоения лекционного материала студенты должны выполнить самостоятельно упражнения и ряд задач. Наиболее трудная часть задания обсуждается на семинарах и лекциях.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать студентам знания, необходимые для описания различных физических явлений в области приложений классической и квантовой статистической физики, и методы построения соответствующих математических моделей. Показать соответствие системы постулатов, положенных в основу статистической физики, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной в области её применимости. Дать навыки, позволяющие понять адекватность теоретической модели соответствующему физическому явлению и определить пределы её применимости.

### Задачи дисциплины

- Изучение математического аппарата как классической, так и квантовой статистической физики;
- изучение методов решения задач как классической, так и квантовой статистической физики;
- изучение методов описания макроскопических систем частиц и их термодинамических свойств, в том числе систем, взаимодействующих с внешними полями;
- овладение студентами методов классической и квантовой статистической физики для описания свойств различных конкретных физических систем.

## 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
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- Постулаты и принципы как классической, так и квантовой неравновесной статистической физики, методы описания макроскопических систем частиц различной природы;
- основные методы математического аппарата систем многих частиц, включая формализм чисел заполнения (метод вторичного квантования) и метод статистического усреднения операторов;
- основные методы решения задач классической и квантовой неравновесной статистической физики идеальных систем, включая вычисление кинетических коэффициентов и времён релаксации;
- основные методы решения задач о неравновесных квантовых слабонеидеальных систем, включая неравновесные уравнения Гинзбурга-Ландау;
- методы описания свойств самоорганизующихся систем, включая теорию математическую теорию борьбы за существование.

уметь:

Применять постулаты и принципы неравновесной статистической физики для описания конкретных макроскопических систем;

пользоваться аппаратом вторичного квантования и методом статистического усреднения операторов для решения задач квантовых систем многих частиц;

использовать основные методы классической и квантовой неравновесной статистической физики идеальных систем и слабонеидеальных для постановки и решения реальных задач;

применять методы описания теории сосуществования нескольких видов в условиях их борьбы за выживание.

владеть:

Основными методами математического аппарата как классической, так и квантовой статистической физики;

навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами макроскопических систем различной природы, так и с их неравновесными свойствами.

#### 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	Математический аппарат	4	4		5
2	Броуновское движение.	4	2		5
3	Кинетика электронов. Кинетическое уравнение Больцмана в тау-приближении. Интеграл столкновений при рассеянии электронов на примесях в металле.	4	4		5
4	Кинетика газов и жидкости. Кинетическое уравнение Больцмана для одноатомных газов.	4	4		5
5	Кинетика фононов. Кинетическое уравнение для фононов.	4	2		5
6	Плазма. Уравнения Власова	2	4		5
7	Квантовая кинетика	4	4		5
8	Кинетика зародышеобразования	2	2		5
9	Неупорядоченные среды	2	4		5
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: 8 (Весенний)

##### 1. Математический аппарат

Случайные процессы. Марковские цепи. Пропагатор. Уравнения Эйнштейна-Колмогорова. Численные алгоритмы Монте-Карло.

##### 2. Броуновское движение.

Уравнение Ланжевена броуновской частицы. Случайные силы. Корреляторы. Среднеквадратичное смещение в классическом и квантовом пределе. Соотношение Эйнштейна.

##### 3. Кинетика электронов. Кинетическое уравнение Больцмана в тау-приближении. Интеграл столкновений при рассеянии электронов на примесях в металле.

Вычисление остаточного сопротивления. Термоэлектрические явления в металле и полупроводнике, диссипативная функция Рэлея, симметрия кинетических коэффициентов. Электрон-электронные столкновения и их вклад в сопротивление металла. Интеграл столкновений при рассеянии электронов в металле на фононах в приближении Блоха и зависимость электросопротивления и теплопроводности от температуры. Тензор электропроводности металла в магнитном поле. Эффект Холла.

##### 4. Кинетика газов и жидкости. Кинетическое уравнение Больцмана для одноатомных газов.

Свойства интеграла столкновений. Вывод уравнений гидродинамики. Законы сохранения и потоки энергии, энтропии. Тензор плотности потока импульса. Равновесное и локально-равновесное распределение. Условие применимости гидродинамики. Теплопроводность и вязкость. Поглощение звука.

##### 5. Кинетика фононов. Кинетическое уравнение для фононов.

Теплопроводность диэлектрика в тау-приближении. Процессы переброса. Рассеяние фононов на дефектах решетки. Рассеяние фононов на границах диэлектрика. Температурное поведение теплопроводности в диэлектрике.

##### 6. Плазма. Уравнения Власова

Бесстолкновительная плазма. Диэлектрическая проницаемость. Затухание Ландау. Спектр плазмонов.

##### 7. Квантовая кинетика

Неравновесная матрица плотности. Квантовое уравнение Лиувилля. Уравнения Линдблада. Теория линейного отклика Кубо. Запаздывающая, причинная и опережающая функции Грина. Вывод кинетического уравнения для электронов, рассеивающихся на примесях.

##### 8. Кинетика зародышеобразования

Фазовые переходы первого рода. Метастабильные состояния и зародыши новой фазы. Классическая и квантовая кинетика образования зародышей.

## 9. Неупорядоченные среды

Прыжковая проводимость Мотта в полупроводниках. Кулоновская щель и закон Шкловского–Эфроса. Слабая локализация. Теория протекания. Критерий локализации Андерсона.

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

- а) Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: стандартная учебная аудитория. Желательно также применение мультимедийного оборудования (проектор), для лучшей организации лекции.
- б) Необходимое программное обеспечение: не требуется
- в) Обеспечение самостоятельной работы: наличие учебников и задачников по курсу теоретической физики вообще и статистической физике в частности в библиотеке института, доступ в Интернет для получения вспомогательного учебного и консультативного материала на сайте кафедры теоретической физики.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

- 1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 10 : Физическая кинетика : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 2-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2007 .— 536 с.
- 2. 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.
- 3. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 9, Ч. 2 : Статистическая физика. Теория конденсированного состояния : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Физматлит, 2000-2005 .— 496 с.
- 4. Лекции по статистической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. А. Максимов, А. В. Михеенков, И. Я. Полищук ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., испр. — М. : МФТИ, 2015 .— 320 с.

### Дополнительная литература

- 1. Введение в современную статистическую физику [Текст] : курс лекций для вузов / Р. О. Зайцев .— 2-е изд., испр. — М. : Едиториал УРСС, 2006 .— 400 с.

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

Не используются

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

Ссылка страницы кафедры на официальном сайте университета  
[http://mipt.ru/education/chair/theoretical\\_physics//](http://mipt.ru/education/chair/theoretical_physics//)

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

Знания студентов оцениваются в результате проведения еженедельного опроса пройденного материала. Вопросы, включенные в тестовые опросы, охватывают основные понятия, рассмотренные на предыдущей лекции.

Опрос проводится в письменной форме в виде тестовых вопросов.

Умения и навыки студентов определяются по итогам сдачи домашних заданий. Всего студентам предлагается два домашних задания в семестр. Задание содержит три типа задач и упражнений. Типовые задачи и упражнения разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Кроме того, студентам предлагаются специально помеченные задачи повышенной сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

Навыки студентов проверяются в результате решения контрольных работ, которые проводятся во время аудиторных занятий. Задачи аналогичны типовым задачам, включенным в домашние задания, как рассмотренных на семинарских (практических) занятиях, так и предлагаемых для самостоятельного решения. Задания контрольных работ оценены в определенную сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов.

Конкретные условия набора баллов за работу в семестре могут зависеть от лекционного потока и определяются лектором. Общим остается следующее правило.

В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам тестовых опросов (например, 50 баллов), по результатам сдачи двух заданий (например, 80 баллов) и по результатам двух контрольных (например, 100 баллов). Кроме того, за решение задач повышенной сложности домашнего задания студент может набрать премиальные (бонусные) баллы по двум заданиям (например, 30 баллов). Полный балл оценивается в данном случае суммой 230 баллов. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Физика и педагогика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
**курс:** 4  
**квалификация:** бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Н.М. Щелкачев, 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
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физическая кинетика» обучающийся должен:

### знать:

- Постулаты и принципы как классической, так и квантовой неравновесной статистической физики, методы описания макроскопических систем частиц различной природы;
- основные методы математического аппарата систем многих частиц, включая формализм чисел заполнения (метод вторичного квантования) и метод статистического усреднения операторов;
- основные методы решения задач классической и квантовой неравновесной статистической физики идеальных систем, включая вычисление кинетических коэффициентов и времён релаксации;
- основные методы решения задач о неравновесных квантовых слабонеидеальных систем, включая неравновесные уравнения Гинзбурга-Ландау;
- методы описания свойств самоорганизующихся систем, включая теорию математическую теорию борьбы за существование.

### уметь:

Применять постулаты и принципы неравновесной статистической физики для описания конкретных макроскопических систем;  
пользоваться аппаратом вторичного квантования и методом статистического усреднения операторов для решения задач квантовых систем многих частиц;  
использовать основные методы классической и квантовой неравновесной статистической физики идеальных систем и слабонеидеальных для постановки и решения реальных задач;  
применять методы описания теории сосуществования нескольких видов в условиях их борьбы за выживание.

### владеть:

Основными методами математического аппарата как классической, так и квантовой статистической физики;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных как со свойствами макроскопических систем различной природы, так и с их неравновесными свойствами.

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



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

Допуск к экзамену проводится преподавателем по итогам работы студента в семестре в случае успешного освоения дисциплины. В случае если студент не усвоил дисциплину, и результаты его работы в семестре оказались неудовлетворительными, проводится дополнительный опрос на предмет выявления знаний. Дополнительный опрос проводится в виде тестов, содержание которых полностью соответствует содержанию тестовых опросов студентов в течение семестра.

Оценка уровня студентов для допуска к экзамену складывается из оценок трех позиций: знаний, умений и навыков.

**Знания** студентов оцениваются в результате проведения еженедельного опроса пройденного материала. Вопросы, включенные в тестовые опросы, охватывают основные понятия, рассмотренные на предыдущей лекции.

Опрос проводится в письменной форме в виде тестовых вопросов.

**Умения** и навыки студентов определяются по итогам сдачи домашних заданий. Всего студентам предлагается два домашних задания в семестр. Задание содержит три типа задач и упражнений. Типовые задачи и упражнения разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Кроме того, студентам предлагаются специально помеченные задачи повышенной сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

**Навыки** студентов проверяются в результате решения контрольных работ, которые проводятся во время аудиторных занятий. Задачи аналогичны типовым задачам, включенным в домашние задания, как рассмотренных на семинарских (практических) занятиях, так и предлагаемых для самостоятельного решения. Задания контрольных работ оценены в определенную сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов.

Конкретные условия набора баллов за работу в семестре могут зависеть от лекционного потока и определяются лектором. Общим остается следующее правило.

В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам тестовых опросов (например, 50 баллов), по результатам сдачи двух заданий (например, 80 баллов) и по результатам двух контрольных (например, 100 баллов). Кроме того, за решение задач повышенной сложности домашнего задания студент может набрать премиальные (бонусные) баллы по двум заданиям (например, 30 баллов). Полный балл оценивается в данном случае суммой 230 баллов. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

#### **4а. Типовые контрольные задания, используемых для оценки знаний, умений, навыков:**

1. Определить коэффициенты теплопроводности и вязкости больцмановского газа, используя простейшее  $\tau$ -приближение. Определить их температурные зависимости.
2. Определить температурную зависимость скорости разреженного Ферми-газа.

3. Вычислить продольную и поперечную диэлектрическую проницаемость максвелловской плазмы, используя уравнения Власова и простейшее  $\tau$ -приближение.
  4. Оценить температурную зависимость коэффициентов нестационарного уравнения Гинзбурга—Ландау.
  5. Определить асимптотический вид решений уравнений сосуществования двух видов.
- Итоговая экзаменационная оценка выставляется студенту с учетом оценки его работы в семестре.

Экзамен проводится в устной форме. Экзаменационные билеты могут содержать наряду с теоретическими вопросами, также и типовые задачи. Форма билета определяется лектором и зависит от лекционного потока.

Традиционная форма билета содержит 2 теоретических вопроса и одну типовую задачу. Ответ студента оценивается по 10-балльной шкале.

Билеты также могут состоять из 3 – 5 относительно простых вопросов и вопроса (вопросов) повышенной сложности. Простые вопросы оценивают уровень знаний. Сложные вопросы оценивают уровень умений и навыков.

Пример билета с вопросами разного уровня:

1.  $H$ -теорема Больцмана.. Интенсивность источников энтропии.
2. Электрон-фононное взаимодействие и кинетическое уравнение для электронов и фононов в металле.
3. Кинетическое уравнение для фононов в диэлектрике и вычисление скорости второго звука.
4. Определение амплитуды тока Джозефсона с помощью квантовой формулы Кубо.
5. Записать уравнение скорости релаксации спина примеси, помещённого в металлическую матрицу.

#### 4б. Критерии оценивания

Студенты, получившие за работу в семестре к началу экзаменационной сессии оценку «неудовлетворительно» (менее 30% усвоения материала), считаются не усвоившими материал и не выполнившими задания курса, поэтому к экзамену не допускаются.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со схемой:

Оценка	Баллы	Критерии
Отлично	10	10 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8. 9 баллов за экзамен и 10 баллов за работу в семестре
	9	9 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8.
	8	8 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 6. 7 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре

Хорошо	7	7 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5. 6 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре
	6	6 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5. 5 баллов за экзамен и более 7 баллов за работу в семестре
	5	5 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.
удовлетворительно	4	4 балла за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.
	3	3 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.
неудовлетворительно	2	2 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.
	1	1 балл за экзамен и оценка за работу в семестре 3.

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

Студенты, допущенные к экзамену, отвечают на вопросы билета, имея возможность на подготовку не менее 1 часа. Ответы представляются в письменном виде, по которым проводится устное собеседование.

Оценка за ответ на билет выставляется в соответствии со следующим критериями:

Студент, ответивший правильно

на 1 вопрос, получает оценку «неудовл» (1);

на 2 на 1 вопрос, получает оценку «удовл» (3);

на 3 вопроса, получает оценку «удовл» (3) или (4), в зависимости от полноты правильных ответов и ответов на другие вопросы;

на 4 вопроса, получает оценку «хорошо» (5), (6) или (7), в зависимости от полноты правильных ответов и ответов на другие вопросы;

Студент, ответивший на все 5 вопросов, получает 8 баллов и может выбрать для подготовки вопрос повышенной сложности для получения оценки «отлично» (9) или (10) .

Во время проведения экзамена студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий. Учебной, учебно-методической и справочной литературой пользоваться во время экзамена не допускается. Во время экзамена должны быть также выключены мобильные телефоны.

Перед началом экзаменационной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи экзамена. Формулировки вопросов в билетах студенты узнают во время консультаций.

Студенты, получившие итоговую оценку «отлично» (10) и решившие и защитившие задачи повышенной сложности домашнего задания, могут получить дополнительные зачетные единицы по курсу.