

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Л. Д. Ландау  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН)**

ПРИНЯТО  
Ученым советом  
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
(протокол от «18» марта 2022г. № 8)



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
д.ф.-м.н., И. В. Колоколов  
«18» марта 2022г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА  
ДИСЦИПЛИНЫ К2.1В.ДВ1.2**

**«Современная кинетика»**

---

По научной специальности: 1.3.3. Теоретическая физика

Уровень образования: Высшее образование - Подготовка кадров высшей квалификации

Форма обучения – очная

Рабочая программа дисциплины по выбору «Современная кинетика» (К2.1В.ДВ1.2) для Программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (далее – программа аспирантуры) ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика составлена в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

1. Федеральный закон от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ "Об образовании в Российской Федерации" с изменениями на 30.12.2021г.
2. Федеральные государственные требования (ФГТ) к программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утверждённые Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20.10.2021 № 951.
3. Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021 № 118 "Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093
4. Письмо ВАК от 13.05.2021 № 382-02 ВАК о Применении новой номенклатуры НС
5. Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 03.06.2021 № 561 о «О советах по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени докторов наук»
6. Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.08.2021 № 786 "Об установлении соответствия направлений подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре) научным специальностям, предусмотренным номенклатурой научных

специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. № 118"

~~7. Программа-минимум кандидатских экзаменов по специальности~~

Теоретическая физика и с учетом особенностей сложившейся в ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН научной школы

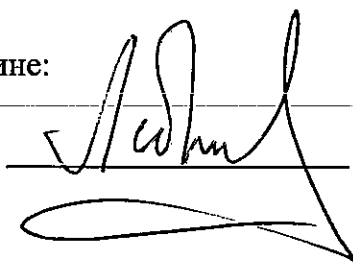
8. Паспорт научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика, разработанный экспертами ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Академии Наук.

9. Программа подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (далее – программа аспирантуры) ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН

Автор/составитель РП по дисциплине:

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН


«04» марта 2022 г.




В. В. Лебедев

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ


СОГЛАСОВАНО

Директор [должность]  
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
Колоколов И.В., д.ф.-м.н. проф.  
[ФИО]   
04.03.2022 [дата]


СОГЛАСОВАНО

д.ф.-м.н., зам. директора [должность]  
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
Бурмистров И.С. [ФИО]   
11.03.2022 [дата]

СОГЛАСОВАНО

д.ф.-м.н., зам. директора [должность]  
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
Фоминов Я.В. [ФИО]   
11.03.2022 [дата]

СОГЛАСОВАНО

Декан ФФНЦУ ВШЭ [должность]  
проф-р  
Трушкин М. Р. [ФИО]   
15.03.2022 [дата]

## 1. Паспорт научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика

### Область науки:

1. Естественные науки

### Группа научных специальностей:

1.3. Физические науки

### Наименование отрасли науки, по которой присуждаются ученые степени:

физико-математические науки

### Шифр научной специальности:

1.3.3. Теоретическая физика

### Направления исследований:

1. Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая теория поля. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Разработка математических методов теории поля. Объединенные модели фундаментальных взаимодействий. Супергравитация и теория суперструн, модели с дополнительными измерениями, AdS/CFT соответствие, голографические модели.
2. Физические свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация. Свойства вакуума, темная энергия. Общая теория относительности и ее расширения.
3. Релятивистская астрофизика.
4. Стандартная модель фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и ее расширения, обусловленные проблемой темной материи, физикой нейтрино и другими феноменологическими проблемами.
5. Теория конденсированного состояния классических и квантовых, макроскопических и микроскопических систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика, квантовая и классическая кинетическая теория.
6. Общие вопросы квантовой механики: основы, теория измерений, общая теория рассеяния. Квантовая теория физических явлений в ядрах, атомах и молекулах.
7. Разработка методов описания адронного вещества и кварк-глюонной плазмы в приложении к процессам в столкновениях ядер, в компактных астрофизических объектах, в ранней Вселенной и в других системах.
8. Симуляции процессов на решетке.
9. Разработка теории мезоскопических систем. Квантовая информатика, квантовые компьютеры, физические модели когнитивных процессов.

10. Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей неравновесных систем. Разработка теории хаоса и турбулентности.

**Смежные специальности (в рамках группы научной специальности)<sup>1</sup>:**

1.3.1. – Физика космоса, астрономия

1.3.15.– Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

1.3.8. – Физика конденсированного состояния

1.3.16. Атомная и молекулярная физика

1.1.2. – Дифференциальные уравнения и математическая физика

1.3.10 – Физика низких температур

1.3.11 – Физика полупроводников

1.3.12 – Физика магнитных явлений

---

<sup>1</sup>Для рекомендации научных специальностей в создаваемых диссертационных советах

## **2. Цель и задачи освоения дисциплины**

**Целью** изучения настоящей дисциплины является подготовка квалифицированных научных кадров в области теоретической физики, способных вести научно-исследовательскую работу, самостоятельно ставить и решать актуальные научные и практические задачи.

**Задачи** дисциплины включают формирование у аспирантов системы знаний и основных понятий по квантовой электродинамике и развитие способности к научно-исследовательской работе и выработку потребности к самостоятельному приобретению знаний по теоретической физике.

## **3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика.**

Дисциплина «Современная кинетика» (К2.1В.ДВ1.2) относится к элективным дисциплинам К2.1.В.ДВ.2 вариативной части Компонента 2 «Образовательный компонент». Программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (далее – программа аспирантуры) ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Программа курса содержит основные представления и методы теории классических и квантовых кинетических процессов. В первой части курса изучаются преимущественно классические системы, причем такие, что их взаимодействие с окружением может быть описано как шумовая составляющая в уравнениях движения. В этом случае теоретический анализ сводится к уравнению Фоккера-Планка. Далее изучаются уравнение Больцманна, квантовое кинетическое уравнение для возбуждений в конденсированных средах и кинетические уравнения для классических волн.

С их помощью изучаются кинетические явления как из класса релаксационных, когда финальной стадией является полное тепловое равновесие, так и существенно неравновесные, например, низкочастотный шум, обусловленный распределением активационных барьеров, или флуктуации размеров полимеров в хаотических потоках.

В рамках уравнения Больцманна проводится оценка и температурное поведение коэффициентов самодиффузии, теплопроводности и вязкости в газах; квантовое кинетическое уравнение используется для оценки и температурная зависимость коэффициентов теплопроводности и электрической проводимости в кристаллах, основанная на модели слабо взаимодействующих электронов и фононов.

Приводится кинетическое уравнение для плазмы и даются основные вытекающие из него физические свойства плазмы. Формулируется кинетическое уравнение для классических волн, в рамках которого получаются турбулентные (поточные) решения. Изучается кинетика слабо неидеального Бозе-газа при низких температурах. Приводятся основные сведения, касающиеся критической динамики. Дается понятие о химической кинетике. Приводится кинетическое описание эволюции зародышей при переходе первого рода.

#### 4. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

<b><i>Общепрофессиональные компетенции:</i></b>	
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
<b><i>Универсальные компетенции:</i></b>	
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
ПК-А	способностью самостоятельно выделять различные физические механизмы в физическом феномене, подбирать адекватные модели для описания этих механизмов (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-В	способностью применять на практике базовые общепрофессиональные знания теории и методов теоретической физики, в том числе микроскопическое и феноменологическое описание, теорию возмущений и диаграммный методы (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Г	способность применять различные математические методы, такие как ТФКП, решение дифференциальных уравнений, применение теории



	групп, диаграммная техника, при исследовании математических уравнений
ПК-Д	готовность сотрудничать с экспериментальными группами по планированию физических экспериментов и анализу полученных экспериментальных данных, способностью выделять в экспериментальной ситуации отдельные физические феномены и составлять адекватную математическую модель, описывающую эти феномены (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Е	готовность к дальнейшему самообразованию и расширению компетенции, способностью локализовать общие принципы теоретической физики для нового физического феномена (в соответствии с профилем подготовки)

**В результате освоения дисциплины обучающиеся должны**

***Знать:***

- основные понятия о стохастических эволюционных уравнениях типа Ланжевена;
- основные понятия и типы кинетических уравнений Фоккера-Планка для функций распределения физических наблюдаемых;
- кинетические уравнения для бесстолкновительной плазмы;
- законы дисперсии возбуждений в бесстолкновительной плазме включая затухание Ландау
- теорию активационных процессов типа Аррениуса;
- основные понятия и методы теории мультипликативных стохастических дифференциальных уравнений;
- уравнение Больцманна, квантовое кинетическое уравнение для возбуждений в конденсированных средах и кинетические уравнения для классических волн.
- свойства стационарных и нестационарных решений кинетических уравнений ;
- основные понятия о прямом и обратном каскадах интегралов движения

***Уметь:***

- применять уравнение Ланжевена для описания динамики флуктуаций в различных физических системах;

- разделять при решении кинетических и стохастических уравнений быстро и медленно релаксирующие степени свободы;
- формулировать граничные условия для кинетических уравнений при описании различных физических ситуаций;
- решать уравнения Фоккера-Планка в различных геометриях и асимптотических режимах;
- оценивать и определять температурную зависимость коэффициентов теплопроводности и вязкостей в сверхтекучем гелии, основываясь на модели слабо взаимодействующих фононов и ротонов;
- делать качественные выводы при анализе асимптотических режимов в изучаемых проблемах.
- делать численные оценки по порядку величины;
- описывать статистические свойства флуктуаций в различных физических системах на языке корреляционных функций
- использовать метод самосогласованного поля при анализе кинетики многочастичных систем и оценивать область его применимости;
- пользоваться справочной литературой научного и прикладного характера для быстрого поиска необходимых математических и физических данных и понятий
- осваивать новые предметные области и теоретические модели;
- пользоваться адекватным математическим аппаратом при решении практических задач;
- эффективно использовать IT-технологии и компьютерную технику;
- конструировать физические подходы, способные описывать физические явления.

***Владеть:***

- навыками построения минимальной модели, описывающей интересные аспекты изучаемого физического явления;- понятиями кинетических уравнений и функций распределения;
- языком корреляторов вблизи равновесия и в статистической гидродинамике;
- иерархией масштабов в кинетике макроскопических систем;
- разделением масштабов при построении феноменологии разного уровня.

**5. Объем дисциплины, виды учебной работы и форма отчетности**

Вид учебной работы	Часов	ЗЕТ
Общая трудоемкость дисциплины	90	2.5
Аудиторные занятия:	86	2.4
лекции	38	1.1
самостоятельная работа	48	1.3
Контроль	4	0.1

Форма отчетности: зачет с оценкой

## 6. Содержание и структура дисциплины

### 6.1. Учебный план по дисциплине

№	Название тем	Всего
1.	Уравнение Ланжевена. Диффузия в фазовом пространстве	6
2.	Диффузия с ограничениями	6
3.	Активационные процессы.	6
4.	Бесстолкновительная кинетика плазмы.	6
5.	Уравнение Больцмана для нейтральных атомов и гидродинамическое приближении.	6
6.	Квантовые кинетические уравнения для электронов и фононов.	8
7.	Матрица плотности для двухуровневой системы.	7
8.	Классическая волновая динамика.	8
9.	Волновая турбулентность.	7
10.	Элементы химической кинетики.	6
11.	Релаксационная динамика параметра порядка.	7
12.	Кинетика фазовых переходов первого рода.	6
13.	Кинетика низкотемпературного слабо неидеального Бозе-газа.	11
	Итого часов:	90

Самостоятельная работа заключается в разборе задач и упражнений по курсу.

## **6.2 Содержание лекционного курса**

*Тема 1.* Уравнение Ланжевена. Диффузия в фазовом пространстве.

Редукция к уравнению Фоккера-Планка и пространственной диффузии. Релаксация пространственно-однородного распределения по импульсам. Характер и временные масштабы этой релаксации. Переход от уравнения Фоккера-Планка для броуновской частицы в фазовом пространстве к уравнению диффузии. На каких характерных временах это происходит? Основные шаги кинетической теории возмущений. Диффузия с поглощением (в разных размерностях)

*Тема 2.* Диффузия с ограничениями

Непроницаемые частицы в каналах. Вывод корневого закона для среднего квадрата смещения.

*Тема 3.* Активационные процессы.

Случай сильного трения: закон Аррениуса.

*Тема 4.* Бесстолкновительная кинетика плазмы.

Уравнение Власова. Плазменные колебания. Затухание Ландау и его связь с излучением Вавилова-Черенкова.

*Тема 5.* Уравнение Больцмана для нейтральных атомов и гидродинамическое приближение.

Основное кинетическое уравнение. Кинетическое уравнение с точным учетом двухчастичного рассеяния для разреженного газа. Классический предел по поступательным степеням свободы. Уравнение Больцмана. Ограничения в применимости уравнения Больцмана. Рост энтропии и H-теорема для основного кинетического уравнения. Равновесное решение и детальное равновесие. Уравнение Больцмана для смеси тяжелого и легкого газов. Предел Фоккера-Планка.

*Тема 6.* Квантовые кинетические уравнения для электронов и фононов. Элементарные процессы релаксации.

Квантовая теория рассеяния. Золотое правило Ферми в борновском приближении. Модификация для уровней конечной ширины. Двухчастичное рассеяние вне борновского

приближения. Т-матрица. Бозоны и фермионы. Формализм вторичного квантования. Представление операторов. Гамильтонианы. Сохраняющиеся частицы. Несохраниющиеся квазичастицы: фононы, фотоны. Квантовое кинетическое уравнение для квазичастиц. Рассеяние на примесях. Трех- и четырехполевые процессы. Транспортные явления: электропроводность и теплопроводность.

*Тема 7.* Матрица плотности для двухуровневой системы.

Кинетическое уравнение для матриц плотности систем с конечномерным пространством состояний. Взаимодействие атомов с электромагнитным полем. Ядерный магнитный резонанс.

*Тема 8.* Классическая волновая динамика.

Гамильтонов формализм. Кинетические уравнения для волн (капиллярные волны на воде, звук).

*Тема 9.* Волновая турбулентность.

Классический волновой предел в кинетическом уравнении для бозонов. Равновесные решения и стационарные потоковые состояния. Волновая турбулентность и её спектры: волны на воде, звук. Кинетика плазмы: уравнение Власова, ленгмюровские колебания и затухание Ландау. Дрейф в пространстве скоростей. Понятие о ленгмюровской турбулентности. Проблема акустической турбулентности. Уравнение Бюргерса и ударные волны. Явление перемежаемости: бюргуленция (турбулентность с динамикой, описываемой уравнением Бюргерса). Оптическая турбулентность в оптоволоконных линиях связи.

*Тема 10.* Элементы химической кинетики.

Роль флуктуаций. Техника Доя-Пелити.

*Тема 11.* Релаксационная динамика параметра порядка.

Крупномасштабная феноменология: релаксационная динамика сохраняющегося и не сохраняющегося параметров порядка. Критические вклады в наблюдаемые кинетические явления.

*Тема 12.* Кинетика фазовых переходов первого рода.

Теория Лифшица-Слезова: флуктуационная стадия, стадия коалесценции.  
Кинетика химической поляризации клеточных мембран.

*Тема 13. Кинетика низкотемпературного слабо неидеального Бозе-газа.*

## **7. Самостоятельная работа аспирантов**

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах, на рабочих местах с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется собеседованием. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

## **8. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов**

Контрольные вопросы для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины совпадают с пунктами содержания лекционного курса.

## **9. Пример экзаменационного билета**

- 1. Кинетическое уравнение для бесстолкновительной плазмы и плазменные колебания.*
- 2. Найти зависящую от времени функцию распределения координат броуновской частицы в однородном электрическом поле, если в начальный момент времени она находилась в начале координат.*

После окончания курса аспирантам дается набор вопросов для зачета.

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

### **10.1.1 Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (обязательная литература)**

- [1] Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. М.: Физматлит, 2002.
- [2] Лебедев В. В. Флуктуационные эффекты в макрофизике. М.: МЦНМО, 2004.
- [3] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Гидродинамика, М., Физматлит, 2003

### **10.1.2 Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (дополнительная литература)**

- [1] Фриш У. Турбулентность. Наследие А. Н. Колмогорова. М.: ФАЗИС, 1998.
- [2] И. В. Колоколов, Е. Г. Образовский, Е. В. Подивилов, Физическая кинетика, НГУ, 2009, МФТИ, 2010
- [3] Zakharov V. E., L'vov V. S, Falkovich G. Kolmogorov Spectra of Turbulence I. Wave Turbulence. Springer Verlag, 1992.
- [4] Л.А.Арцимович, Р.З.Сагдеев, Физик плазмы для физиков, М., Атомиздат, 1979.
- [5] Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1981.
- [6] Ш.М.Коган, Электронный шум и флуктуации в твердых телах. М., Физматлит, 2009.
- [7] Я.Б.Зельдович, А.Д.Мышкис, Элементы математической физики, М., Наука, 1973.
- [8] Д.Форстер, Гидродинамические флуктуации, нарушенная симметрия и корреляционные функции, М., Атомиздат, 1980.

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

- On-line доступ к журналам [Physical Review Journals](#) (American Physical Society (из подписки ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН).
- Доступ к ресурсам БЕН РАН (по договору ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН).
- Доступ к НЭБ (свободный доступ)

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

**10.4 Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- аудиторный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН;
- ноутбук, мультимедийный проектор, экран;
- рабочее место с выходом в Интернет;
- библиотечный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН
- библиотечные фонды БЕН РАН и НЭБ (по договору ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН)

**11. Обеспечение электронной информационно-образовательной средой для освоения дисциплины в полном объёме независимо от места нахождения обучающегося (при необходимости)**

- электронные информационные и образовательные ресурсы ИТФ им. Л. Д. Ландау  
РАН - ЭИС ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН