

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»  
(ИОФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ



Директор ИОФ РАН,  
чл.-корр. РАН

С.В. Гарнов

202\_\_ г.

Рабочая программа дисциплины  
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Специальность: 1.3.3. Теоретическая физика

г. Москва

2022 год

Рабочая программа дисциплины «Теоретическая физика» составлена в соответствии с Федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов, утвержденными приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

Программу составили: Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., проф., гл.н.с.  
Попруженко С.В., д.ф.-м.н., в.н.с.

Программа обсуждена и одобрена на заседании аспирантской комиссией ИОФ РАН  
30.06.2022, протокол №2206-30

Программа утверждена решением Ученого совета ИОФ РАН 05.07.2022 протокол №13

## **Аннотация**

Учебная дисциплина «Теоретическая физика» является важной составной частью Учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИОФ РАН. В рамках дисциплины «Теоретическая физика» обучающиеся далее – аспиранты) получают базовые знания по основным разделам теоретической физики: механики, теории поля, электродинамики и механики сплошных сред, квантовой механики и статистической физики.

Дисциплина «Теоретическая физика» является важным фактором формирования у аспиранта целостного научного мировоззрения, развития физического мышления, умения использовать базовые физические законы, включая законы квантовой физики, для анализа различных физических явлений. Освоение дисциплины позволит выработать у аспирантов подходы к решению современных проблем в области теоретической физики и смежных областях естественных наук. Дисциплина «Теоретическая физика» также направлена на подготовку аспирантов к сдаче кандидатского экзамена по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Общая трудоемкость учебной дисциплины «Теоретическая физика» составляет 5 зачетных единиц (180 часов).

Контроль уровня освоения дисциплины аспирантами проводится в формах текущей и итоговой аттестации. Текущая аттестация предполагает оценку знаний и умений на лекционных занятиях с помощью устных опросов, оценки различных видов самостоятельной работы аспирантов. Промежуточная аттестация аспирантов проводится в форме зачетов (в 3, 4 и 5 семестрах). Итоговая аттестация проводится в рамках кандидатского экзамена по специальности «Теоретическая физика» (6 семестр).

### **1. Цель изучения дисциплины**

Целью изучения дисциплины «Теоретическая физика» является освоение обучающимися фундаментальных знаний по основным направлениям теоретической физики, ознакомление с методологией и аппаратом современной теоретической физики. Цель изучения дисциплины состоит в освоении обучающимися (фундаментальных знаний в области теоретической физики, овладении методами и выработке практических навыков решения задач по теоретической физике, формировании умений, необходимых для успешного осуществления научно-исследовательской деятельности в области теоретической физики.

### **2. Задачи дисциплины**

- 1) освоение аспирантами базовых знаний в области теоретической физики, как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей научно-технические основы современных инновационных сфер деятельности;
- 2) обучение аспирантов основным подходам и методам решения задач в области теоретической физики, с привлечением современного математического аппарата;
- 3) обучение разработке адекватных моделей изучаемых объектов и определению области их применимости;
- 4) формирование навыков применения эффективных методов исследования физических объектов, процессов и явлений с использованием современных аналитических средств физики.

### **3. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры**

Дисциплина «Теоретическая физика» относится к базовым дисциплинам Образовательного компонента «Дисциплины (модули)» программы аспирантуры по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Дисциплина «Теоретическая физика» реализуется в соответствии с ФГТ, ОПОП ВО и Учебного плана аспирантуры ИОФ РАН по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Изучение дисциплины «Теоретическая физика» опирается на знания базовых разделов высшей математики (алгебры, математического анализа, теории и функции комплексных переменных, теории вероятности и математической статистики, дифференциальных уравнений и уравнений математической физики), общей физики, а также начальных знаний по всем курсам теоретической физики, приобретенных аспирантами в рамках освоения программ магистратуры или специалитета по естественнонаучным и техническим специальностям.

#### **4. Требования к результатам освоения дисциплины**

Изучение дисциплины «Теоретическая физика» направлено на формирование у аспирантов следующих когнитивных умений и навыков:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач в области теоретической физики, а также в смежных и междисциплинарных областях;
- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области теоретической физики.

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

##### **Знать:**

- современные представления о природе основных физических явлений, о причинах их возникновения и взаимосвязи;
- представление о взаимосвязях и фундаментальном единстве естественных наук.
- место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях; естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности в областях;
- методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- основные направления, проблемы, теории и методы современной теоретической физики;
- основные физические законы, явления и эффекты, основные понятия и теории, описывающие физические объекты и процессы;
- основные теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике;
- математические методы, позволяющие адекватно описать и объяснить конкретные физические процессы и явления;
- новейшие открытия естествознания в области теоретической физики;
- постановку проблем при моделировании физических процессов;
- способы и методы анализа современных физико-технических проблем;
- принципы формулировки новых задач, возникающих в ходе научных исследований и методы их решения;
- основные разделы теоретической физики: механики, теории поля, электродинамики и механики сплошных сред, квантовой механики и статистической физики;
- особенности представления результатов научной деятельности в устной и письменной форме при работе в российских и международных исследовательских коллективах;

##### **Уметь:**

- анализировать современные естественнонаучные проблемы;

- абстрагироваться от влияний несущественных факторов, выделять главное содержание исследуемого физического явления и выбирать адекватную модель его описания;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы, а также фундаментальные знания для понимания сущностных явлений окружающего мира;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- критически осмысливать и интерпретировать новейшие явления в теории и практике;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- ставить задачи и разрабатывать программу исследования;
- анализировать альтернативные варианты решения исследовательских и практических задач;
- выбирать способы и методы решения исследовательских и практических задач;
- обосновывать применение математических и физических моделей исследуемых процессов, явлений и объектов;
- интерпретировать полученные результаты на основе системного научного мировоззрения;
- работать с информацией в области своей научной деятельности, полученной из различных источников: научной периодической литературы, монографий и учебников, электронных ресурсов сети Интернет;
- активно и целенаправленно применять полученные знания, навыки и умения для выбора тематики выполнения индивидуальной научно-исследовательской работы;
- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности;
- привлекать для решения освоенный физико-математический аппарат теоретической физики;
- применять на практике умения и навыки в организации исследовательских работ и проводить научные исследования, готовность к участию в инновационной деятельности;
- следовать нормам, принятым в научном общении при работе в российских и международных исследовательских коллективах с целью решения научных и научно-образовательных задач.

### **Владеть:**

- навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- творческим подходом в реализации научно-технических задач, основанному на систематическом обновлении полученных знаний, навыков и умений и использовании последних достижений в области физики;
- способностью планировать и осуществлять комплексные исследования на основе системного научного мировоззрения;
- математическим аппаратом теоретической физики;
- практическими навыками решения конкретных задач;
- методологией проведения теоретических исследований;
- методами выполнения исследовательских работ;
- математическим моделированием физических процессов и явлений;
- способностью обработки результатов физического эксперимента, а также интерпретации полученных результатов на основе системного научного мировоззрения.

## 5. Объем и вид учебной работы

Общая трудоёмкость дисциплины «Теоретическая физика» составляет 5 зач. ед. (180 часов), их распределение по видам работ представлено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость					
	зач. ед.	час.	в т.ч. по семестрам			
			3	4	5	6
<b>Общая трудоёмкость</b> дисциплины по учебному плану	<b>5</b>	<b>180</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>36</b>
<b>Аудиторная работа:</b>	<b>3</b>	<b>108</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>-</b>
лекции (Л)		108	36	36	36	-
семинары (С)		-	-	-	-	-
<b>Самостоятельная работа:</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>36</b>
самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала, освоение материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарам и т.д.)		30	10	10	10	-
Подготовка к зачёту		6	2	2	2	-
Подготовка к экзамену		36	-	-	-	36
<b>Вид контроля</b> (З – зачет, Э – кандидатский экзамен)			<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>Э</b>

## 6. Содержание дисциплины

Таблица 2

Тематический план учебной дисциплины

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
<b>Раздел 1. МЕХАНИКА</b>	24	18		6
Уравнения движения. Законы сохранения Одномерное движение Столкновения частиц Малые колебания. Движение твердых тел. Канонические уравнения СТО Релятивистская механика.				
<b>Раздел 2. ТЕОРИЯ ПОЛЯ</b>	24	18	0	6
Заряд в электромагнитном поле. Уравнения электромагнитного поля. Постоянное электромагнитное поле. Электромагнитные волны. Поле движущихся зарядов. Излучение электромагнитных волн.				

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
Движение частицы в гравитационном поле. Уравнения гравитационного поля. Поле тяготеющих тел. Наблюдаемые эффекты ОТО				
<b>Всего за 3 семестр</b>	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
<b>Раздел 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА СПЛОШНЫХ СРЕД</b>	24	18	0	6
Электростатика диэлектриков и проводников. Сверхпроводники.. Уравнения электромагнитных волн. Электромагнитные волны в анизотропных средах. Магнитная гидродинамика. Нелинейная оптика. Ионизационные потери быстрых частиц				
<b>Раздел 4. МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД И ФИЗИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА</b>				
Идеальная жидкость. Вязкая жидкость. Переход к турбулентности. Звук. Одномерное движение сжимаемого газа. Ударные волны слабой интенсивности. Звуковые волны со слабой дисперсией. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Кинетическая теория газов. Бесстолкновительная плазма. Столкновения в плазме.				
<b>Всего за 4 семестр</b>	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
<b>Раздел 5. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА</b>	24	18	0	6
Основные положения квантовой механики. Уравнение Шредингера. Момент импульса Движение в центральном поле. Теория возмущений. Спин. Тождественность частиц. Атом. Движение в магнитном поле. Столкновения частиц.				
<b>Раздел 6. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА</b>	24	18	0	6
Основные принципы статистики. Термодинамические величины. Термодинамика идеальных газов. Распределение Ферми и Бозе. Неидеальные газы и конденсированные				

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего	Аудиторная работа		Внеаудиторная работа СР
		Л	С	
среды. Равновесие фаз. Системы с различными частицами. Слабонеидеальный бозе-газ. Твердые тела. Колебания решетки. Сверхпроводимость. Флуктуации. Фазовые переходы второго рода.				
<b>Всего за 5 семестр</b>	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>12</b>
Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности				<b>36</b>
<b>Всего за 6 семестр</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>36</b>
<b>Итого по дисциплине</b>	<b>180</b>	<b>54</b>	<b>18</b>	<b>108</b>

## 1. Механика

- Уравнения движения. Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа. Симметрии. Теорема Нетер. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса.
- Интегрирование уравнений движения. Одномерное движение, приведенная масса, движение в центральном поле. Кеплерова задача.
- Распад частиц, упругие столкновения. Сечение рассеяния частиц, формула Резерфорда.
- Малые колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, параметрический резонанс. Колебания систем со многими степенями свободы, нормальные координаты. Колебания при наличии трения. Нелинейные колебания.
- Движение твердых тел. Угловая скорость, момент инерции и момент количества движения твердых тел. Эйлеровы углы и уравнение Эйлера.
- Канонические уравнения, уравнение Гамильтона, скобки Пуассона, действие как функция координат, теорема Лиувилля, канонические преобразования, уравнение Гамильтона-Якоби, разделение переменных, адиабатические инварианты.
- Принцип относительности. Скорость распространения взаимодействий. Интервал. Собственное время. Преобразование Лоренца. Преобразование скорости. Четырехмерные векторы и тензоры. Четырехмерная скорость.
- Релятивистская механика. Принцип наименьшего действия. Энергия и импульс. Распад частиц. Упругие столкновения частиц.

## 2. Теория поля

- Заряд в электромагнитном поле. Четырехмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, калибровочная (градиентная) инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля.
- Действие для электромагнитного поля. Уравнения электромагнитного поля (уравнения Максвелла). Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля.



- Постоянное электромагнитное поле. Закон Кулона. Электростатическая энергия зарядов. Дипольный момент. Мультипольные моменты. Система зарядов во внешнем поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора.
- Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Спектральное разложение. Поляризационные характеристики излучения. Разложение электростатического поля.
- Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Мультипольное излучение. Излучение быстро движущегося заряда. Рассеяние свободными зарядами. Синхротронное излучение. Сила радиационного трения. Движение и излучение заряженных частиц в сверхсильных электромагнитных полях.

### **3. Электродинамика сплошных сред**

- Электростатика диэлектриков и проводников. Диэлектрическая проницаемость и проводимость. Термодинамика диэлектриков. Магнитные свойства. Постоянное магнитное поле. Магнитное поле постоянных токов. Термодинамические соотношения. Диа-, пара-, ферро- и антиферромагнетики.
- Сверхпроводники. Магнитные свойства. Сверхпроводящий ток. Критическое поле.
- Уравнения электромагнитных волн. Уравнения поля в отсутствие дисперсии. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Плоская монохроматическая волна. Распространение электромагнитных волн. Отражение и преломление. Принцип взаимности.
- Электромагнитные волны в анизотропных средах. Эффекты Керра и Фарадея. Пространственная дисперсия. Естественная оптическая активность.
- Магнитная гидродинамика. МГД-волны. Проблема динамо.
- Нелинейная оптика. Нелинейная проницаемость. Самофокусировка. Генерация второй гармоники.
- Ионизационные потери быстрых частиц. Излучение Черенкова. Рассеяние электромагнитных волн в средах. Рэлееское рассеяние.

### **4. Механика сплошных сред и физическая кинетика**

- Идеальная жидкость. Уравнение непрерывности. Уравнение Эйлера. Поток энергии. Поток импульса. Сохранение циркуляции скорости. Потенциальное обтекание тел: присоединенная масса, сила сопротивления, эффект Магнуса.
- Вязкая жидкость: уравнения движения вязкой жидкости. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости.
- Переход к турбулентности. Неустойчивости ламинарных течений. Теория Ландау-Хопфа. Типы аттракторов. Странный аттрактор. Переход к турбулентности путем удвоения периодов. Развитая турбулентность. Спектр турбулентности в вязком интервале. Колмогоровский спектр.
- Звук. Звуковые волны. Геометрическая акустика.
- Одномерное движение сжимаемого газа. Характеристики. Инварианты Римана. Простая волна Римана. Образование ударных волн. Ударная адиабата. Слабые разрывы. Теория сильного взрыва.
- Ударные волны слабой интенсивности. Уравнение Бюргерса.
- Звуковые волны со слабой дисперсией. Уравнение КДВ. Солитоны и их взаимодействие. Бесстолкновительные ударные волны.
- Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Двухжидкостное описание.

- Кинетическая теория газов. Кинетическое уравнение Больцмана. H-теорема. Теплопроводность и вязкость газов. Симметрии кинетических коэффициентов. Диффузионное приближение. Уравнение Фоккера-Планка.
- Бесстолкновительная плазма. Уравнения Власова. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы. Затухание Ландау. Ленгмюровские и ионно-звуковые волны. Пучковая неустойчивость: гидродинамическая и кинетическая стадии. Квазилинейная теория.
- Столкновения в плазме. Интеграл столкновений Ландау. Длина пробега частиц в плазме.

## 5. Квантовая механика

- Основные положения квантовой механики. Принцип неопределенности. Принцип суперпозиции. Операторы. Дискретный и непрерывный спектры. Гамильтониан. Стационарные состояния. Гейзенберговское представление. Соотношения неопределенности.
- Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер.
- Момент количества движения. Собственные функции и собственные значения момента количества движения. Четность. Сложение моментов. Разложение Клебша-Гордана.
- Движение в центральном поле. Сферические волны. Разложение плоской волны. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.
- Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени. Периодические возмущения. Квазиклассическая теория возмущений.
- Спин. Оператор спина. Тонкая структура атомных уровней.
- Тождественность частиц. Симметрия при перестановке частиц. Вторичное квантование для бозонов и фермионов. Обменное взаимодействие.
- Атом. Состояние электронов атома. Уровни энергии. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса-Ферми. Тонкая структура тонких уровней. Периодическая система Менделеева.
- Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения в магнитном поле. Плотность потока в магнитном поле.
- Столкновения частиц. Общая теория. Формула Бора. Резонансное рассеяние. Столкновение тождественных частиц. Упругое рассеяние при наличии неупругих процессов. Матрица рассеяния. Формула Брейта-Вигнера.

## 6. Статистическая физика

- Основные принципы статистики. Функция распределения и матрица плотности. Статистическая независимость. Теорема Лиувилля. Роль энергии. Закон возрастания энтропии. Микроканоническое распределение. Распределение Гиббса. Распределение Гиббса с переменным числом частиц.
- Термодинамические величины. Температура. Работа и количество тепла. Термодинамические потенциалы. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье. Теорема Нернста. Системы с переменным числом частиц. Свободная энергия в распределении Гиббса. Вывод термодинамических соотношений.
- Термодинамика идеальных газов. Распределение Больцмана. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ. Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ.
- Распределение Ферми и Бозе. Вырожденный идеальный ферми-газ. Свойства вещества при больших плотностях. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-

Эйнштейна. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка. Светимость абсолютно черного тела.

- Неидеальные газы и конденсированные среды. Фононные спектры и термодинамические свойства газа. Термодинамические свойства идеального классического газа.
- Равновесие фаз. Формула Клапейрона-Клаузиса. Критическая точка.
- Системы с различными частицами. Правило фаз. Слабые растворы. Смесь идеальных газов. Смесь изотопов. Химические реакции. Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Ионизационное равновесие.
- Слабонеидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Квантовые вихри.
- Твердые тела. Кристаллические структуры. Поверхность Ферми. Зонная структура. Квазичастицы.
- Колебания решетки. Теория упругости. Звук в твердых телах. Процессы распада и слияния фононов. Рассеяние фононов на примесях. Кинетическое уравнение для фононов. Теплопроводность.
- Сверхпроводимость. Куперовское спаривание. Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Теория Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау. Ток, калибровочная инвариантность, квантование потока. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Джозефсона.
- Флуктуации. Распределение Гиббса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Временные флуктуации. Симметрии кинетических коэффициентов. Флуктационно-диссипативная теорема.
- Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.

Дополнительный перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Теоретическая физика» формируется научным руководителем аспиранта и утверждается аспирантской комиссией.

#### **Раздел 4. Вопросы для самостоятельного изучения дисциплины по программе кандидатского экзамена по специальности**

Перечень вопросов для самостоятельного изучения дисциплины «Теоретическая физика» при подготовке к кандидатскому экзамену по специальности соответствует программе кандидатского экзамена по специальности «Теоретическая физика», утвержденной Ученым советом ИОФ РАН (протокол №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.).

#### **7. Примерная тематика:**

##### **7.1. Курсовых работ**

Не предусмотрено учебным планом

##### **7.2. Научно-исследовательских работ и проектов**

Не предусмотрено учебным планом

##### **7.3. Рефератов**

Не предусмотрено учебным планом

#### **8. Ресурсное обеспечение.**

##### **8.1. Кадровый потенциал**

Аспирантура ИОФ РАН располагает кадровыми ресурсами, гарантирующими качество подготовки аспиранта по специальности 1.3.3. Теоретическая физика в соответствии с ФГТ.

## **8.2. Материально-техническое оснащение.**

Для проведения занятий по дисциплине «Теоретическая физика», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам, обеспечивающая проведение всех видов теоретической и практической подготовки:

- аудитории для лекционных и семинарских занятий, оснащенные презентационным оборудованием (ноутбук, проектор, экран) и маркерными досками;
- оборудование для проведения лекционных и семинарских занятий в дистанционном формате (в случае необходимости);
- лицензионное программное обеспечение для демонстрации презентаций в формате PowerPoint, OpenOffice или Portable Document Format, а также современный формат Computable Document Format (CDF) for Interactive Content.
- учебная литература и методические материалы для проведения самостоятельной работы по дисциплине.

Есть возможность использовать стандартные пакеты компьютерной математики для решения физико-математических и физико-технических задач, а также представления полученных решений с использованием средств компьютерной графики.

Стандартные пакеты для инженерных расчетов:

- Лицензионная программа MATLAB (на компьютерный класс)
- Лицензионная программа Mathematica 8
- Лицензионная программа Visual Studio .NET, 2005, 2008, 2010
- Лицензионная программа Intel® Fortran Composer XE (академич)
- Лицензионная Программа КАРАТ (автор: Тараканов В.П.).

Авторские программные пакеты, разработанные сотрудниками ИОФ РАН.

## **8.3. Образовательные технологии**

При реализации различных видов учебной работы (лекции, семинары, самостоятельная работа) используются следующие современные образовательные технологии:

- лекционная система обучения;
- информационно-коммуникационные технологии;
- исследовательские методы в обучении.

Программа дисциплины «Теоретическая физика» предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной самостоятельной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков у обучающихся. Эффективность применения интерактивных форм обучения обеспечивается реализацией следующих условий:

- создание диалогического пространства в организации учебного процесса;
- использование принципов социально-психологического обучения в учебной и научной деятельности;
- применение интерактивных форм обучения, направленных на развитие внутренней активности аспиранта, стимулирование мотивации и интереса в области углубленного изучения теоретической физики в общеобразовательном и профессиональном плане; повышение уровня активности и самостоятельности научно-исследовательской работы; развитие навыков анализа, критичности мышления, научной коммуникации.

Образовательные технологии предполагают проведение занятий в форме лекций с объяснением теоретического материала, семинаров с разбором лекционного материала и решением задач и самостоятельную работу. Самостоятельная работа аспирантов проводится в форме изучения отдельных теоретических вопросов по предлагаемой литературе и самостоятельного решения задач с дальнейшим их разбором или обсуждением на аудиторных занятиях.

На занятиях может использоваться промежуточный контроль в виде решения задач по лекционному и семинарскому материалу.

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

### **9.1. Основная литература**

#### **9.1.1. Электронные учебные издания (учебники, учебные пособия).**

#### **9.1.2. Электронные базы данных, к которым обеспечен доступ.**

- Интернет-ресурсы научно-технической библиотеки ИОФ РАН  
<https://www.gpi.ru/about/library/education/>
- Научная электронная библиотека elibrary.ru;
- Электронные базы Web of Science и SCOPUS;
- Журналы по физике (Успехи физических наук, ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Физика твердого тела, Физика плазмы, Nature, New Journal of Physics, Physical Review Letters, Physical Review и др;
- Научные и научно-технические журналы издательств American Physical Society, American Institute of Physics, Institute of Physics, Nature, Springer Verlag, база данных Web of Science.

#### **9.1.3. Учебники**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М., ФМЛ, 2001.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., Наука, 1988.
3. Давыдов А. С. Квантовая механика. М.: Наука, 1973.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., ФМЛ, 2001.
5. Шифф Л. Квантовая механика. М. ИЛ. 1957.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: ФМЛ, 2001.
7. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Квантовая электродинамика. М.: ФМЛ, 2001.
8. Ицксон К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля. В 2-х томах. М.: Мир, 1984.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1. М.: ФМЛ, 2001.
10. Румер Ю.Б. , Рывкин С.М., Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1971.
11. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.
12. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Теория неравновесных систем. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
13. Кубо Р. Статистическая механика. М.: Мир, 1967.
14. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Статистическая физика. Ч.2. М.: Наука, 2000.
15. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Физическая кинетика. М.: Наука, 1979.
16. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Гидродинамика. М.: ФМЛ, 2001.
17. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Квантовые поля. М.: Наука, 1993.

#### **9.1.4. Учебные пособия**

### **9.2. Дополнительная литература**

1. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М.: Физматлит, 2001.
2. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д., Строение и эволюция вселенной. М.: Наука, 1975.
3. Вигнер Е., Теория групп и ее приложение к квантовой механике. М.: ИЛ, 1961.
4. Абрикосов А.А., Основы теории металлов. М.: Наука, 2000.

5. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Москва- Ижевск: РиХД, 2001.
6. Киттель Ч., Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 2000.
7. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. , Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: Физматгиз, 1962.
8. Окунь Л.Б., Кварки и лептоны. М.: Наука, 1990.

#### **9.2.1. Учебно-методические пособия (учебные задания)**

#### **9.2.2. Литература для углубленного изучения, подготовки рефератов**

**10. Аттестация по дисциплине.** Форма промежуточной аттестации по итогам обучения в 3, 4 и 5 семестрах – зачет, процедура аттестации в 3 и 4 семестрах включает решение контрольных задач и ответ на вопросы, в 5 семестре – ответ на вопросы.

Итоговая аттестация по дисциплине включает сдачу кандидатского экзамена экзаменационной комиссии, утвержденной локальным нормативным актом ИОФ РАН.

#### **11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

##### **11.1 Оценочные средства текущего контроля успеваемости и сформированности компетенций**

Для текущего контроля успеваемости применяется комплекс методик и диагностического инструментария: устный опрос, решение домашних задач по теме занятий, учет посещаемости занятий и активности аспирантов в ходе занятий.

##### **11.2 Примерный перечень вопросов к зачету по дисциплине**

1. Уравнения движения. Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа.
2. Симметрии. Теорема Нетер. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса.
3. Интегрирование уравнений движения. Одномерное движение, приведенная масса, движение в центральном поле.
4. Распад частиц, упругие столкновения. Сечение рассеяния частиц, формула Резерфорда.
5. Малые колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, параметрический резонанс.
6. Колебания систем со многими степенями свободы, полярные координаты. Колебания при наличии трения.
7. Нелинейные колебания.
8. Движение твердых тел. Угловая скорость, момент инерции и момент количества движения твердых тел. Эйлеровы углы и уравнение Эйлера.
9. Канонические уравнения, уравнение Гамильтона, скобки Пуассона, действие как функция координат, теорема Лиувилля, уравнение. Гамильтона- Якоби, разделение переменных.
10. Канонические преобразования. Адиабатические инварианты.
11. Принцип относительности. Скорость распространения взаимодействий. Интервал. Собственное время. Преобразование Лоренца. Преобразование скорости. Четырехмерные векторы. Четырехмерная скорость.
12. Релятивистская механика. Принцип наименьшего действия. Энергия и импульс. Распад частиц. Упругие столкновения частиц.

13. Заряд в электромагнитном поле. Четырехмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, калибровочная (градиентная) инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля.
14. Действие для электромагнитного поля. Уравнения электромагнитного поля. Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля.
15. Постоянное электромагнитное поле. Закон Кулона. Электростатическая энергия зарядов. Дипольный момент. Мультипольные моменты. Система зарядов во внешнем поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора.
16. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Спектральное разложение. Поляризационные характеристики излучения. Разложение электростатического поля.
17. Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Мультипольное излучение. Излучение быстродвижущегося заряда. Рассеяние свободными зарядами. Синхротронное излучение. Сила радиационного трения.
18. Электростатика диэлектриков и проводников. Диэлектрическая проницаемость и проводимость. Термодинамика диэлектриков. Магнитные свойства. Постоянное магнитное поле. Магнитное поле постоянных токов. Термодинамические соотношения. Диа-, пара-, ферро- и антиферромагнетики.
19. Сверхпроводники. Магнитные свойства. Сверхпроводящий ток. Критическое поле.
20. Уравнения электромагнитных волн. Уравнения поля в отсутствие дисперсии. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Плоская монохроматическая волна. Распространение электромагнитных волн. Отражение и преломление. Принцип взаимности.
21. Электромагнитные волны в анизотропных средах. Эффекты Керра и Фарадея. Пространственная дисперсия. Естественная оптическая активность.
22. Магнитная гидродинамика. МГД волны. Проблема динамо.
23. Нелинейная оптика. Нелинейная проницаемость. Самофокусировка. Генерация второй гармоники.
24. Ионизационные потери быстрых частиц. Излучение Черенкова. Рассеяние электромагнитных волн в средах. Рэлеевское рассеяние.
25. Идеальная жидкость. Уравнение непрерывности. Уравнение Эйлера. Поток энергии. Поток импульса. Сохранение циркуляции скорости. Потенциальное обтекание тел: присоединенная масса, сила сопротивления, эффект Магнуса.
26. Вязкая жидкость: уравнения движения вязкой жидкости. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости.
27. Переход к турбулентности. Неустойчивости ламинарных течений. Теория Ландау-Хопфа. Типы аттракторов. Странный аттрактор. Переход к турбулентности путем удвоения периодов. Развитая турбулентность. Спектр турбулентности в вязком интервале. Колмогоровский спектр.
28. Звук. Звуковые волны. Геометрическая акустика.
29. Одномерное движение сжимаемого газа. Характеристики. Инварианты Римана. Простая волна Римана. Образование ударных волн. Ударная адиабата. Слабые разрывы. Теория сильного взрыва.
30. Ударные волны слабой интенсивности. Уравнение Бюргерса.
31. Звуковые волны со слабой дисперсией. Уравнение КДВ. Солитоны и их взаимодействие. Бесстолкновительные ударные волны.
32. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Двухжидкостное описание.

33. Кинетическая теория газов. Кинетическое уравнение Больцмана.  $\delta H$ -теорема. Теплопроводность и вязкость газов. Симметрии кинетических коэффициентов. Диффузионное приближение. Уравнение Фоккера-Планка.
34. Бесстолкновительная плазма. Уравнения Власова. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы. Затухание Ландау. Ленгмюровские и ионно-звуковые волны. Пучковая неустойчивость: гидродинамическая и кинетическая стадии. Квазилинейная теория.
35. Столкновения в плазме. Интеграл столкновений Ландау. Длина пробега частиц в плазме.
36. Основные положения квантовой механики. Принцип неопределенности. Принцип суперпозиции. Операторы. Дискретный и непрерывный спектры. Гамильтониан. Стационарные состояния. Гейзенберговское представление. Соотношения неопределенности.
37. Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер.
38. Момент количества движения. Собственные функции и собственные значения момента количества движения. Четность. Сложение моментов. Разложение Клебша-Гордана.
39. Движение в центральном поле. Сферические волны. Разложение плоской волны. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.
40. Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени. Периодические возмущения. Квазиклассическая теория возмущений.
41. Спин. Оператор спина. Тонкая структура атомных уровней.
42. Тождественность частиц. Симметрия при перестановке частиц.
43. Вторичное квантование для бозонов и фермионов. Обменное взаимодействие.
44. Атом. Состояние электронов атома. Уровни энергии. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса-Ферми. Тонкая структура тонких уровней. Периодическая система Менделеева.
45. Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения в магнитном поле. Плотность потока в магнитном поле.
46. Столкновения частиц. Общая теория. Формула Бора. Резонансное рассеяние. Столкновение тождественных частиц. Упругое рассеяние при наличии неупругих процессов. Матрица рассеяния. Формула Брейта-Вигнера.
47. Основные принципы статистики. Функция распределения и матрица плотности. Статистическая независимость. Теорема Лиувилля. Роль энергии. Закон возрастания энтропии. Микроканоническое распределение. Распределение Гиббса. Распределение Гиббса с переменным числом частиц.
48. Термодинамические величины. Температура. Работа и количество тепла. Термодинамические потенциалы. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье. Теорема Нернста. Системы с переменным числом частиц. Свободная энергия в распределении Гиббса. Вывод термодинамических соотношений.
49. Термодинамика идеальных газов. Распределение Больцмана. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ. Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ.
50. Распределение Ферми и Бозе. Вырожденный идеальный ферми-газ. Свойства вещества при больших плотностях. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка. Светимость абсолютно черного тела.
51. Неидеальные газы и конденсированные среды. Фононные спектры и термодинамические свойства газа. Термодинамические свойства неидеального



классического газа.

52. Равновесие фаз. Формула Клапейрона-Клаузиса. Критическая точка.
53. Системы с различными частицами. Правило фаз. Слабые растворы. Смесь идеальных газов. Смесь изотопов. Химические реакции. Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Ионизационное равновесие.
54. Слабонеидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Квантовые вихри.
55. Твердые тела. Кристаллические структуры. Поверхность Ферми. Зонная структура. Квазичастицы.
56. Колебания решетки. Теория упругости. Звук в твердых телах. Процессы распада и слияния фононов. Рассеяние фононов на примесях. Кинетическое уравнение для фононов. Теплопроводность.
57. Сверхпроводимость. Куперовское спаривание. Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Теория Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау. Ток, калибровочная инвариантность, квантование потока. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Джозефсона.
58. Флуктуации. Распределение Гиббса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Временные флуктуации. Симметрии кинетических коэффициентов. Флуктуационно-диссипативная теорема.
59. Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.

### 11.3 Примерный перечень задач к зачету по дисциплине

1. Написать функцию Лагранжа для материальной точки в координатах:
  - а) декартовых,
  - б) цилиндрических,
  - в) сферических,
2. Найти соотношение между скоростями и углами отклонения двух частиц после столкновения, если до столкновения одна из них покоилась (выразить их через угол отклонения в системе координат, где центр инерции покоится).
3. Найти отношение частот двухатомных молекул изотопов с массами ядер соответственно  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ ,  $m_4$ .
4. Определить смещение положения равновесия под влиянием малой постоянной внешней силы, выразив его через массу и частоту.
5. Выразить логарифмический декремент затухания через подвижность (подвижностью называется отношение скорости установившегося движения частицы, на которую действует одна только сила  $F$ , к силе).
6. Найти амплитуду вынужденных затухающих колебаний при действии периодической (гармонической) силы.
7. Найти отклонения, вызванные вращением земли (угловая скорость вращения мала), для свободно падающей точки (разобрать случай падения без начальной скорости и случай движения точки, брошенной по направлению меридиана под углом  $\alpha$  к горизонту).
8. Написать уравнения Гамильтона, если:
  - а)  $H = \frac{p_r^2}{2} + \frac{p_\theta^2}{2r^2 \sin^2 \theta} + \sin \theta$ ;
  - б)  $H = \frac{p_u^2 + p_v^2}{2(u^2 + v^2)} + u$ ;
  - в)  $H = \sqrt{1 + p^2} + r$ ;
9. Проинтегрировать уравнение Гамильтона - Якоби для свободной точки с массой  $m$ .

## **12. Методические рекомендации аспирантам по освоению дисциплины**

Аспиранты должны быть заранее ознакомлены с графиком учебного процесса, содержанием дисциплины и методикой проведения занятий. Посещаемость учебных занятий является обязательной для обучающихся, как и ведение конспектов, записей. Отработка пропущенных занятий предполагает самостоятельную работу аспиранта с учебной литературой и осуществляется в форме собеседования по теме пропущенного занятия.

## **13. Методические рекомендации преподавателям по организации обучения по дисциплине**

### **13.1 Порядок проведения лекции**

*Вводная часть* включает формулировку темы лекции с краткой аннотацией предлагаемых для изучения вопросов, характеристику места и значения данной темы в курсе.

*Основная часть* лекции имеет своей целью раскрытие содержания основных вопросов и определяется логической структурой плана лекции.

В *заключительной части* лектор проводит обобщение наиболее важных и существенных вопросов, делает выводы, отвечает на вопросы слушателей, формулирует задачи для самостоятельной работы аспирантов и рекомендует соответствующую литературу.

### **13.2 Порядок проведения семинара**

Во вводной части решаются организационные задачи семинарского занятия: проверка готовности аудитории и подготовленности аспирантов к занятию, формулировка темы, цели и задач занятия.

Основная часть занятия предполагает организацию дискуссии: постановку проблемы, выделение основных направлений. Выступление докладчиков, раскрывающих основные положения по вопросу. Выступления оппонентов, раскрывающих свое видение проблемы, дискуссия по докладу.

В заключительной части подводятся итоги занятия, дается оценка результатов работы аспирантов.

### **13.3 Организация самостоятельной работы аспирантов**

Основными формами самостоятельной работы и контроля аспирантов являются:

Выполнение индивидуальных заданий (как репродуктивного, так и творческого характера), позволяющих диагностировать уровень сформированности у аспирантов знаний, умений и навыков по дисциплине.

Собеседование – форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя с аспирантом, рассчитанная на выяснение объема знаний аспиранта по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающее всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

## **14. Описание критериев оценивания знаний обучаемых, шкал их оценивания**

### **14.1. Критерии оценивания знаний обучаемых на зачете по дисциплине:**

Оценка «Зачтено»: Обучающийся обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по специальности, справился с выполнением заданий и контрольных работ, предусмотренных программой дисциплины.

Оценка «Не зачтено»: Обучающийся обнаружил значительные пробелы в знаниях основного учебно-программного материала, допустил принципиальные ошибки в

выполнении предусмотренных программой заданий и не способен продолжить обучение или приступить по окончании аспирантуры к профессиональной деятельности без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

#### **14.2. Критерии оценивания знаний обучаемых на кандидатском экзамене по специальности:**

Оценка ставится по каждому из вопросов кандидатского экзамена по специальности, оценка за экзамен определяется как среднее арифметическое из оценок по трем вопросам экзамена с соответствующим округлением до целочисленной по правилам арифметических операций. При наличии оценки «неудовлетворительно» по одному из вопросов ставится общая оценка «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично»: В ответе качественно раскрыто содержание темы. Ответ хорошо структурирован. Прекрасно освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован высокий уровень понимания материала. Продемонстрировано превосходное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены полные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Хорошо»: Основные вопросы темы раскрыты. Структура ответа в целом адекватна теме. Хорошо освоен понятийный аппарат. Продемонстрирован хороший уровень понимания материала. Продемонстрировано хорошее умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены частичные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Удовлетворительно»: Тема раскрыта частично. Ответ структурирован недостаточно. Понятийный аппарат освоен частично. Продемонстрировано понимание отдельных положений из материала по теме. Продемонстрированы удовлетворительное умение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Представлены фрагментарные ответы на дополнительные вопросы по теме.

Оценка «Неудовлетворительно»: Тема не раскрыта. Ответ не структурирован. Понятийный аппарат освоен в недостаточном объеме. Понимание материала фрагментарное или отсутствует. Продемонстрировано неумение формулировать свои мысли, обсуждать дискуссионные положения. Не представлены ответы на дополнительные вопросы по теме.

Программу разработали:

Гусейн-заде Н.Г., д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Попруженко С.В., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись)