

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ И АСТРОФИЗИКИ**

**ПРОГРАММА**

**вступительного экзамена в аспирантуру**  
**по специальности 01 04 02 — теоретическая физика**

**Минск 2015**

**СОСТАВИТЕЛИ:** заведующий кафедрой профессор Феранчук И.Д.;  
профессора: Борздов Г.Н., Горбачевич А.К., Шишкина Т.В., Стражев В.И.,  
Минкевич А.В., Новицкий А.В., Фурс А.Н.; доценты: Жилко В.В., Леонов  
А.В., Полозов М.Н., Сягло И.С., Ушаков Е.А., Шуляковский Г.С.,  
Бенедиктович А.И.

Программа утверждена на заседании кафедры теоретической физики и  
астрофизики 17.06.2015, протокол № 11

Заведующий кафедрой профессор

И.Д. Феранчук

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

### **Уравнения движения**

Обобщенные координаты. Принцип наименьшего действия. Свойства функций и уравнений Лагранжа. Принцип относительности Галилея. Функции Лагранжа свободной материальной точки и системы материальных точек.

### **Законы сохранения.**

Энергия. Импульс. Центр инерции. Момент импульса. Механическое подобие.

### **Интегрирование уравнений движения**

Одномерное движение. Приведенная масса. Движение в центральном поле. Кеплерова задача. Движение в поле обобщенно-потенциальных сил.

### **Столкновения частиц**

Распад частиц. Упругие столкновения частиц. Рассеяние частиц. Формула Резерфорда.

### **Малые колебания**

Свободные одномерные колебания. Вынужденные колебания. Колебания системы со многими степенями свободы. Затухание колебаний. Вынужденные колебания при наличии трения.

### **Движение твердого тела**

Угловая скорость. Тензор инерции. Момент импульса твердого тела. Уравнения движения твердого тела. Эйлеровы углы. Уравнения Эйлера. Движение в неинерциальной системе отсчета.

### **Канонические уравнения**

Уравнения Гамильтона. Скобки Пуассона. Действие как функция координат и времени. Принцип Мопертюи. Канонические преобразования. Теорема Лиувилля. Уравнение Гамильтона-Якоби. Разделение переменных в уравнении Гамильтона-Якоби.

### **Идеальная жидкость**

Уравнение непрерывности. Уравнение Эйлера. Гидростатика. Уравнение Бернулли. Поток энергии. Поток импульса. Сохранение циркуляции скорости. Потенциальное трение. Звуковые волны. Геометрическая акустика. Собственные колебания. Распространение звука в движущейся среде.

### **Вязкая жидкость**

Тензор вязких напряжений. Уравнения движения вязкой жидкости. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости. Течение по трубе. Законы подобия.

## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Механика*. М.: Наука, 1988. 208 с.
2. Ольховский И.И. *Курс теоретической механики для физиков: Учеб.* М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. 574 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.И. *Гидродинамика*. М.: Наука, 1986. 736 с.
4. Коткин Г.Л., Сербо В.Г. *Сборник задач по классической механике*. М.: Наука, 1977. 319 с.

### *Дополнительная*

1. Голдстейн Г. *Классическая механика*. М.: Наука, 1975. 415 с.
2. Седов Л.И. *Механика сплошной среды: Учеб.: в 2 т.* М.: Наука, 1983. Т. 1-2.
3. Ольховский И.И., Павленко Ю.Г., Кузьменков Л.С. *Задачи по теоретической механике для физиков: Учеб. пособие*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 389 с.

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

### *Уравнения Максвелла как результат обобщения опытных фактов*

Полевой подход. Максвелловский ток смещения. Обобщение закона полного тока. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Уравнения Максвелла. Системы единиц. Граничные условия для векторов поля. Материальные уравнения. Сила Лоренца. Скалярный и векторный потенциалы. Калибровочная инвариантность. Лоренцевская и Кулоновская калибровки. Вектор Умова-Пойтинга. Тензор максвелловских натяжений. Законы сохранения для системы заряженных частиц и электромагнитных полей. Уравнения Максвелла-Лоренца. Максвелловское поле как усредненное микроскопическое.

### *Специальная теория относительности (СТО)*

Исторические предпосылки возникновения СТО и основные эксперименты. Постулаты СТО и преобразования Лоренца. Основные кинематические следствия из преобразований Лоренца.

Пространство-время и его геометрия. Аппарат четырехмерного описания. Четырехмерные скаляры, векторы и тензоры.

Релятивистское обобщение классической механики. Четырехмерные скорость и ускорение. Импульс и энергия частицы. Сила Минковского. Ковариантное уравнение движения.

### *Релятивистская электродинамика*

Четырехмерный вектор плотности заряда-тока, четырехмерный вектор-потенциал электромагнитного поля, волновой четырехвектор. Тензор электромагнитного поля. Преобразование напряженностей, индукции и потенциалов электромагнитного поля.

Инварианты электромагнитного поля. Четырехмерная запись уравнений Максвелла. Ковариантные выражения для силы Лоренца и законов сохранения. Материальные уравнения для движущихся сред. Граничные условия для векторов поля на движущейся границе раздела сред.

Четырехмерный тензор энергии-импульса и законы сохранения в электродинамике.

Лагранжиан и гамильтониан для релятивистской заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле.

### *Излучение электромагнитных волн*

Запаздывающие потенциалы. Поле точечного заряда. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Мощность, излучаемая ускоренно движущимся зарядом. Формула Лармора и ее релятивистское обобщение. Простейшие излучающие системы. Мультипольное излучение. Поля ограниченных источников. Электрическое дипольное излучение. Магнитное дипольное и электрическое квадрупольное излучения.

Рассеяние электромагнитных волн свободными зарядами. Формула Томсона. Сила реакции излучения.

Синхротронное излучение.

Излучение Вавилова-Черенкова.

### *Электромагнитные волны*

Волновые уравнения в однородных и неоднородных средах. Плоские волны. Поляризация. Тензор когерентности. Частично поляризованный свет. Волны в диэлектрических и проводящих средах. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Распространение волн в анизотропных средах. Магнитоактивные среды. Плазма. Ферриты.

Фазовая и групповая скорости электромагнитных волн в среде.

Отражение и преломление электромагнитных волн на границе раздела сред. Поляризация при отражении и полное отражение. Формулы Френеля.

Поля на поверхности и внутри проводника. Распространение электромагнитных волн вдоль двухпроводной линии и коаксиального кабеля.

Волноводы, их классификация и характеристики. ТЕ - и ТМ-волны.

Резонаторы.

### ***Стационарные электрические и магнитные поля***

Электростатика. Уравнения и граничные условия для скалярного потенциала.

Магнитостатика. Векторный потенциал. Уравнения Пуассона для векторного потенциала.

Методы решения задач электростатики и магнитостатики.

## **ЛИТЕРАТУРА**

### *Основная*

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1973.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976.
4. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965.
5. Савельев И.В. Основы теоретической физики: В 2 т. Т.1. М.: Наука, 1991.
6. Матвеев А.Н. Электродинамика. М.: Высш. шк. 1980.

### *Дополнительная*

1. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М.: ГИФМЛ, 1968.
2. Тоннела М.А. Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1962.
3. Терлетский Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. М.: Высш. шк., 1990.
4. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М.: Высш. шк., 1980.
5. Угаров В.А. Специальная теория относительности. М.: Наука, 1977.
6. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.Н. Курс теоретической физики: В 2 т. М.: ГИФМЛ, 1962. Т.1, 2.

## **КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА**

### ***Пространство состояний***

Бра- и кет-векторы. Понятие о гильбертовом пространстве. Скалярное произведение и его свойства, ортогональность, норма. Базисные вектора (дискретный и непрерывный базис). Преобразование базисных векторов.

### ***Линейные операторы и их свойства***

Определение линейных операторов. Внешнее произведение векторов как линейный оператор. Разложение операторов. Матричные элементы линейных операторов. Уравнения на собственные значения линейных операторов в случае непрерывного и дискретного спектров. Теорема о собственных векторах и собственных значениях эрмитовых операторов.

### ***Вектор состояния. Наблюдаемые***

Измерение физических величин. Понятие идеального измерения. Редукция вектора состояния (дискретный и непрерывный спектры). Распределение вероятностей. Разложение вектора состояния по базисным векторам. Физический смысл коэффициентов разложения. Совместные наблюдаемые. Понятие о полном наборе совместных наблюдаемых. Соотношение неопределенностей. Чистые и смешанные состояния. Статистический оператор (матрица плотности).

### ***Изменение вектора состояний и наблюдаемых со временем***

Время в квантовой механике. Квантовомеханические уравнения движения. Понятие о картинах Шредингера, Гейзенберга, Дирака. Уравнение Шредингера для амплитуд

вероятностей. Стационарные уравнения и их свойства. Теорема Эренфеста. Понятие интеграла движения. Связь интегралов движения с симметрией системы. Соотношение неопределенностей для энергии. Понятие о времени жизни состояния.

### ***Простейшие приложения квантовой механики***

Оператор импульса. Определение оператора импульса как оператора инфинитезимальных трансляций. Перестановочные соотношения для операторов положения и импульса. Координатное и импульсное представления.

Уравнение Шредингера (координатное представление). Уравнение непрерывности. Граничные условия (непрерывные, разрывные и дельтаобразные потенциалы).

Гармонический осциллятор. Представление чисел заполнения. Координатное представление.

Приближенные методы вычисления собственных значений и собственных векторов эрмитовых операторов. Шредингерова теория возмущений (невырожденный спектр). Теория возмущений при наличии вырождения. Квазивырождение. Вариационный метод.

### ***Движение в центральном поле***

Оператор момента импульса как генератор бесконечно малых поворотов. Собственные векторы и собственные значения операторов квадрата момента импульса и его проекции на одну из осей. Оператор орбитального момента импульса и его спектр в координатном представлении. Оператор спина  $1/2$ . Матрицы Паули и их свойства. Сложение моментов. Полный момент импульса электрона. Коэффициенты Вигнера (Клебша-Гордана). Уравнение Паули.

Задача двух тел. Качественное исследование движения частицы в поле центральных сил. Движение в кулоновском поле. Водородоподобный атом: спектр, волновые функции. Эффект Штарка и Зеемана.

### ***Квантовая теория систем тождественных частиц***

Обменное взаимодействие. Операторы перестановок. Симметризатор и антисимметризатор. Неразличимые частицы. Бозоны и фермионы. Пространство антисимметричных состояний и частиц. Принцип запрета Паули. Пространство антисимметричных состояний с переменным числом частиц. Операторы рождения и уничтожения фермионов. Перестановочные соотношения. Уравнения движения. Парное взаимодействие. Теория двухэлектронных атомов, пара - и орто-состояния, вклад обменных эффектов. Многоэлектронные атомы, метод Хартри-Фока.

Вторичное квантование. Классическое поле Шредингера, его квантование. Оператор числа частиц для бозонов. Связь с квантовой теорией неразличимых частиц. Дуализм.

### ***Полуклассическая теория излучения***

Квантование свободного электромагнитного поля. Понятие о фотоне. Свойства состояний с определенным числом фотонов. Неопределенность напряженности поля. Состояния Глаубера (когерентные состояния) и их свойства. Дираковская теория возмущений. Излучение и поглощение фотонов. Дипольное приближение. Естественная ширина уровня, время жизни состояния. Правила отбора для поглощения и испускания фотонов.

### ***Элементы релятивистской квантовой механики***

Уравнение Кляйна-Гордона-Фока и его применимость к описанию частиц с нулевым спином. Уравнение Дирака. Свободное движение дираковской частицы. Нерелятивистский и квазирелятивистский пределы. Тонкая структура энергетических уровней атома водорода.

### ***Элементарная теория рассеяния***

Постановка задачи рассеяния в квантовой механике. Амплитуда и сечение рассеяния. Расчет сечения в первом боровском приближении, условия его применимости. Формула Резерфорда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мессиа А. Квантовая механика: В 2 т. М.: Наука, 1978.
2. Давидов А.С. Квантовая механика. М.: Наука, 1973, 748 с.
3. Дирак П.А. Принципы квантовой механики. М.: Наука, 1979.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974.
5. Борисоглебский Л.А. Квантовая механика. Мн.: Университетское, 1988, 614 с.
7. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. В 2 т. М.: Мир, 1974.

## ТЕРМОДИНАМИКА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

### **Введение**

Предмет и методы термодинамики и статистической физики. Основные понятия и исходные положения термодинамики и статистической физики (термодинамические параметры, состояния термодинамического равновесия, квазистатические процессы и т.д.).

### **Микросостояния термодинамических систем**

Фазовое пространство и теорема Лиувилля. Статистическое распределение и статистический ансамбль. Микроканоническое распределение в классической теории. Матрица плотности. Квантовое микроканоническое и каноническое распределения. Термодинамика систем с переменным числом частиц. Большое каноническое распределение.

### **Статистический смысл основных термодинамических понятий**

Первое начало термодинамики. Второе начало термодинамики для квазистатических процессов. Энтропия и абсолютная температура. Основное уравнение термодинамики для квазистатических процессов. Важнейшие термодинамические потенциалы. Квазиклассическое приближение. Число квантовых состояний в квазиклассическом приближении.

### **Простейшие приложения равновесной статистической теории**

Классический атомный идеальный газ. Система невзаимодействующих квантовых линейных гармонических осцилляторов. Система квантовых ротаторов. Теплоемкость двухатомных идеальных газов. Равновесное излучение. Квантовая теория теплоемкости твердых тел. Отрицательные абсолютные температуры.

### **Квантовые идеальные газы**

Принцип тождественности одинаковых частиц. Распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Полностью вырожденный ферми-газ. Идеальный ферми-газ при низких температурах. Электронный газ в металлах (теплоемкость металлов, парамагнетизм и диамагнетизм). Идеальные Бозе-газы и конденсация Бозе-Эйнштейна. Фотоны и фононы.

### **Статистическая теория неидеальных систем**

Одноатомный неидеальный газ. Жидкий гелий и сверхтекучесть. Сверхпроводимость. Метод коррелятивных функций и его применения к неидеальному газу и к системе заряженных частиц.

Второе начало термодинамики для нестатических процессов, неравенство Клаузиуса. Общие условия термодинамического равновесия. Устойчивость равновесных состояний.

### **Фазовые переходы**

Фазовое равновесие, правило фаз Гиббса. Фазовые переходы 1-го и 2-го рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса и уравнения Эренфеста. Примеры фазовых переходов: газ Ван-дер-Ваальса, ферромагнетизм.

Критические состояния. Роль поверхностного натяжения при образовании новой фазы. Третье начало термодинамики. Получение низких температур.

#### ***Теория флуктуаций***

Вычисление вероятностей флуктуаций с помощью статистического распределения и принципа Больцмана. Рассеяние света на флуктуациях плотности.

#### ***Кинетические уравнения***

Броуновское движение. Марковские процессы и уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка. Автокорреляционная функция и теорема Винера-Хинчина. Формула Найквиста.

Метод кинетических уравнений в статистической теории неравновесных процессов. Кинетическое уравнение Больцмана. H-теорема Больцмана.

Кинетические уравнения в релаксационном приближении и их применения к явлениям переноса.

Уравнения Боголюбова для временных коррелятивных функций. Кинетическое уравнение в приближении самосогласованного поля.

#### ***Основы термодинамики необратимых процессов***

Линейные законы. Соотношения взаимности Онсагера. Применение к термоэлектрическим явлениям.

### ***ЛИТЕРАТУРА***

1. Базаров И.П. *Термодинамика*. М.: Высш. шк., 1991.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Статистическая физика*. М.: Наука, 1976.
3. Леонтович М.А. *Введение в термодинамику. Статистическая физика*. М.: Наука, 1983.
4. Кубо Р. *Статистическая механика*. М.: Мир, 1967.
5. Кубо Р. *Термодинамика*. М.: Мир, 1970.
6. Балеску Р. *Равновесная и неравновесная статистическая механика: В 2 т.* М.: Мир, 1978.
7. Шиллинг Г. *Статистическая физика в примерах*. М.: Мир, 1976.