

**Программа государственного экзамена  
по специальности «Фундаментальная и прикладная физика»**

**Механика**

Кинематика точки. Система отсчета. Система координат. Радиус-вектор, скорость, закон движения и траектория точки. Криволинейные координаты. Скорость и ускорение материальной точки в криволинейных системах координат.

Динамика материальной точки. Основная задача динамики материальной точки. Инерциальные системы отсчета. Законы Ньютона. Принцип относительности Галилея.

Импульс, момент импульса и кинетическая энергия материальной точки. Потенциальные силы. Потенциальная энергия материальной точки. Полная механическая энергия материальной точки. Законы изменения импульса, момента импульса и полной механической энергии материальной точки.

Общее решение уравнения одномерного движения материальной точки в стационарном силовом поле. Качественное исследование областей движения. Точки остановки. Финитное и инфинитное движения. Формула для периода финитного движения.

Центрально-симметричное силовое поле. Общее решение уравнений движения материальной точки в центрально-симметричном поле, независимом от времени. Качественное исследование областей движения. Точки поворота. Финитное и инфинитное движения. Условие замкнутости траектории финитного движения. Законы Кеплера.

Система материальных точек. Уравнения движения системы материальных точек. Центр масс системы материальных точек. Законы изменения импульса, момента импульса и полной механической энергии системы материальных точек.

Механические связи, налагаемые на систему материальных точек. Голономные связи. Число степеней свободы системы. Обобщенные координаты. Действительные, возможные и виртуальные перемещения. Идеальные связи. Функция Лагранжа. Обобщенные силы. Уравнения Лагранжа в обобщенных координатах.

Первые интегралы уравнений Лагранжа. Обобщенная энергия. Обобщенный импульс. Законы изменения и сохранения обобщенных импульса и энергии. Определение закона движения с помощью первых интегралов уравнений Лагранжа.

Функция Гамильтона. Канонические уравнения Гамильтона. Первые интегралы уравнений Гамильтона. Скобки Пуассона и их основные свойства. Запись уравнений Гамильтона с помощью скобок Пуассона. Теорема Пуассона.

Уравнение Гамильтона-Якоби. Полный интеграл уравнения Гамильтона-Якоби. Разделение переменных в уравнении Гамильтона - Якоби. Схема нахождения закона движения с помощью уравнения Гамильтона-Якоби.

Абсолютно твердое тело. Угловая скорость. Тензор инерции. Импульс, момент импульса и кинетическая энергия твердого тела. Уравнения движения твердого тела. Углы Эйлера. Функция Лагранжа твердого тела в потенциальном силовом поле.

Малые линейные колебания системы под действием потенциальных сил. Система линеаризованных уравнений Лагранжа и ее общее решение, характеристическое уравнение, собственные частоты. Нормальные координаты.

## **Молекулярная физика, статистическая физика и термодинамика**

Термодинамическая система. Статистический предельный переход. Термическое и калорическое уравнения состояния. Аддитивные и неаддитивные величины. Свойство термодинамической транзитивности. Квазистатистические процессы.

Первое и второе начала термодинамики. Химический потенциал. Теорема Карно. Удельная энтропия идеального газа.

Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Общие условия равновесия и устойчивости изолированной системы.

Третье начало термодинамики. Поведение энтропии и теплоёмкости вблизи абсолютного нуля температуры.

Термодинамические потенциалы. Свободная энергия, термодинамический потенциал Гиббса, термодинамический потенциал  $\Omega$ . Экстремальные свойства данных термодинамических потенциалов.

Энтальпия как термодинамический потенциал. Выражение для теплоёмкости при постоянном давлении через энтальпию.

Условия устойчивости системы по отношению к механическому и тепловому воздействию на неё.

Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

Фазовые переходы второго рода. Система уравнений Эренфеста.

Термодинамические свойства равновесного электромагнитного излучения. Закон Стефана-Больцмана и химический потенциал равновесного излучения.

Микроканоническое распределение Гиббса, условия его получения. Статистический вес и его связь с термодинамическими характеристиками системы.

Каноническое распределение Гиббса. Приближения, при которых оно получено. Понятие статистической суммы. Связь статистической суммы со свободной энергией термодинамической системы.

Большое каноническое распределение Гиббса. Связь большой статистической суммы с термодинамическим потенциалом  $\Omega$ .

Распределение Максвелла, его связь с каноническим распределением Гиббса и условия его применимости. Распределения для компоненты импульса и абсолютного значения скорости.

Представление чисел заполнения в квантовых системах одинаковых частиц. Выражения для средних чисел заполнения в идеальном ферми-газе и в идеальном бозе-газе.

Вырожденный нерелятивистский ферми-газ. Структура основного состояния. Значения импульса и энергии Ферми. Выражение для числа частиц сильно вырожденного ферми-газа через импульс Ферми.

Идеальный нерелятивистский бозе-газ. Структура основного состояния системы и явление бозе-конденсации.

Квазитермодинамическая теория флуктуаций. Вывод выражения для вероятности крупномасштабной флуктуации в равновесной изолированной системе с помощью микроканонического распределения.

Уравнение Смолуховского для марковского процесса и его физический смысл. Условия применимости к описанию броуновского движения.

Уравнение Фоккера-Планка. Физическая интерпретация этого уравнения в трёхмерном случае. Решение этого уравнения для случая свободной диффузии в одномерном случае.

Вывод уравнения Лиувилля для плотности вероятности в фазовом пространстве из уравнений Гамильтона для эволюции микроскопического состояния классической системы многих частиц.

Кинетическое уравнение с релаксационным членом вместо интеграла столкновений и его стационарное решение в первом порядке по параметру  $\tau$ .

Концепция самосогласованного поля в системах с дальним действием. Кинетическое уравнение Власова.

Кинетическое уравнение Больцмана. Физические ограничения на интеграл столкновений в системах типа газа с короткодействием.

$H$  – теорема Больцмана. Возникновение временной необратимости в статистическом описании. Парадокс Лошмидта.

## Электродинамика

Система уравнений Максвелла для электромагнитного поля в вакууме: физическое содержание, взаимосвязь уравнений. Условия замкнутости системы и постановка основной задачи электродинамики.

Закон сохранения энергии для электромагнитного поля в вакууме в интегральной и дифференциальной формах. Физическая интерпретация слагаемых в законе сохранения энергии. Плотность энергии электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга.

Потенциалы электромагнитного поля в вакууме. Калибровочная инвариантность. Уравнения для потенциалов при калибровках Лоренца и Кулона.

Электростатическое поле в вакууме. Уравнение Пуассона и его решение при заданных источниках. Мультипольное разложение потенциала электростатического поля. Потенциал и напряженность поля в электрическом дипольном и

квадрупольном приближении.

Магнитостатическое поле в вакууме. Условие стационарности токов. Мультипольное разложение для векторного потенциала магнитостатического поля. Магнитный дипольный момент токов и напряженность магнитного поля в дипольном приближении. Энергия магнитного поля локальной системы стационарных токов.

Плоские электромагнитные волны в вакууме и их свойства (закон дисперсии, соотношение между векторами напряженности поля, поляризация волны). Электромагнитное поле точечной заряженной частицы, движущейся по заданному закону. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Излучение электромагнитных волн заряженной частицей.

Электромагнитное излучение локальной системы зарядов и токов. Физические условия применимости мультипольного разложения в задаче об излучении. Потенциалы и векторы напряженности поля излучения в электрическом дипольном и магнитном дипольном приближениях. Энергетические характеристики излучения: интенсивность и угловое распределение интенсивности излучения.

Влияние собственного излучения на движение заряженной частицы. Уравнение Абрахама-Лоренца и формула Лоренца для силы радиационного трения. Проблема самодействия излучения заряженной частицы (самоускорение частицы). Приближение Ландау-Лифшица. Эффективная сила реакции излучения для заряженного гармонического осциллятора.

Постулаты специальной теории относительности. Преобразования Лоренца для координат и времени. Интервал. Относительная одновременность пространственно-разделенных событий (привести примеры). Релятивистская кинематика. Преобразование промежутка времени и длины геометрического отрезка.

Релятивистский закон сложения скоростей. Законы преобразования частоты и компонент волнового вектора электромагнитной волны. Закон преобразования угла, образованного волновым вектором и направлением скорости системы отсчета. Астрономическая абберация и релятивистский эффект Доплера.

Уравнение движения релятивистской заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле. Четырехмерные векторы скорости и ускорения частицы и их свойства. Энергия и импульс релятивистской частицы. Законы преобразования энергии и импульса частицы при преобразованиях Лоренца. Инвариантная масса.

Уравнения Максвелла в материальных средах. Векторы поляризации и намагнитченности среды, их физический смысл и связь с плотностью связанных зарядов и токов. Линеаризованные материальные уравнения для векторов электромагнитного поля в средах с пространственно-временной локальностью. Примеры эффектов, обусловленных каждым из слагаемых в линеаризованных материальных уравнениях.

Квазистационарное приближение и условия его применимости. Уравнения для переменного электромагнитного поля и тока в проводящих средах в

квазистационарном приближении. Скин-эффект на плоской границе проводника: глубина проникновения, пространственно-временная зависимость векторов поля и фазовые соотношения между ними внутри проводника.

Материальные уравнения для быстропеременного поля. Дисперсия диэлектрической проницаемости в модели Лоренца для разреженного одноэлектронного газа. Аналитические свойства комплексной диэлектрической проницаемости и физический смысл её мнимой части. Формулы Крамерса-Кронига.

Распространение электромагнитных волн в диспергирующих средах при учете поглощения. Комплексный волновой вектор и закон дисперсии. Связь коэффициента экстинкции и показателя преломления с вещественной и мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости для однородных волн. Фазовая и групповая скорости электромагнитной волны в диспергирующей среде.

## Оптика

Волновое уравнение. Бегущие электромагнитные волны. Скорость света в однородных изотропных диэлектриках. Плотность энергии и импульса электромагнитных волн. Вектор Умова-Пойнтинга. Интенсивность света. Давление света. Опыты Лебедева.

Модели оптического излучения. Волновые пучки и волновые пакеты. Монохроматические и квазимонохроматические волны, широкополосное излучение. Фурье-анализ и Фурье-синтез волновых полей. Спектральная плотность мощности. Соотношение между длительностью импульса и шириной спектра.

Интерференция монохроматических волн. Интерференция квазимонохроматического света. Функция видности. Основные интерференционные схемы. Получение интерференционных картин делением волнового фронта (метод Юнга) и делением амплитуды (метод Френеля). Полосы равной толщины и равного наклона. Интерферометр Майкельсона.

Временная когерентность, время и длина когерентности. Взаимосвязь спектра и корреляционной функции. Понятие о Фурье-спектроскопии. Пространственная когерентность.

Радиус и степень пространственной когерентности, их оценка для полей тепловых источников и лазеров. Методы повышения степени когерентности. Пространственные фильтры.

Многолучевая интерференция. Интерферометр Фабри-Перо. Формула Эйри. Пластика Люммера-Герке. Стоячие световые волны. Опыты Винера. Применение интерферометров в науке и технике: измерение малых смещений, рефрактометрия. Интерференционные фильтры и зеркала.

Явление дифракции. Приближение Френеля и приближение Фраунгофера. Пространственное преобразование Фурье. Дифракционная картина в дальней зоне как Фурье-образ дифракционного объекта. Угловой спектр, связь его ширины с

размерами отверстия. Дифракция Фраунгофера на щели, на прямоугольном и круглом отверстиях. Амплитудные и фазовые дифракционные решетки.

Дифракционная теория формирования изображений. Роль дифракции в приборах формирующих изображение: линзе, телескопе, микроскопе. Специальные методы наблюдения фазовых объектов: метод фазового контраста, метод темного поля.

Дисперсия света. Микроскопическая картина распространения света в веществе. Классическая электронная теория дисперсии. Зависимости показателей преломления и поглощения от частоты. Фазовая и групповая скорости, их соотношение (формула Рэлея). Нормальная и аномальная дисперсии показателя преломления.

Спектральный анализ в оптике. Спектроскопия с пространственным разложением спектров. Призмные, дифракционные и интерференционные спектральные приборы и их основные характеристики: аппаратная функция, угловая и линейная дисперсия, разрешающая способность, область дисперсии.

Поляризация света. Линейно-, циркулярно- и эллиптически-поляризованный свет. Математическое описание состояния поляризации. Поляризация естественного света.

Оптические явления на границе раздела изотропных диэлектриков. Формулы Френеля. Поляризация отраженной и преломленной волн. Угол Брюстера. Явление полного внутреннего отражения света и его применение.

Рассеяние света. Зависимость интенсивности рассеянного света от частоты света (формула Рэлея) и угловая диаграмма рассеяния. Спонтанное рассеяние Мандельштама-Бриллюена и комбинационное рассеяние, крыло линии Рэлея. Рассеяние света в мелкодисперсных и мутных средах.

Нелинейные оптические явления. Поляризация среды в поле высокоинтенсивного лазерного излучения. Среда с квадратичной нелинейностью. Генерация гармоник, оптическое детектирование. Фазовый синхронизм и его реализация. Среда с кубической нелинейностью. Самофокусировка волновых пучков. Вынужденное комбинационное рассеяние света.

## **Квантовая физика**

Гильбертово пространство. Базис. Унитарные, эрмитовы и проекционные операторы. Их физический смысл. Спектральное разложение эрмитова оператора. Теоремы о эрмитовых операторах и их собственных векторах.

Результаты измерения наблюдаемой. Матрица плотности, ее свойства. Чистое состояние. Описание чистого состояния с помощью вектора гильбертова пространства. Принцип суперпозиции.

Совместимые и несовместимые наблюдаемые. Полный набор наблюдаемых. Соотношение неопределенностей.

Представления Гайзенберга и Шредингера, связь между ними, формальные решения уравнений Гайзенберга и Шредингера. Интегралы движения, их физический смысл. Стационарные состояния.

Квантовая запутанность и отсутствие локального реализма. ЭПР-парадокс. Теорема и неравенства Белла. Квантовая телепортация.

Открытые квантовые системы. Диссипация и декогеренция. Уравнение Линдблада.

Общие свойства спектра при одномерном движении. Дискретный спектр, непрерывный спектр, кратность вырождения. Осцилляционная теорема. Движение волновых пакетов.

Потенциальная яма. Дискретный спектр и связанные состояния.

Коэффициенты отражения и прохождения. Туннельный эффект.

Частицы в периодическом потенциале. Теорема Блоха. Основы зонной теории.

Одномерный гармонический осциллятор. Стационарные состояния в координатном и импульсном представлениях. Когерентные состояния гармонического осциллятора.

Определение момента. Матричные элементы оператора момента. Спин. Орбитальный момент. Сложение моментов.

Стационарные состояния частицы в поле центрального потенциала. Уравнение Шредингера для атома водорода, вид и основные характеристики его решений. Квантовые числа.

Стационарная теория возмущений для невырожденного уровня. Условия применимости. Стационарная теория возмущений для вырожденного уровня.

Эффект Зеемана. Гамильтониан многоэлектронного атома в присутствии однородного магнитного поля. Фактор Ланде. Выражение для сдвига энергетических уровней атома водорода в слабом магнитном поле в рамках теории возмущений.

Эффект Штарка. Гамильтониан атома водорода в присутствии однородного электрического поля. Расщепление уровней атома водорода под действием электрического поля. Отличие эффекта Штарка в многоэлектронном атоме от эффекта Штарка в атоме водорода.

Многоэлектронный атом, приближение центрального поля, интегралы движения, конфигурация, термы. Диаграммы Юнга. Тонкая структура термов. Правила Хунда, их объяснение. Метод Хартри-Фока.

Принцип неразличимости тождественных частиц. Собственные значения оператора перестановки двух частиц. Бозоны и фермионы. Волновая функция  $N$  тождественных фермионов (бозонов). Базис в пространстве состояний  $N$  тождественных фермионов (бозонов). Свойства наблюдаемых для системы  $N$  тождественных частиц.

Постановка задачи об упругом рассеянии на потенциале  $V(\mathbf{x})$ . Амплитуда рассеяния, дифференциальное и полное сечение. Уравнение Липпмана-Швингера.

Борновский ряд и условия применимости первого борновского приближения. Парциальное разложение. Резонансы в рассеянии.

Нестационарная теория возмущений. Переходы мгновенные и адиабатические. Переходы под действием периодического возмущения. Золотое правило Ферми.

Вторичное квантование. Коммутационные соотношения для операторов рождения-уничтожения. Фоковское пространство. Базис в фоковском пространстве. Операторы в представлении вторичного квантования.

Квантование свободного электромагнитного поля излучения в кулоновской калибровке. Фотоны, их энергия, импульс, спин и спиральность.

Уравнение Дирака. Решения свободного уравнения Дирака с определенным импульсом и спиральностью. Нерелятивистский предел уравнения Дирака, уравнение Паули.

## **Ядерная физика**

Свойства атомных ядер. Опыт Резерфорда. Размеры ядер. Распределение заряда в ядре. Масса и энергия связи ядра. Стабильные и радиоактивные ядра. Квантовые характеристики ядерных состояний. Спин ядра. Статистические мультипольные моменты ядер.

Формула Вайцзеккера для энергии связи ядер. Объемная, поверхностная и кулоновская энергии. Зависимость удельной энергии связи стабильных ядер от массового числа. Выделение энергии при делении тяжелых ядер и в реакциях синтеза легких ядер.

Определение радиоактивности. Статистический характер распада. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Связь периода полураспада с постоянной распада. Естественная и искусственная радиоактивности.

Виды радиоактивного распада. Альфа-распад. Туннельный эффект. Зависимость периода альфа-распада от энергии альфа-частиц. Бета-распад. Экспериментальное доказательство существования нейтрино. Разрешенные и запрещенные бета-переходы. Несохранение четности в бета-распаде. Гамма-излучение ядер. Электрические и магнитные переходы. Ядерная изомерия. Внутренняя конверсия. Эффект Мессбауэра.

Ядерные реакции. Методы изучения ядерных реакций. Детекторы частиц. Принципы работы ускорителей. Законы сохранения в ядерных реакциях. Резонансные ядерные реакции. Формула Брейта - Вигнера.

Деление ядер. Деление изотопов урана нейтронами. Цепная реакция деления. Ядерные взрывы. Ядерные реакторы. Реакции синтеза легких ядер. Термоядерная энергия. Трансурановые элементы. Сверхтяжелые ядра.

Взаимодействие ядерного излучения с веществом. Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов. Пробеги заряженных частиц. Взаимодействие



нейтронов с веществом. Замедление нейтронов. Прохождение гамма-излучения через вещество. Биологическое действие излучения и защита от него.

Элементарные частицы. Систематика частиц. Фундаментальные частицы. Барионы и мезоны. Экспериментальные методы исследования структуры частиц. Ускорители. Встречные пучки. Пучки вторичных частиц. Детекторы. Реакции с частицами. Взаимодействия и распады частиц.

Вселенная. Свидетельства большого взрыва. Первые мгновения вселенной. Дозвездный синтез ядер. Барионная асимметрия. Звездная эра. Ядерные реакции в звездах.

## **V. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. И.И. Ольховский. Курс теоретической механики для физиков. М., Изд-во МГУ, 1978.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Механика. М., Физматлит, 2001.
3. Л.С. Кузьменков. Теоретическая физика. Классическая механика. М., Наука, 2015.
4. Ю.Г. Павленко. Лекции по теоретической механике. М., Физматлит, 2002.
5. В.Р. Халилов, Г.А. Чижов. Динамика классических систем. М., Изд-во МГУ, 1993.
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика. М., Наука, 1988.
7. Б.В. Петкевич. Теоретическая механика. М., Наука, 1989.
8. И.А.Квасников, Термодинамика и статистическая физика, том 1, теория равновесных систем, термодинамика. Изд. УРСС, М., 2002.
9. И.А.Квасников, Термодинамика и статистическая физика, том 2, теория равновесных систем, статистическая физика. Изд. УРСС, М., 2002.
10. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика. Изд. УРСС, М., 2021.
11. В.А. Алешкевич. Электромагнетизм. М., Физматлит, 2014.
12. В.И. Денисов. Введение в электродинамику сплошных сред. М., Изд-во МГУ, 1989.
13. А.Н.Матвеев. Электричество и магнетизм. М., Лань, 2010.
14. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля. М., Физматлит, 2018.
15. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М., Физматлит, 2005.
16. С.Г.Калашников. Электричество. М., Физматлит, 2003.
17. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Т.3., Физматлит, 2004.
18. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Современная электродинамика. Часть 1. Микроскопическая теория. – М., НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003.
19. Топтыгин И.Н. Современная электродинамика. Часть 2. Теория электромагнитных явлений в веществе. М., НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005.
20. Алешкевич В.А. ОПТИКА. М. "Физматлит". 2010.

21. Матвеев А.Н. ОПТИКА. М. "Высшая школа". 1985.
22. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. ОПТИКА. 3-е изд. М. "Физматлит". 2005.
23. Ландсберг Г.С. ОПТИКА. 5-е изд., М., "Наука". 1976.
24. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА. М. МГУ, 1998.
25. Борн М., Вольф В. ОСНОВЫ ОПТИКИ. М.. "Наука". 1970.
26. Крауфорд Ф. ВОЛНЫ. 3-е изд. М. "Наука".1984.
27. А.С. Давыдов. Квантовая механика. М., Физматгиз, 1973.
28. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. М., Физматлит, 2004.
29. О.Д. Тимофеевская, О.А. Хрусталева. Лекции по квантовой механике. М., URSS, 2017.
30. Д.И. Блохинцев. Основы квантовой механики. М., Наука, 1983.
31. А.А. Соколов, Ю.М. Лоскутов, И.М. Тернов. Квантовая механика. М., Просвещение, 1965.
32. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н.П. Юдин. Частицы и атомные ядра. Учебник. Изд. 4-е, испр. и доп., 2019.
33. И.М. Капитонов. Введение в физику ядра и частиц. Изд. 6-е. 2018.
34. В.И. Арнольд. Математические методы классической механики. М.: Едиториал УРСС, 2003.
35. В.В. Балашов, В.К. Долинов. Курс квантовой механики. М., РХД, 2001.
36. П.В. Елютин, Д.В. Кривченков. Квантовая механика с задачами. М.: Физматлит, 2000.
37. Б.И. Бутиков. Оптика. М., Высшая школа, 1986.