



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**(ФГБОУ ВО «ИГУ»)**



Утверждаю  
Проректор по учебной работе  
А.И. Вокин

**ПРОГРАММА**  
вступительного испытания для поступающих на обучение по  
программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в  
аспирантуре

**Научная специальность: 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных  
частиц, физика высоких энергий**

**Иркутск 2026**

## 1. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ

Программа предназначена для подготовки к вступительному испытанию для поступающих на обучение по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности «1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Целью вступительного испытания является оценка уровня освоения поступающим компетенций, необходимых для обучения научной специальности «3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий» по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

Поступающий должен изучить следующие разделы:

### Раздел 1. Механика

Понятия силы и массы. Законы Ньютона и принцип относительности Галилея.

Закон изменения и закон сохранения импульса системы материальных точек.

Лагранжева механика, Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа. Уравнения Лагранжа. Циклические координаты? Сформулируйте законы сохранения обобщенного импульса и обобщенной энергии. Симметрии. Теорема Нетер. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса.

Интегрирование уравнений движения. Одномерное движение, приведенная масса, движение в центральном поле. Движение в центрально-симметричном поле, интегралы движения.

Упругие столкновения и распад частиц, сечение рассеяния, формула Резерфорда.

Малые колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, колебания при наличии трения. Определение резонанса, примеры физических систем, в которых наблюдается резонанс. Колебания систем со многими степенями свободы, нормальные координаты.

Движение твердых тел. Угловая скорость, момент инерции и момент количества движения твердых тел. Эйлеровы углы и уравнения Эйлера.

Гамильтонова механика. Обобщенная энергия, построение функции Гамильтона из функции Лагранжа, примеры функции Гамильтона. Канонические уравнения движения, скобки Пуассона, действие как функция координат, теорема Лиувилля. Уравнение Гамильтона-Якоби.

Принцип относительности. Скорость распространения взаимодействий. Интервал, собственное время. Преобразование Лоренца. Пространство Минковского, релятивистская механика.

## Раздел 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 электромагнитного поля.

Действие для электромагнитного поля. Уравнения электромагнитного поля. 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 по плоским волнам, собственные колебания поля.

Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара—Вихерта. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на больших расстояниях. Мультипольное излучение. Рассеяние электромагнитной волны на свободных зарядах. Излучение быстро движущегося заряда. Излучение Вавилова – Черенкова, его спектр и амплитудно-угловые характеристики.

Движение частицы в гравитационном поле. Уравнения гравитационного поля. Тензор кривизны. Действие для гравитационного поля. Тензор энергии-импульса. Уравнения Эйнштейна.

Нерелятивистский предел уравнений Эйнштейна. Закон Ньютона. Центральносимметричное гравитационное поле. Метрика Шварцшильда. Гравитационный коллапс.

Наблюдаемые эффекты ОТО в ньютоновом и постньютоновом приближении (гравитационное красное смещение, отклонение луча света, задержка сигнала, прецессия гироскопа, прецессия орбит планет). Гравитационные линзы.

Релятивистская космология. Открытая, закрытая и плоская модели. Закон Хаббла. Расширение Вселенной на стадиях доминирования излучения, вещества и вакуума.

Физические процессы в ранней горячей Вселенной. Закалка нейтрино. Первичный нуклеосинтез. Рекомбинация, реликтовые фотоны. Темная энергия и темная материя.

## Раздел 3. Квантовая физика

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. Тождественность частиц. Вторичное квантование для бозонов и фермионов. Обменное взаимодействие.

Атом. Состояние электронов атома. Уровни энергии. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса—Ферми. Тонкая структура темных уровней. Периодическая система Менделеева.

Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения 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.

#### **Раздел 4. Статистическая физика**

Основные принципы статистической механики. Функция распределения и матрица плотности. Статистическая независимость. Теорема Лиувилля. Закон возрастания энтропии. Микроканоническое распределение, каноническое и большое каноническое распределения Гиббса.

Термодинамические величины. Температура. Работа и количество тепла. Первое и второе начала термодинамики. Теорема Нернста. Свободная энергия, химический потенциал, другие термодинамические потенциалы. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье.

Фазовые переходы и критические явления. Фазовые переходы второго рода, теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.

Распределение Максвелла-Больцмана. Термодинамика идеальных газов, теорема равномерного распределения. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ. Кинетическое уравнение Больцмана и его стационарное решение. H-теорема Больцмана.

Распределения Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Вырожденный идеальный ферми-газ. Идеальный ферми-газ, уравнение состояния и больцмановский предел. Вырожденный электронный газ и его термодинамика в нерелятивистском и ультрарелятивистском пределах. Роль вырожденного электронного газа в устойчивости гидростатического

равновесия звезды –белого карлика.

Законы излучения абсолютно черного тела. Распределение Планка и два его классических предела, термодинамика равновесного фотонного газа.

Твердые тела, колебания решетки, взаимодействие электронов с решеткой, фононы и другие квазичастицы. Модель Эйнштейна и модель Дебая теплоемкости твердого тела. Вырожденный бозе-газ, конденсация Бозе-Эйнштейна. Слабонеидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Квантовые вихри.

Сверхпроводимость. Куперовское спаривание. Теория Бардина—Купера—Шриффера (БКШ). Теория Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Джозефсона.

Системы различных частиц. Правило фаз. Слабые растворы. Смесь идеальных газов. Смесь изотопов. Химические реакции. Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Ионизационное равновесие.

## **Раздел 5. Стандартная Модель (квантовая теория полей)**

Лагранжиан уравнения движения свободных полей. Симметрии лагранжиана и теорема Нетер. Скалярные поля, уравнение Клейна-Гордона. Квантование свободных полей. Алгебра токов. Дискретные симметрии. Связь спина со статистикой, СРТ-теорема.

Калибровочная инвариантность как динамический принцип построения теории взаимодействия частиц и полей. Электродинамика как калибровочная теория, безмассовость фотона. Лагранжиан и уравнения классической электродинамики. Квантовая электродинамика. Правила Фейнмана. Расчеты процессов в квантовой электродинамике: комптон-эффект, тормозное излучение, рождение  $e^+e^-$ -пар.

Локальная неабелева симметрия  $SU(2)$ . Поля Янга-Миллса. Спонтанное нарушение симметрии, механизм Хиггса. Стандартная модель электрослабых взаимодействий. Общая структура лагранжиана электрослабого взаимодействия, свойства калибровочных бозонов, соотношения между константами связи частиц.

Соответствие между лептонами и кварками, число поколений. Необходимость смешивания кварков, матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Нарушение CP-инвариантности в распадах нейтральных каонов

Спектроскопия адронов, унитарная симметрия и адронные мультиплеты. Гипотеза кварков. Глубоко-неупругое рассеяние электрона на протоне, структурные функции. Кварк-партонная модель сильновзаимодействующих частиц, гипотеза цвета. Квантовая хромодинамика, кварки и глюоны, квантовое число “цвет”. Эффективный заряд в квантовой электродинамике и КХД. Асимптотическая свобода и конфайнмент.

## Раздел 6. Физика атомного ядра и элементарных частиц

Основные характеристики атомных ядер. Квантовые характеристики ядерных состояний.

Ядерные силы и их свойства. Модели ядер: модель оболочек, капельная модель, модель ферми-газа. Основные положения ядерной модели оболочек, эксперименты, подтверждающие оболочечную модель ядра. Одночастичные и коллективные возбуждения ядра.

Радиоактивные превращения ядер,  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -распад,  $\gamma$ -излучение. Резонансное поглощение  $\gamma$ -квантов ядрами, эффект Мессбауэра.

Деление и синтез ядер. Ядерная энергия. Реакторы. Ядерные реакции под действием  $\gamma$ -квантов, протонов, нейтронов и  $\alpha$ - частиц. Дейтрон и его свойства.

Ядерные взаимодействия при высоких энергиях. Взаимодействие ядерных частиц и  $\gamma$ -квантов с веществом, энергетические потери частиц при прохождении через вещество.

Космические лучи, прохождение космических лучей через атмосферу Земли.

Ядерные реакции в звездах и эволюции звезд. Реакции под действием нейтронов,  $r$ - и  $s$ -процессы, внутризвездный синтез химических элементов. Термоядерные реакции на Солнце, светимость и нейтринное излучение Солнца.

Элементарные частицы и их взаимодействия. Классификация частиц. Пространственно-временные симметрии (непрерывные и дискретные) и лоренц-инвариантность, внутренние симметрии и внутренние квантовые числа (спин, изоспин, лептонные числа, барионное число, аромат, цвет), законы сохранения.

Релятивистская квантовая механика электрона. Уравнение Дирака, нерелятивистский предел уравнения Дирака. Электрон в магнитном поле, спин электрона. Уравнение Вейля, двухкомпонентное нейтрино.

Феноменология слабых взаимодействий, теория Ферми. Несохранение  $P$ - и  $C$ -четности в слабых взаимодействиях.  $(V-A)$ -теория, структура слабых токов, слабый кварковый ток.

Слабые распады лептонов и адронов. Несохранение странности в слабых распадах, гипотеза Кабиббо. Гипотеза существования четвертого кварка, механизм Глэшоу-Илиопулоса-Майани подавления слабых распадов каонов. Заряженные и нейтральные лептонные и кварковые токи. Открытие  $W$ -,  $Z$ -бозонов и нейтральных токов. Экспериментальное подтверждение существования бозона Хиггса (125 ГэВ). Распады нейтральных каонов. Углы смешивания Кабиббо. Осцилляции странности, регенерация каонов. Матрица смешивания кварков Кабиббо-Кобаяши-Маскава.

Слабое взаимодействие. Слабые распады лептонов, мезонов и барионов. Феноменология электрослабых взаимодействий, процессы с заряженными и нейтральными токами.

Физика нейтрино: массы, смешивание, осцилляции. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах и ядрах.

Астрофизические источники нейтрино. Роль нейтрино в астрофизике высоких энергий. Солнечные нейтрино и нейтрино от сверхновых. Методы регистрации астрофизических нейтрино.

Сильное взаимодействие. Изотопическая инвариантность нуклон-нуклонных взаимодействий. Сильновзаимодействующие частицы – адроны (барионы, мезоны, резонансы) и ядра. Примеры сильных, слабых и электромагнитных распадов адронов. Спектроскопия адронов. Кварковая структура адронов. Цвет – сильный заряд кварков, глюоны как переносчики сильного взаимодействия кварков. Подтверждение существования цветовых степеней свободы кварков (и их дробных зарядов) в экспериментах по аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ .

Принципы и методы ускорения заряженных частиц. Методы детектирования частиц. Примеры уравнений движения релятивистской заряженной частицы в электромагнитном поле. Линейные и циклические ускорители элементарных частиц и ядер. Циклотронная частота, синхронное излучение. Ускорители на встречных пучках (коллайдеры). Большой адронный коллайдер.

Космические лучи и их взаимодействие с атмосферой Земли. Широкие атмосферные ливни. Результаты экспериментальных исследований энергетического спектра и элементного состава космических лучей. Наземные установки для исследования космических лучей.

## 2. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

### Основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Физматлит, 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.: Физматлит, 2001.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2001.
6. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.Г. Квантовая электродинамика. М.: Физматлит, 2001.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч. 1. М.: Физматлит, 2001.
8. Ю.Румер Ю.Б., Рыбкин С.М. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1971.
9. И.Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. М: Изд-во МГУ, 1991.

10. Кубо Р. Статистическая механика. М.: Мир, 1967.
11. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. 4.2. М.: Наука, 2000.
12. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Квантовые поля. М.: Наука, 1993.
13. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М.: Физматлит, 2001.
14. Вайнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975.
15. Пескин М. Е., Шредер Д.В. Введение в квантовую теорию поля. М.: Ижевск: РХД, 2001.
16. Окунь Л.Б. Кварки и лептоны. М.: Наука, 1990.
17. Петрина, Д. Я. Квантовая теория поля. - М. : Либроком, 2014.
18. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. В 2 т. М.: Мир, 1984.
19. Райдер Л. Элементарные частицы и симметрии. М.: Наука, 1983.
20. Клоуз Ф. Кварки и партонны. Введение в теорию. М. Мир, 1982
21. Хуанг К. Кварки, лептоны и калибровочные поля. М. Мир, 1985.
22. Ченг Т.-П, Ли Л.-Ф. Калибровочные теории в физике элементарных частиц. М.: Мир, 1987.

#### Дополнительная литература

1. Индурайн Ф. Квантовая хромодинамика. М.: Мир, 1986.
2. Райдер Л. Элементарные частицы и симметрии. М.: Наука, 1983.
3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. Т. 1. Физика атомного ядра. С-Петербург-Москва-Краснодар: Лань, 2016 г.
4. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. Т. 2. Физика ядерных реакций. С-Петербург-Москва-Краснодар: Лань, 2016.
5. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Т3. Физика элементарных частиц. С-Петербург-Москва-Краснодар: Лань, 2008.

### **3. ФОРМА ПРОВЕДЕНИЯ ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ**

Вступительное испытание проводится очно в устной форме по билетам. Длительность экзамена – 1,5 часа (90 минут). Экзаменационный билет включает три вопроса. Экзаменационные билеты выдаются каждому поступающему в аспирантуру членом экзаменационной комиссии с указанием в протоколе заседания экзаменационной комиссии содержания экзаменационного билета и даты приема вступительного экзамена. Индивидуальные экзаменационные листы подписываются каждым поступающим, а протокол заседания экзаменационной комиссии - председателем и членами экзаменационной комиссии. Итоговое количество баллов, присуждаемое членами комиссии каждому абитуриенту, зависит от знания и изложения материала по основным вопросам экзаменационного билета, а также от качества ответов абитуриента на дополнительные

вопросы, задаваемые членами экзаменационной комиссии. Уровень знаний поступающего оценивается экзаменационной комиссией по **100-балльной** шкале.

### **Критерии оценивания уровня знаний**

#### **90-100 баллов**

выставляется экзаменационной комиссией за обстоятельный, безошибочный ответ на все вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии. Поступающий в аспирантуру в процессе ответа на вопросы правильно определяет основные понятия, свободно ориентируется в теоретическом материале по предложенной тематике. Экзаменуемый показывает всестороннее, систематическое и глубокое знание материала; может объяснить взаимосвязь основных понятий; проявляет аналитические способности в понимании и изложении материала; проводит научные аналогии, экстраполирует знания на смежные области и практику, может поддерживать научную дискуссию. В ходе собеседования устанавливается высокая степень мотивированности к подготовке и защите кандидатской диссертации в период освоения программы аспирантуры. Кандидат осознает значимость работы и ее практическую ценность, обладает существенным научным заделом, включающим опубликованные статьи в научных изданиях и результаты выступлений на профильных конференциях.

#### **80-89 баллов**

выставляется экзаменационной комиссией за правильный и достаточно полный ответ на все вопросы экзаменационного билета и уточняющие вопросы членов экзаменационной комиссии. Поступающий правильно определяет основные понятия, хорошо ориентируется в теоретическом и практическом материале по предложенной тематике, может объяснить взаимосвязь основных понятий. Оценка может быть снижена в случае затруднений поступающего при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии, ответы содержат отдельные несущественные неточности. В ходе собеседования устанавливается достаточная степень мотивированности к подготовке и защите кандидатской диссертации в период освоения программы аспирантуры, имеется базовый научный задел по теме планируемого исследования (1 статья).

#### **70-79 баллов**

выставляется экзаменационной комиссией за верный в целом ответ на вопросы экзаменационного билета. При ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии поступающий испытывает затруднения, допускает неточности, при этом ответы производят положительное впечатление. В ходе собеседования устанавливается средняя степень мотивированности к подготовке и защите кандидатской диссертации в период освоения программы аспирантуры, больше обусловленная внешними факторами (получение ученой степени, отсрочки от армии), чем с внутренним интересом к научному исследованию.

#### **60-69 баллов**

выставляется поступающему в аспирантуру при недостаточно полном и ответе на вопросы экзаменационного билета и при возникновении серьезных затруднений при ответе на дополнительные вопросы членов экзаменационной комиссии. Экзаменуемый показывает знания основного материала в минимальном объеме, знаком с литературой, рекомендованной программой. Допускает существенные неточности в ответах, но обладает необходимыми знаниями для их устранения под руководством экзаменаторов. В ходе собеседования устанавливается низкая степень подготовленности поступающего в аспирантуру к проведению самостоятельных научных исследований (в том числе на основании анализа представленных индивидуальных достижений) по выбранной научной специальности; мотивация к подготовке кандидатской диссертации в период освоения программы аспирантуры низкая или совсем отсутствует.

#### **0-59 баллов**

выставляется в случае отсутствия или низкого качества ответа на вопросы экзаменационного билета. Экзаменуемый показывает пробелы в знаниях основного материала, не знает основных понятий в рамках Программы по выбранной научной специальности, не видит вопрос в целостном виде. Делает грубые существенные ошибки при ответах на вопросы билета, а также дополнительные вопросы комиссии, не может исправить допущенные ошибки самостоятельно. Кандидат демонстрирует низкую эмоциональную вовлеченность к подготовке и защите кандидатской диссертации в период освоения программы аспирантуры, не имеет четкого плана с этапами и сроками.

Минимальное количество баллов, подтверждающее успешное прохождение вступительного испытания – **60 баллов**, максимально возможное количество – **100 баллов**. Итоговое количество баллов за устный ответ присуждается абитуриенту в результате подсчета среднего арифметического количества баллов, предложенных каждым членом экзаменационной комиссии.

### **4. ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ**

1. Уравнения движения. Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа. Симметрии. Теорема Нетер. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса.
2. Распад частиц, упругие столкновения. Сечение рассеяния частиц, формула Резерфорда.
3. Малые, колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, параметрический резонанс. Колебания систем со многими степенями свободы, полярные координаты. Колебания при наличии трения.
4. Канонические уравнения, уравнение Гамильтона, скобки Пуассона, действие как

функция координат, теорема Лиувилля, уравнение. Гамильтона—Якоби, разделение переменных.

5. Преобразование Лоренца. Релятивистская механика.
6. Заряд в электромагнитном поле. Четырехмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, калибровочная (градиентная) инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля.
7. Уравнения электромагнитного поля. Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля.
8. Постоянное электрическое поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора.
9. 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.
10. Нормальная и аномальная дисперсия. Изобразите картину дисперсии, получаемую в скрещенных призмах. Получите в первом приближении теории дисперсии выражение для огибающей светового импульса и групповой скорости в диспергирующей среде.
11. Стандартная космологическая модель. Закон Хаббла. Расширение Вселенной на стадиях доминирования вакуума, излучения и вещества.
12. Физические процессы в ранней Вселенной. Закалка нейтрино. Первичный нуклеосинтез. Эпоха рекомбинация, реликтовые фотоны, реликтовые нейтрино.
13. Основные постулаты квантовой механики. Принцип неопределенности. Принцип суперпозиции. Операторы. Дискретный и непрерывный спектры. Гамильтониан. Стационарные состояния. Гейзенберговское представление. Соотношения неопределенности.
14. Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер.
15. Момент количества движения. Собственные функции и собственные значения момента количества движения. Четность. Сложение моментов. Разложение Клебша-Гордана.
16. Движение в центральном поле. Сферические волны. Разложение плоской волны. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.
17. Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени. Периодические возмущения. Квазиклассическая теория возмущений.
18. Спин. Оператор спина. Тонкая структура атомных уровней.
19. Тожественность частиц. Симметрия при перестановке частиц. Вторичное квантование для бозонов и фермионов. Обменное взаимодействие.

20. Атом. Состояние электронов атома. Уровни энергии. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса—Ферми. Тонкая структура атомных уровней. Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения в магнитном поле.
21. Столкновения частиц. Общая теория. Формула Бора. Резонансное рассеяние. Столкновение тождественных частиц. Упругое рассеяние при наличии неупругих процессов. Матрица рассеяния. Формула Брейта—Вигнера.
22. Принципы статистической механики. Функция распределения и матрица плотности. Уравнение и теорема Лиувилля. Закон возрастания энтропии. Микроканоническое распределение. Каноническое распределение Гиббса.
23. Термодинамические величины. Температура. Работа и количество тепла. Термодинамические потенциалы.
24. Термодинамика идеальных газов. Распределение Максвелла-Больцмана. Теорема равнораспределения.
25. Распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Законы излучения абсолютно черного тела. Распределение Планка и два его классических предела, термодинамика равновесного фотонного газа.
26. Твердые тела, колебания решетки, взаимодействие электронов с решеткой, фононы и другие квазичастицы. Модель Эйнштейна и модель Дебая теплоемкости твердого тела. Вырожденный бозе-газ, конденсация Бозе-Эйнштейна.
27. Идеальный ферми-газ, уравнение состояния и больцмановский предел. Вырожденный электронный газ и его термодинамика в нерелятивистском и ультрарелятивистском пределах. Роль вырожденного электронного газа в устойчивости гидростатического равновесия звезды —белого карлика.
28. Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.
29. Релятивистская квантовая механика электрона. Уравнение Дирака, нерелятивистский предел уравнения Дирака. Электрон в магнитном поле, спин электрона. Уравнение Вейля, двухкомпонентное нейтрино.
30. Квантовая электродинамика. Правила Фейнмана. Расчет сечений процессов рассеяния фотонов на электронах низких и высоких энергий (комpton-эффект и обратный комpton-эффект), рождения  $e^+e^-$ -пар, тормозного излучения.
31. Глубоконеупругое рассеяние электрона на протоне, структурные функции протона, кварк-партонная модель, бьеркеновский скейлинг.
32. Классификация элементарных частиц, мультиплеты частиц, симметрии и законы сохранения.
33. Ядерные взаимодействия при высоких энергиях. Взаимодействие ядерных частиц и  $\gamma$ -квантов с веществом, энергетические потери частиц при прохождении через вещество. Космические лучи, прохождение космических лучей через атмосферу Земли.

34. Термоядерные реакции на Солнце, светимость и нейтринное излучение Солнца. Оценка времени жизни Солнца.
35. КХД как калибровочная теория сильных взаимодействий, асимптотическая свобода и конфайнмент.
36. Сильное взаимодействие. Изотопическая инвариантность нуклон-нуклонных взаимодействий. Спектроскопия адронов. Кварковая структура адронов, цветовые степени свободы кварков, глюоны как переносчики сильного взаимодействия. Подтверждение существования цветовых степеней свободы кварков и дробных их зарядов кварков в экспериментах по аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ .
37. Феноменология слабых взаимодействий, теория Ферми,  $V-A$ -теория. Слабые распады лептонов, мезонов и барионов. Несохранение  $P$ - и  $C$ -четности в слабых взаимодействиях. Нарушение  $CP$ -инвариантности в распадах нейтральных каонов.
38. Физика нейтрино: дираковская и майорановская масса, смешивание, осцилляции.
39. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах и ядрах.
40. Астрофизические источники нейтрино. Нейтринное излучение Солнца. Методы регистрации астрофизических нейтрино.
41. Космические лучи, гамма-кванты высоких энергий и методы их регистрации.

Разработчики:



кандидат физ.-мат. наук, доцент И.А. Первалова