**Санкт-Петербургский государственный университет**

**Р А Б О Ч А Я П Р О Г Р А М М А**

**УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Теоретическая физика

Theoretical Physics

**Язык(и) обучения**

русский

Трудоемкость в зачетных единицах: 5

Регистрационный номер рабочей программы: 055770

**Раздел 1. Характеристики учебных занятий**

**1.1. Цели и задачи учебных занятий**

Проведение кандидатского экзамена по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика» по физико-математическим наукам.  
Проверка приобретенных обучающимися и соискателями ученой степени кандидата наук знаний, касающихся теоретической физики.

**1.2. Требования подготовленности обучающегося к освоению содержания учебных занятий (пререквизиты)**

Завершенное освоение учебных дисциплин и практик в рамках учебного плана.

**1.3. Перечень результатов обучения (learning outcomes)**

Проверка частичной сформированности компетенций:  
ОКА-1 Способность применять научный подход в своей профессиональной деятельности.  
ОКА-2 Способность работать с текстами профессиональной направленности и сообщать о результатах своей учебной и научной работы на английском/иностранном и русском языках.

**1.4. Перечень и объём активных и интерактивных форм учебных занятий**

Проведение кандидатского экзамена по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика» по физико-математическим наукам

**Раздел 2. Организация, структура и содержание учебных занятий**

**2.1. Организация учебных занятий**

**2.1.1 Основной курс**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Трудоёмкость, объёмы учебной работы и наполняемость групп обучающихся | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Код модуля в составе дисциплины,  практики и т.п. | Контактная работа обучающихся с преподавателем | | | | | | | | | | | | Самостоятельная работа | | | | Объём активных и интерактивных  форм учебных занятий | Трудоёмкость |
| лекции | семинары | консультации | практические  занятия | лабораторные работы | контрольные работы | коллоквиумы | текущий контроль | промежуточная  аттестация | итоговая аттестация | под руководством преподавателя | в присутствии  преподавателя | сам. раб. с использованием  методических материалов | текущий контроль (сам.раб.) | промежуточная аттестация (сам.раб.) | итоговая аттестация  (сам.раб.) |
| ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Форма обучения: очная | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4й год обучения |  |  | 2 |  |  |  |  |  | 2 |  |  |  | 176 |  |  |  | - | 5 |
|  |  |  | 1-10 |  |  |  |  |  | 1-1 |  |  |  | 1-1 |  |  |  |  |  |
| ИТОГО |  |  | 2 |  |  |  |  |  | 2 |  |  |  | 176 |  |  |  |  | 5 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Виды, формы и сроки текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации | | | | | | |
| Код модуля в составе дисциплины, практики и т.п. | Формы текущего контроля успеваемости | | Виды промежуточной аттестации | | Виды итоговой аттестации  (только для программ итоговой аттестации и дополнительных образовательных программ) | |
| Формы | Сроки | Виды | Сроки | Виды | Сроки |
| ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ | | | | | | |
| Форма обучения: очная | | | | | | |
| 4й год обучения |  |  | экзамен, устно, традиционная форма | По графику промежуточной аттестации |  |  |

**2.2. Структура и содержание учебных занятий**

Общая часть

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Наименование темы (раздела, части) | Вид учебных занятий | Количество часов |
| 1 | Теоретическая механика | по методическим материалам | 33 |
| 2 | Электродинамика | по методическим материалам | 33 |
| 3 | Квантовая механика | по методическим материалам | 33 |
| 4 | Статистическая физика и термодинамика | по методическим материалам | 33 |

Специализированная часть

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Наименование темы (раздела, части) | Вид учебных занятий | Количество часов |
| Блок 1 | Квантовая механика атомов, молекул и конденсированных сред | по методическим материалам | 44 |
| Блок 2 | Квантовая теория поля и физика элементарных частиц |
| Блок 3 | Статистическая физика и термодинамика |
| Блок 4 | Специальные главы квантовой теории рассеяния и классической механики |

**Раздел 3. Обеспечение учебных занятий**

**3.1. Методическое обеспечение**

**3.1.1 Методические указания по освоению дисциплины**

Не предусмотрено.

**3.1.2 Методическое обеспечение самостоятельной работы**

Литература из списка информационного обеспечения

**3.1.3 Методика проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации и критерии оценивания**

Экзамен проводится в форме кандидатского экзамена в устной форме по билетам в присутствии членов экзаменационной комиссии. Билет состоит из четырех вопросов: один вопрос из общей части и три вопроса из специализированной части. Обучающийся может самостоятельно выбрать блоки специализированной части, в рамках которых ему будут предложены вопросы билетов. Также обучающемуся может быть задан вопрос по теме научно-исследовательской работы. На подготовку ответа обучающемуся дается 2 часа. Ответ обучающегося экзаменационной комиссии продолжается 2 часа.

Критерии оценивания кандидатского экзамена:

1. знание определений, физических понятий, формулировок и доказательств утверждений
2. знание фактического материала
3. владение необходимым математических аппаратом
4. критическое и самостоятельное изложение материала
5. способность отвечать на дополнительные вопросы по программе экзамена.

Система оценивания кандидатского экзамена

Оценка «отлично» выставляется в том случае, если:

1. дан исчерпывающий ответ на поставленные вопросы билета
2. даны ответы на дополнительные вопросы
3. продемонстрировано наличие глубоких знаний в рамках программы экзамена
4. безошибочно использован математический аппарат
5. решены поставленные задачи.

Оценка «хорошо»:

1. дан достаточно полный ответ на поставленные вопросы билета
2. даны ответы на большую часть дополнительных вопросов
3. продемонстрировано наличие полных знаний в рамках программы экзамена
4. в целом верно использован математический аппарат
5. поставленные задачи решены частично.

Оценка «удовлетворительно»:

1. дан ответ на поставленные вопросы билета
2. даны ответы на отдельные дополнительные вопросы
3. продемонстрировано наличие знаний в рамках программы экзамена
4. использование математического аппарата содержит неточности
5. поставленные задачи решены лишь в целом.

Оценка «неудовлетворительно»:

1. не дан ответ на поставленные вопросы билета
2. не даны ответы ни на один дополнительный вопрос
3. продемонстрирована недостаточность знаний в рамках программы экзамена
4. использование математического аппарата содержит грубые ошибки
5. поставленные задачи не решены.

**3.1.4 Методические материалы для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации (контрольно-измерительные материалы, оценочные средства)**

Примерный список вопросов

1. Общая часть
2. Теоретическая механика
3. Движение системы материальных точек при наложенных связях. Классификация связей, обобщенные координаты. Принцип виртуальных работ и принцип Даламбера. Уравнения Лагранжа 2-го рода, их вывод из принципа Даламбера. Функция Лагранжа. Силы трения и диссипативная функция Рэлея.
4. Принцип наименьшего действия (принцип Гамильтона–Остроградского), вывод уравнений Лагранжа 2-го рода из этого принципа. Функция Лагранжа и законы сохранения, циклические координаты. Теорема Нетер.
5. Свободные малые колебания в системах со многими степенями свободы. Аппроксимация функции Лагранжа в окрестности положения равновесия. Уравнения движения и их решение. Собственные частоты и собственные векторы колебаний. Нормальные координаты.
6. Кинематика абсолютно твердого тела. Описание вращений: углы Эйлера. Теорема Эйлера о произвольном перемещении твердого тела с одной неподвижной точкой. Угловая скорость и ее свойства. Кинематические уравнения Эйлера. Движение в неинерциальной системе отсчета. Вращательное, осестремительное и кориолисово ускорение.
7. Динамика абсолютно твердого тела: кинетическая энергия вращения, тензор инерции, главные оси и главные моменты инерции, эллипсоид инерции. Теорема Штейнера. Момент импульса, его связь с угловой скоростью.
8. Динамические уравнения Эйлера для волчка. Стационарность и устойчивость свободного вращения несимметричного волчка. Регулярная прецессия свободного симметричного волчка.
9. Канонические уравнения Гамильтона, вывод с помощью преобразования Лежандра. Функция Гамильтона. Сохранение обобщенной энергии. Фазовое пространство. Теорема Лиувилля о сохранении фазового объема.
10. Скобки Пуассона и их свойства. Фундаментальные скобки. Тождество Якоби. Скобки Пуассона и интегралы движения, теорема Пуассона. Интегральный инвариант Пуанкаре–Картана, интеграл Пуанкаре.
11. Канонические преобразования. Производящие функции различных типов, связь между ними. Примеры канонических преобразований: тождественные преобразования, замена координат на импульсы и импульсов на координаты, точечное преобразование.
12. Действие как производящая функция канонического преобразования, вывод уравнения Гамильтона–Якоби, его полный интеграл, теорема Якоби. Разделение переменных в уравнении Гамильтона–Якоби: случай стационарной функции Гамильтона, случай циклических координат, другие случаи разделения переменных.
13. Периодические движения типа колебания и вращения, соответствующие фазовые траектории, сепаратрисы. Пример: плоский маятник. Переменные действие – угол, вычисление частот колебаний. Пример: анизотропный пространственный осциллятор.
14. Электродинамика
    1. Преобразования Лоренца: определение, общие свойства, световой конус. Тензора на группе Лоренца. Ковариантные и контравариантные векторы. Тензорные свойства координаты, производной, метрического тензора и символа Кронекера. Свертки, верхние и нижние индексы, опускание и поднятие индексов.
    2. Релятивистски-ковариантная формулировка уравнений Максвелла для потенциалов и напряженностей. Поперечность, калибровочная инвариантность и ковариантная запись уравнения непрерывности.
    3. Электродинамика с позиций теоретической механики сплошной среды. Лагранжиан, действие, уравнения Максвелла как уравнения Эйлера. Инварианты полей.
    4. Теоретическая механика сплошной среды: тензор энергии-импульса для произвольного поля. Физический смысл его компонент, законы сохранения энергии и импульса. Симметризация тензора энергии-импульса.
    5. Тензор энергии-импульса в электродинамике. Плотность энергии и плотность потока энергии. Симметризация тензора энергии-импульса. Уравнение баланса энергии и импульса при наличии внешнего источника.
    6. Релятивистский лагранжиан свободной частицы. Её импульс и энергия. Четырехмерная скорость, четырехмерный импульс. Лагранжиан взаимодействия точечной релятивистской частицы с внешним полем. Уравнения движения заряженной точечной частицы во внешнем поле. Сила Лоренца. Ковариантная запись уравнений движения.
    7. Уравнения электро- и магнитостатики. Калибровочная инвариантность в статике. Общее решение уравнения Пуассона для потенциалов. Внутренняя согласованность такого решения для векторного потенциала.
    8. Мультипольное разложение для скалярного потенциала. Малый параметр. Мультипольные моменты, их тензорные свойства, преобразование при сдвиге начала координат. Мультипольное разложение для векторного потенциала в магнитостатике. Дипольный магнитный момент произвольной системы токов.
    9. Свободные и связанные заряды в диэлектриках и магнетиках. Вектора поляризации Р намагниченности М. Выражение связанных зарядов через поляризацию. Уравнения электростатики для диэлектриков. Выражение связанных токов через намагниченность. Уравнения магнитостатики для магнетиков. Условия сшивания на границе двух сред для диэлектриков и магнетиков.
    10. Динамика: свободные поля, плоские волны. Калибровка излучения. Решение свободного волнового уравнения для потенциалов и для напряженностей.
    11. Построение функции Грина уравнения Пуассона с помощью преобразования Фурье. Запаздывающая функция Грина волнового уравнения. Формальное решение, доопределение, явное выражение.
    12. Явное выражение для запаздывающей функции Грина волнового оператора. Запаздывающие потенциалы для произвольных источников. Потенциалы произвольно движущегося точечного заряда (потенциалы Льенара-Вихерта).
15. Квантовая механика
16. Математический аппарат квантовой механики. Гильбертово пространство. Операторы в Гильбертовом пространстве и соотношения между ними (равенство, сумма, произведение, коммутатор, антикоммутатор). Спектр линейного самосопряженного оператора. Регулярная точка и точка спектра. Собственные числа. Дельта-функция Дирака и ее свойства.
17. Основные положения квантовой механики. Физические величины и операторы. Квантование. Среднее значение физической величины. Состояние, в котором физическая величина имеет определенное значение. Волновая функция, случай дискретного и сплошного спектров. Теория представлений. Координатное и импульсное представления. Чистые и смешанные состояния. Статистический оператор и его спектр. Матрица плотности. Уравнение Шредингера. Оператор эволюции. Представления Шредингера, Гейзенберга, представление взаимодействия. Квантовое уравнение Лиувилля.
18. Простейшие модели в квантовой механике. Прямоугольная потенциальная яма. Прямоугольный потенциальный барьер. Туннельный эффект. Надбарьерное отражение. Гребенка Дирака. Периодический потенциал. Теорема Блоха. Гармонический осциллятор. Частица в однородном электрическом поле.
19. Момент количества движения. Орбитальный момент количества движения. Спиновый момент количества движения. Матрицы Паули.
20. Движение в центральном поле. Сферически-симметричная потенциальная яма. Движение в кулоновском поле.
21. Связь квантовой механики с классической механикой. Теоремы Эренфеста. Квазиклассическое приближение. Квазиклассические условия квантования.
22. Квазирелятивистская теория. Уравнение Дирака. Уравнение Паули. Магнитный момент электрона. Спин-орбитальное взаимодействие. Зарядовое сопряжение.
23. Теория возмущений. Стационарные возмущения. Эффект Зеемана. Эффект Штарка. Нестационарные возмущения.
24. Квантовая теория рассеяния. Эффективное сечение рассеяния. Амплитуда рассеяния. Борновское приближение. Метод парциальных волн в теории рассеяния. Фазовые сдвиги. S-матрица. Свойства S-матрицы в комплексной плоскости k. Закон распада квазистационарного состояния, теорема Фока-Крылова.
25. Задача многих тел. Выделение движения центра инерции на примере системы двух частиц. Атом водорода, спектр энергии, волновая функция. Двухатомная молекула. Разделение движения тяжелых и легких частиц в адиабатическом приближении.
26. Система тождественных частиц. Принцип Паули.
27. Многоэлектронные системы. Метод Хартри-Фока. Двухэлектронные системы, атом He, молекула водорода. Химическая связь и направленная валентность. Метод функционала плотности. Теорема Хоенберга-Кона. Уравнения Кона-Шема.
28. Квантовая теория поля. Квантование скалярного поля с использованием плоских волн, сведение к системе невзаимодействующих осцилляторов. Квантование свободного электромагнитного поля (сведение к поперечному полю, аналогия со скалярным полем).

4. Статистическая физика и термодинамика

4.1. Основные представления классической статистической механики

4.1.1. Фазовое пространство. Статистическое распределение. Связь средних по времени и по ансамблю. Понятия подсистемы, статистической независимости, радиуса корреляции.

4.1.2. Среднеквадратичные флуктуации аддитивных величин.

4.1.3. Эволюция физических величин и функции распределения. Уравнение Лиувилля.

4.2. Классическая теория равновесных состояний

4.2.1. Энтропия. Определение, основные свойства.

4.2.2. Равновесные распределения, роль энергии.

4.2.3. Эргодическая гипотеза. Микроканоническое распределение, связь с термодинамикой.

4.2.4. Каноническое распределение, связь с термодинамикой.

4.2.5. Вывод канонического распределения из микроканонического (теорема Гиббса о каноническом распределении).

4.2.6. Большое каноническое распределение. Связь с термодинамикой.

4.2.7. Изотермо-изобарический ансамбль.

4.2.8. Экстремальные свойства ансамблей Гиббса.

4.2.9. Первое начало термодинамики. Основные термодинамические потенциалы и их естественные переменные.

4.2.10. Зависимость термодинамических величин от чисел частиц. Соотношение Гиббса-Дюгема.

4.2.11. Соотношения между производными термодинамических величин.

4.2.12. Теорема о малых добавках.

4.2.13. Эквивалентность статистических ансамблей. Основное термодинамическое соотношение в статистической физике.

4.3. Неидеальные газы

4.3.1. Неидеальный газ. Вириальное разложение, второй вириальный коэффициент, область применимости вириальных разложений.

4.3.2. Общий вид вириального разложения давления, представление коэффициентов разложения в виде диаграмм.

4.3.3. Термодинамика процесса Джоуля-Томпсона. Определение знака теплового эффекта процесса с использованием выражения для второго вириального коэффициента.

4.3.4. Неидеальный газ с кулоновским взаимодействием. Метод Дебая-Хюккеля.

4.4. Теория флуктуаций

4.4.1. Флуктуационные теоремы в ансамблях Гиббса (связь флуктуаций с термодинамическими величинами), зависимость флуктуаций от числа частиц.

4.4.2. Функция распределения флуктуаций. Одномерное Гауссово распределение.

4.4.3. Распределение Гаусса для многих переменных. Вычисление производящей функции, теорема Вика.

4.4.4. Функция распределение флуктуаций энергии и числа частиц в большом каноническом ансамбле.

4.5. Квантовая статистика

4.5.1. Основные положения квантовой механики. Понятие чистого и смешанного состояний.

4.5.2. Уравнение Неймана для матрицы плотности.

4.5.3. Правила соответствия квантовой и классической статистик.

4.5.4. Равновесные квантовые ансамбли.

4.5.5. Идеальный газ с внутренними степенями свободы. Газ с постоянной теплоемкостью.

4.5.6. Закон равнораспределения.

4.5.7. Одноатомный идеальный газ.

4.5.8. Двухатомный идеальный газ, учет колебаний и вращений.

4.5.9. Распределения Ферми и Бозе.

4.5.10. Ферми и Бозе газы элементарных частиц.

4.5.11. Ферми-газ при низких температурах.

4.5.12. Бозе-газ при низких температурах. Конденсация Бозе-Эйнштейна.

4.5.13. Равновесное излучение.

4.5.14. Твердые тела при низких температурах.

4.5.15. Твердые тела при высоких температурах.

4.5.16. Интерполяционная формула Дебая.

1. Специализированная часть
2. Квантовая механика атомов, молекул и конденсированных сред
3. Квантование свободных полей. Классическое электромагнитное поле. Уравнения Максвелла. Квантование свободного электромагнитного поля в кулоновской калибровке. Квантование в калибровке Лоренца. Индефинитная метрика. Пространство Фока для фотонов. Фотонный пропагатор. Массивное векторное поле. Квантование электрон-позитронного поля. Пространство Фока для фермионов. Электронный пропагатор.
4. Взаимодействующие поля. Электромагнитное взаимодействие. Основные уравнения квантовой электродинамики взаимодействующих полей в представлении Гейзенберга. Свойства физических состояний. In- и out-поля и асимптотическая теория. S-матрица. Редукционные формулы для фотонов и электронов.
5. Теория возмущений. Представление взаимодействия. Теория возмущений для функций Грина. Теорема Вика. Правила Фейнмана. Теорема Фарри. Расходимости в диаграммах Фейнмана. Перенормировка массы и заряда. Квантовая электродинамика при наличии внешнего поля. Представление Фарри. Теория возмущений для функций Грина в картине Фарри.
6. КЭД теория связанных состояний атома. Двухвременные функции Грина. Спектральное представление и аналитические свойства. Вывод формулы для сдвига энергии одиночного уровня. Теория возмущений в случае вырождения. Определение уровней энергии и волновых функции атома. Уравнение шредингеровского типа. Квазивырожденные состояния. Двухэлектронный многозарядный ион. Приводимые и неприводимые диаграммы. Вывод формул для поправок к энергии в первом и втором порядках теории возмущений.
7. Вероятности переходов и эффективные сечения процессов рассеяния. Общие выражения для вероятностей и сечений. Оптическая теорема. Редукционные формулы. Излучение фотона атомом. Рассеяние фотона атомом. Рекомбинация электрона с многозарядным ионом. Резонансное рассеяние. Квазипотенциал. Резонансное приближение. Формализм правых и левых векторов. Форма спектральной линии.
8. Эффекты несохранения четности в атомных системах. Учет эффектов несохранения пространственной четности в вероятности переходов в атомных системах. Вывод основных соотношений для электрического дипольного момента электрона в водородоподобных ионах в накопительных кольцах.
9. Квантовая теория многоэлектронных систем. Волновая функция многоэлектронной системы. Чистое спиновое состояние. Шредингеровская координатная функция, три условия Фока. Редуцированные матрицы плотности. Вариационный принцип для одного состояния и для группы состояний.
10. Метод Хартри-Фока. Однодетерминантная волновая функция, многодетерминантная волновая функция. Одноконфигурационный метод Хартри-Фока. Нелинейность уравнений Хартри-Фока. Ускорение сходимости процесса самосогласования. Учет корреляционных эффектов. Метод многоконфигурационного самомсогласованного поля.
11. Локализованные орбитали в твердом теле. Функции Ваннье идеального кристалла. Методы локализации орбиталей многоатомной системы. Вывод уравнений Адамса-Гильберта для локализованных орбиталей из вариационного принципа для энергии. Двухатомные орбитали связи. Кластерное разложение матрицы плотности и энергии ионных систем.
12. Кулоновский эмбеддиг. Электростатический потенциал точечной решетки. Регуляризация расходящихся рядов. Метод Эвальда. Построение элементарной ячейки решетки с нулевыми мультипольными моментами.
13. Пакет MOLCAS. Задание входной информации. Расчет одноэлектронных и двухэлектронных интегралов. Одноконфигурационный ССП метод, ограниченный и неограниченный варианты. Многоконфигурационный MKССП метод, ограниченный и полный наборы активных орбиталей. Многоконфигурационная теория возмущений второго порядка. Визуализация результатов расчета.

Блок 2. Квантовая теория поля и физика элементарных частиц

* 1. Симметрии действия для теории поля. Теорема Нётер. Интегралы движения. Тензор и вектор энергии-импульса. Пример скалярного поля и спинорной электродинамики.
  2. Квантование поля как системы с бесконечным числом степеней свободы. Канонические коммутационные соотношения. Пространство Фока. Квантование свободного скалярного поля.
  3. Бозоны и фермионы. Связь спина со статистикой. Функции Уайтмана и функции Грина. T-упорядочивание. Запаздывающая и опережающая функции Грина для уравнения Клейна-Гордона. Разновременной коммутатор полей. Евклидов поворот.
  4. Нормальное упорядочивание. Теоремы Вика. Функции Грина свободной теории.
  5. Взаимодействующие поля. Физический вакуум. Представления Гейзенберга и Шредингера, представление взаимодействия. Асимптотические in и out состояния. Редукционная формула Лемана-Симантика-Циммермана.
  6. Теория возмущений для функций Грина. Фейнмановская диаграммная техника, симметрийные коэффициенты.
  7. Идея процедуры перенормировки. Построение контрчленов, нормировочные условия, точка нормировки. Константы перенормировки, физические и голые параметры и поля.
  8. Квантование электромагнитного поля в кулоновской калибровке. Определение физических состояний поляризации фотона. Процедура канонического квантования. Определение пространства состояний. Тензор энергии-импульса фотона. Положительность оператора энергии. Оператор спина.
  9. Основные положения теории квантованного поля Дирака. Уравнение Дирака и его решение. Лагранжиан спинорного поля. Глобальная калибровочная инвариантность. Законы сохранения. Квантование по Ферми-Дираку. Операция зарядового сопряжения. Частицы и античастицы и решение проблемы существования вакуума для спинорного поля. Антикоммутаторы полей в импульсном и координатном представлении.
  10. Квантовая электродинамика как теория взаимодействия электромагнитного и спинорного полей. Принцип локальной калибровочной инвариантности. Принцип минимальности взаимодействия. Лагранжиан квантовой электродинамики и законы сохранения. Квантовая электродинамика как простейшая теория с локальной калибровочной инвариантностью.
  11. Теорема Голдстоуна. Явление Хиггса. Общий вид лагранжиана электрослабой теории. Нарушение пространственной чётности слабыми взаимодействиями. Матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава.
  12. Классический лагранжиан квантовой хромодинамики. Квантование КХД. Производящий функционал для функций Грина. Духи Фаддева-Попова. Выбор калибровки.
  13. Преобразование Бекки-Рюэ-Стора-Тютина. Тождества Славнова-Тейлора. Перенормировка КХД.
  14. Ренормгруппа. Уравнение Каллана-Симманчика, инвариантный заряд и аномальные размерности. Бета-функция в КХД. Асимптотическая свобода.
  15. Классификация элементарных частиц и их взаимодействий. Понятие изоспина и унитарная симметрия. Кварковая модель. Понятие адронного резонанса.
  16. Сечение рассеяния, ширина распада и фазовый объем. Релятивистская кинематика двухчастичных реакций рассеяния и распада на две частицы.

Блок 3.

* 1. Статистическая теория жидкостей и поверхностных явлений

3.1.1. Формализм частичных функций распределения в каноническом и большом каноническом ансамблях.

3.1.2. Цепочка уравнений ББГКИ. Суперпозиционное приближение.

3.1.3. Производящие свойства большого термодинамического потенциала.

3.1.4. Корреляционные функции как функциональные производные.

3.1.5. Флуктуационные теоремы. Уравнение Орнштейна-Цернике.

3.1.6. Интегральные уравнения теории жидкости (гиперцепное приближение и уравнение Перкуса-Йевика).

3.1.7. Интегральный метод функционала плотности. Градиентный метод функционала плотности.

3.2. Основы статистического описания неравновесных систем

3.2.1. Цепочка уравнений для неравновесных функций распределения.

3.2.2. Уравнение самосогласованного поля Власова.

3.2.3. Линеаризованное уравнение Власова. Тензор проводимости плазмы.

3.2.4. Продольные плазменные колебания. Затухание Ландау.

3.2.5. Уравнение Фоккера-Планка для броуновских частиц.

3.2.6. Уравнение Ланжевена.

3.2.7. Вывод уравнения Фоккера-Планка из уравнения Ланжевена.

3.2.8. Решение уравнения Фоккера-Планка на кинетической стадии.

3.2.9. Метод Энскога-Чепмена решения кинетических уравнений на гидродинамической стадии.

3.2.10. Метод Энскога-Чепмена применительно к уравнению Фоккера-Планка.

3.2.11. Вывод Боголюбова кинетического уравнения Больцмана. Интеграл столкновений. H - теорема Больцмана. Получение законов сохранения числа частиц и импульса из уравнения Больцмана.

3.2.12. Метод проектирующих операторов Цванцига. Кинетическое уравнение Пригожина – Браута. Квантовое уравнение баланса.

3.2.13. Кинетическое уравнение Беккера – Дёринга – Зельдовича – Френкеля и кинетика нуклеации.

3.2.14. Кинетическое уравнение Смолуховского. Коагуляция, агрегация и фрагментация.

* 1. Гидродинамика как завершающая стадия неравновесного процесса

3.3.1. Уравнения Эйлера движения идеальной жидкости (феноменологический вывод). Волновое уравнение. Звуковые волны.

3.3.2. Уравнение Навье-Стокса движения вязкой жидкости, вязкое затухание звуковых волн.

3.3.3. Законы сохранения для плотностей аддитивных интегралов движения. Микроскопические выражения для плотностей сохраняющихся величин и их потоков.

3.3.4. Гипотеза локального равновесия, вывод на ее основе уравнений движения идеальной жидкости.

3.3.5. Решение уравнения Фоккера-Планка на гидродинамической стадии методом проектирующих операторов.

3.3.6. Общая схема перехода от микроописания к уравнению Ланжевена методом проектирующих операторов.

3.3.7. Вывод статистических выражений для сдвиговой и объемной вязкостей.

3.3.8. Низкочастотная дисперсия гидродинамических коэффициентов переноса.

3.4. Основы статистического описания развитой турбулентности

3.4.1. Безразмерные параметры, характеризующие течение жидкости (газа).

3.4.2. Неустойчивость ламинарного течения при больших числах Рейнольдса. Сценарий Ландау перехода к турбулентному режиму.

3.4.3. Основные положения теории Колмогорова развитой турбулентности.

3.5. Распространение электромагнитных волн в случайно неоднородной среде

3.5.1. Итерационное решение волнового уравнения в среде с флуктуирующей диэлектрической проницаемостью. Диаграммное представление решения.

3.5.2. Теория возмущений для среднего поля. Уравнение Дайсона, затухание среднего поля за счет рассеяния (экстинкция).

3.5.3. Описания рассеянной волны в борновском приближении.

3.5.4. Эйкональное приближение. Сверхэкспоненциальное затухание поля в нематических жидких кристаллах.

3.6. Теория критических явлений.

3.6.1. Феноменологическое описание фазовых переходов 2-го рода.

3.6.2. Теория среднего поля Ландау.

3.6.3. Гидродинамическое приближение. Критерий Гинзбурга.

3.6.4. Преобразование Каданова. Блочные гамильтонианы.

3.6.5. Гауссово приближение.

3.6.6. Вильсоновская ренормализационная группа, неподвижные точки, критические поверхности, критические индексы.

3.6.7. Гауссова неподвижная точка.

3.6.8. 4- разложение теории 4.

3.6.9. Связь вильсоновской и квантово-полевой ренормализационных групп.

3.6.10. Универсальность критического поведения. Составные операторы.

3.6.11. 4- и 1/n - разложения.

3.6.12. Универсальные отношения и скейлинговые функции.

3.6.13. Сингулярности скейлинговых функций. Операторное разложение Вильсона.

3.6.14. Голдстоуновские сингулярности. Инфракрасная теория возмущений.

3.7. Диаграммные разложения в равновесной статистической физике

3.7.1. Майеровская диаграммная техника.

3.7.2. 1-я и 2-я теоремы Майера.

3.7.3. Вириальные разложения.

3.7.4. Решеточные модели. Модели ферромагнетика Изинга и Гайзенберга.

3.7.5. Высокотемпературное разложение.

3.7.6. Фазовый переход в магнетике. Высокотемпературные оценки параметров перехода.

3.7.7. Низкотемпературное разложение. Аппроксиманты Паде.

3.7.8. Понятие о функциональном интеграле. Функциональные интегралы в статистической физике.

3.7.9. Теория возмущений.

3.7.10. Метод стационарной фазы. Петлевое разложение.

3.7.11. Уравнения Швингера. Уравнения самосогласования.

3.7.12. Первое преобразование Лежандра. 1-неприводимые функции Грина.

3.7.13. Стохастические уравнения Ланжевена. Диаграммная техника.

3.7.14. Производящий функционал корреляционных функций в динамических системах.

3.7.15. Теоретико-полевая теория сверхпроводимости и сверхтекучести

3.8. Теория квантовых жидкостей

3.8.1. Квантовые системы многих частиц. Понятие о квантовой жидкости.

3.8.2. Основные положения теории нейтральной ферми-жидкости.

3.8.3. Равновесные свойства нейтральной ферми-жидкости.

3.8.4. Кинетические уравнения для квазичастиц нейтральной ферми-жидкости.

3.8.5. Колебания нейтральной ферми-жидкости. Нулевой звук.

3.8.6. Спиновые возбуждения в нейтральной ферми-жидкости.

3.8.7. Основные положения теории вырожденной электронной жидкости.

3.8.8. Спиновые волны в парамагнитных металлах.

3.8.9. Основные положения теории квантовой бозе-жидкости.

3.8.10. Гидродинамика сверхтекучей бозе-жидкости.

3.8.11. Квантовые функции Грина в задаче многих тел.

3.8.12. Определение квазичастиц в квантовой жидкости.

3.8.13. Метод функций Грина для неравновесных систем.

3.8.14. Кинетические уравнения в теории нормальной ферми-жидкости.

3.9. Теория магнитных наносистем

3.9.1. Экспериментальные методы исследования наносистем.

3.9.2. Гигантское магнитосопротивление.

3.9.3. Метод модельных гамильтонианов.

3.9.4. Приближение среднего поля.

3.9.5. Самосогласованные расчеты в модели Андерсона.

3.9.6. Неколлинеарный магнетизм коллективизированных электронов.

3.9.7. Магнитные фазовые переходы.

3.9.8. Теория переходного состояния для магнитных степеней свободы.

3.9.9. Энергетическая поверхность магнитных наносистем.

3.9.10. Уравнение Ландау – Лифшица для магнитных моментов.

3.9.11. Методы расчета путей с минимальным перепадом энергии.

3.9.12. Магнитные пружины.

3.10. Кинетика фазовых переходов первого рода

3.10.1. Уравнение Беккера-Дёринга-Зельдовича-Френкеля в конечно-разностной форме.

3.10.2. Соотношения детального равновесия.

3.10.3. Работа образования зародыша возникающей фазы.

3.10.4. Термодинамическое нахождение работы образования зародыша возникающей фазы.

3.10.5. Свободномолекулярный режим обмена веществом между каплей и паром. Коэффициент конденсации.

3.10.6. Диффузионный режим обмена веществом между каплей и паром. Стационарный и автомодельный режимы.

3.10.7. Уравнение Зельдовича-Френкеля в дифференциальной форме. Граничные условия к уравнению.

3.10.8. Стационарное распределение зародышей стабильной фазы. Скорость нуклеации.

3.10.9. Стадии фазовых переходов первого рода.

3.10.10. Стадия переконденсации. Переменные Лифшица-Слезова описания зародышей стабильной фазы.

3.11.Термодинамика гетерогенной нуклеации

3.11.1. Гомогенный и гетерогенный механизмы нуклеации.

3.11.2. Химический потенциал конденсата и работа образования капли.

3.11.3. Термодинамические характеристики нуклеации в допороговой и предпороговой области пересыщений пара.

3.11.4. Кинетика преодоления активационного барьера гетерогенной нуклеации.

3.11.5. Работа смачивания нерастворимого ядра.

3.11.6. Расклинивающее давление жидкой пленки конденсата.

3.11.7. Аппроксимации работы смачивания ядра.

3.11.8. Общие закономерности конденсации на нерастворимых макроскопических ядрах.

3.11.9. Активационный барьер гетерогенного зародышеобразования на ионах и его асимметрия к знаку ионов.

3.11.10. Конденсация на растворимых ядрах поверхностно-инактивного вещества.

3.11.11. Система уравнений термодинамики при адсорбции вещества ядра конденсации на поверхности капли.

3.11.12. Общие закономерности конденсации на растворимых ядрах поверхностно-активных веществ.

Блок 4. Специальные главы квантовой теории рассеяния и классической механики

4.1. Нестационарная постановка задачи рассеяния, волновые операторы. Свойства волнового оператора: изометричность, сплетающее свойство, полнота. Оператор рассеяния и его свойства.

4.2. Стационарная постановка задачи рассеяния, резольвента и волновые операторы в стационарной постановке.

4.3. Метод Хольцмарка-Факсена для решения задачи рассеяния на центральном потенциале. Парциальные волны, парциальное уравнение Шредингера, диагональность представления для парциальной S-матрицы.

4.4. Многоканальная задача рассеяния для парциальных волн, S-матрица и асимптотические состояния рассеяния, преобразование Кэли и K-матрица.

4.5. Метод интегральных уравнений в теории рассеяния. Интегральные уравнения для состояний рассеяния и Т-матрицы.

4.6. Квантовая задача рассеяния для системы трех частиц. Уравнения Фаддеева для компонент Т-матрицы. Уравнения для компонент волновых функций в интегральной и дифференциальной форме.

4.7. Матричный оператор Фаддеева и свойства его спектра, связь со спектром гамильтониана.

4.8. Операторы перехода, интегральные уравнения для операторов перехода.

4.9. Квантовая задача рассеяния для N частиц. Постановка задачи, каналы рассеяния, интегральные и дифференциальные уравнения для компонент волновых функций и Т-матриц.

4.10. Кулоновская задача рассеяния. Волновые операторы Долларда. Метод расщепления дальнодействующих потенциалов.

4.11. Вычислительные подходы к решению задачи рассеяния:

метод сепарабельных потенциалов (квазичастиц), метод штурмовских базисов для интегральных уравнений. Метод комплексных вращений для нахождения резонансов и состояний рассеяния. Метод тензорных представлений для дискретизованных дифференциальных уравнений Фаддеева для системы трех частиц

4.12. Суперинтегрируемые системы классической и квантовой механики. Система Кеплера-Кулона и другие примеры, замкнутость траекторий, вырождение спектра, квадратичные алгебры интегралов движения.

4.13. Алгебро-геометрические методы исследования интегрируемых систем. Представление Лакса, метод классической r-матрицы, уравнение Янга-Бакстера, спиновые цепочки и другие  квантовые модели.

4.14. Дискретизация интегрируемых систем, симплектические интеграторы, интегрируемые отображения и их связь с современной криптографией.

**3.1.5 Методические материалы для оценки обучающимися содержания и качества учебного процесса**

Не предусмотрено.

**3.2. Кадровое обеспечение**

**3.2.1 Образование и (или) квалификация штатных преподавателей и иных лиц, допущенных к проведению учебных занятий**

Экзамен принимает экзаменационная комиссия, утвержденная в установленном порядке.

**3.2.2 Обеспечение учебно-вспомогательным и (или) иным персоналом**

Не предусмотрено.

**3.3. Материально-техническое обеспечение**

**3.3.1 Характеристики аудиторий (помещений, мест) для проведения занятий**

Не предусмотрено.

**3.3.2 Характеристики аудиторного оборудования, в том числе неспециализированного компьютерного оборудования и программного обеспечения общего пользования**

Не предусмотрено.

**3.3.3 Характеристики специализированного оборудования**

Не предусмотрено.

**3.3.4 Характеристики специализированного программного обеспечения**

Не предусмотрено.

**3.3.5 Перечень и объёмы требуемых расходных материалов**

Бумага, А4, 10 листов на человека.

**3.4. Информационное обеспечение**

**3.4.1 Список обязательной литературы**

1. И.И. Ольховский, Курс теоретической механики для физиков, изд-во МГУ, 1978.  
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Механика, «Наука», 1988.   
3. Г. Голдстейн, Классическая механика, Физматгиз, 1975.  
4. Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев, Введение в нелинейную физику, «Наука», 1988.  
5. Г.Л. Коткин и В.Г. Сербо, Сборник задач по классической механике, «Наука», 1977.  
6. И.И. Ольховский, Ю.Г. Павленко, Л.С. Кузьменков, Задачи по теоретической механике для физиков, изд-во МГУ, 1977.  
7. А. Мессиа "Квантовая механика", Т.1,Т.2, М., Наука, 1978.  
8. А.С. Давыдов "Квантовая механика", М., Физ.Мат.лит., 1963.  
9. В.А. Фок "Начала квантовой механики", М., Наука, 1976.  
10. З. Флюгге "Задачи по квантовой механике", Т.1,Т.2, М., Мир, 1974.  
11. А.Н.Васильев. Краткий курс лекций по классической электродинамике. Изд-во СПбГУ, 2006, БХВ-Петербург, 2010.   
12. Ю.В.Новожилов и Ю.А.Яппа. Электродинамика. Изд-во «Наука», М., 1978.  
13. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля. (Теоретическая физика, т. 2) Изд-во «Наука», М., 1988.  
14. Н.Н.Боголюбов, Д.В.Ширков "Введение в теорию квантованных полей", М., Наука, 1984 г.   
15. С.Вайнберг "Квантовая теория поля", т. 1-3, М., Мир, 2001 г.   
16. К.Ициксон, Ж.-Б.Зюбер " Квантовая теория поля", т. 1-2, М., Мир, 1984 г.   
17. М.Пескин, Д.Шрёдер "Введение в квантовую теорию поля", Ижевск, Изд. Удмуртского университета, 2001 г.   
18. А.А.Славнов, Л.Д.Фаддеев "Введение в квантовую теорию калибровочных полей", М., Наука, 1988 г.   
19. М.Б.Волошин, К.А.Тер-Мартиросян "Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц", М., Энергоатомиздат, 1984 г.   
20. Ф.Индурайн "Квантовая хромодинамика", М., Мир, 1986 г.   
21. Ф. Хелзен, А. Мартин “Кварки и лептоны: введение в физику частиц” – М.: Мир, 1987.  
22. Васильев А.Н. Квантовополевая ренормгруппа в теории критического поведения и стохастической динамике. Из-во Петербургского ин-та ядерной физики. СПб. 1998.  
23. Ландау Л.Д.. Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть1. М., 5-е изд., 1995, 613с.  
24. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. М., Мир. 1978.  
25. Куни Ф.М. Статистическая физика и термодинамика. М.,Наука. 1981.  
26. Зубарев Д.Н. Неравновесная статистическая термодинамика. М.,Наука. 1971.  
27. Дж.Уленбек, Дж.Форд. Лекции по статистической механике. М.,Мир. 1966.  
28. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М., 6-е изд., испр., 2004,797с.  
29. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. 6-е издание, М., 2006 , 736с. («Теоретическая физика», том VI).  
30. Терлецкий Я.П. Статистическая физика. М.,Высшая школа. 1966.  
31. Куни Ф.М., Аджемян Л.Ц. Метод Энскога-Чепмена в теории неравновесных явлений. Изд-во СПбГУ. 1998.  
32. Ма Ш. Современная теория критических явлений. М. 1980.  
33. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М. 1982.  
34. Васильев А.Н. Функциональные методы в квантовой теории поля и статистике. Л. 1976.

**3.4.2 Список дополнительной литературы**

1. В.Г. Невзглядов, Теоретическая механика, Физматгиз, 1959.  
2. В.И. Арнольд, Математические методы классической механики, «Наука», 1989.  
3. Ф.Р. Гантмахер, Лекции по аналитической механике, «Наука», 1966.  
4. А.П. Маркеев, Теоретическая механика, «Наука», 1990.  
5. Ю.Г. Павленко, Лекции по теоретической механике, изд-во МГУ, 1991.  
6. Е.С. Пятницкий, Н.М. Трухан, Ю.И. Ханукаев, Г.Н. Яковенко, Сборник задач по аналитической механике, «Наука», 1996.  
7. И. фон Нейман "Математические основы квантовой механики", М., Наука, 1964.  
8. П.А.М. Дирак "Принципы квантовой механики", М., Физ.Мат.лит., 1960.  
9. Г. Бете "Квантовая механика", М., Мир, 1965.  
10. Л.Д. Фаддеев, О.А. Якубовский "Лекции по квантовой механике для студентов- математиков", Л., Изд.Лен.Унив., 1980.  
11. Г.Ф. Друкарев "Квантовая механика", Л., Изд.Лен.Унив., 1988.  
12. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц "Квантовая механика", М., Наука, 1963.  
13. В.М. Галицкий, Б.М.Карнаков, В.И.Коган "Задачи по квантовой механике", М., Наука, 1992.  
14. М.И. Петрашень, Е.Д.Трифонов "Применение теории групп в квантовой механике", М., Наука, 1967.  
15. Дж. Джексон. Классическая электродинамика. Изд-во «Мир», М., 1965.  
16. К.Хуанг "Кварки, лептоны и калибровочные поля", М., Мир, 1985 г.   
17. Дж.Коллинз "Перенормировка", М., Мир, 1983 г.   
18. А.Н.Васильев "Функциональные методы в квантовой теории поля и статистике", Л., Изд. ЛГУ, 1976 г.   
19. А.Н.Васильев "Квантовополевая ренормгруппа в теории критического поведения и стохастической динамике", СПб., Изд. ПИЯФ, 1998 г.   
20. Ю.В. Новожилов "Введение в теорию элементарных частиц", М., Наука, 1972 г.   
21. В.А. Рубаков. Классические калибровочные поля. Бозонные теории. М., УРСС, 2005.   
22. В.А. Рубаков. Классические калибровочные поля. Теории с фермионами. Некоммутативные теории. М., УРСС, 2005.  
23. Brezin E., Le-Guillou J.C., Zinn-Justin J. Phase Transitions and Critical Phenomena. N.Y. 1976, v. 6.  
24. Коллинз Дж. Перенормировка. М. 1988.  
25. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: 1962.   
26. Каданов Л., Бейм Г. Квантовая статистическая механика. М.: 1964.   
27. Кондратьев А.С., Кучма А.Е. Лекции по теории квантовых жидкостей. Л.: 1989.   
28. Ландау Л.Д. Собрание трудов. т. 1, 2. М.: 1969.   
29. Пайнс Д., Нозьер Ф. Теория квантовых жидкостей. М.: 1967.   
30. Паттерман С. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. М.: 1978.   
31. Силин В.П. Электромагнитные волны в металлах и теория электронной жидкости. Физика металлов и металловедение, т. 33, с. 681, 1970.   
32. Халатников И.М. Теория сверхтекучести. М.: 1971. 1. Зельдович Я.Б. ЖЭТФ, 1942, т.12, с.525.  
33. Куни Ф.М., Русанов А.И. Теор. и мат. физика. 197О, т.2, с.265.  
34. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Изд-во "Химия", 1967, Л.  
35. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. 1958, М.  
36. Лифшиц Е.М., Питаевский Л..П. Физическая кинетика. Изд-во "Наука", 1979, М.  
37. Лифшиц И.М., Слезов В.В. ЖЭТФ. 1958, т.35, N 2  
38. Слезов В.В., Шикин В.Б. Физика твердого тела. 1964, т.6, вып.1.   
39. F.M. Kuni, A.K.Shchekin, A.I.Rusanov, and B.Widom. Advances in Colloid and Interface Science, 1996, v.65, p.71-124.

**3.4.3 Перечень иных информационных источников**

Не предусмотрено.

**Раздел 4. Разработчики программы**

Андреев Олег Юрьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры квантовой механики, o.y.andreev@spbu.ru   
  
Пастон Сергей Александрович, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики высоких энергий и элементарных частиц, s.paston@spbu.ru  
  
Щекин Александр Кимович, д.ф.-м.н., профессор кафедры статистической физики, akshch@list.ru  
  
Яковлев Сергей Леонидович, д.ф.-м.н., профессор кафедры вычислительной физики, s.yakovlev@spbu.ru