

**ДС.В.00 Дисциплины специализации устанавливаемые вузом.**

**Специализация «Теоретическая физика»**

### **Квантовая теория рассеяния**

**Рассеяние бесспиновых частиц**

Оператор эволюции в представлении взаимодействия. S-матрица, T-матрица. Сечение рассеяния. Амплитуда рассеяния. Уравнение Липпмана-Швингера. Связь амплитуды рассеяния с потенциалом. Функция Грина свободной частицы. Унитарность S-матрицы. Оптическая теорема и ее следствия. Борновский ряд. Диаграммы Фейнмана. Первое борновское приближение. Рассеяние на составной структурной мишени. Формфактор.

**Рассеяние частиц со спином**

Формализм спина  $S=1/2$ . T-матрица и потенциал взаимодействия частиц спина  $1/2$  с бесспиновой мишенью. Инвариантность относительно инверсии системы отсчета. Наблюдаемые следствия сохранения четности в экспериментах с поляризованными частицами. Матрица амплитуд. Вычисление сечения рассеяния, суммирование и усреднение по спинам.

Смешанные состояния. Статистический оператор. Матрица плотности чистого и смешанного состояний. Спиновая матрица плотности (поляризационная матрица). Частичная поляризация частиц.

Рассеяние частиц со спинами  $1/2$  и  $0$ . Матрица плотности рассеянных частиц. Сечение рассеяния. Поляризационные эксперименты. Лево-правая асимметрия. Поляризация частиц в конечном состоянии.

**Аналитические свойства S - матрицы**

Разложение по парциальным волнам. Диагональность S-матрицы. Парциальные амплитуды и сечения. Фазовые сдвиги. Парциальные состояния рассеяния.

Аналитические свойства радиальных волновых функций в комплексной  $p$ -плоскости. Регулярное решение. Функция Юста и S-матрица. Аналитическое продолжение, аналитические свойства функции Юста и S-матрицы. Нули функции Юста, полюсы S-матрицы и связанные состояния.

Резонансное рассеяние. Резонансы и полюсы S-матрицы, поведение сечения и фаз рассеяния. Листы Римановой поверхности S-матрицы. Особые точки на Римановой поверхности.

Симметрия и расположение особенностей матрицы рассеяния на комплексной  $p$ -плоскости. Физические эффекты, связанные с виртуальным состоянием. Теорема Левинсона.

Асимптотическое поведение амплитуд рассеяния и фазовых сдвигов. Длина рассеяния. Эффективный радиус. Время задержки частицы в области взаимодействия.

## **МЕТОД ФУНКЦИОНАЛОВ ВЛИЯНИЯ**

Проблема описания составных систем в квантовой теории. Метод функционального интегрирования в современной квантовой теории и перспективы его приложения к описанию сложных систем.

Выражения наблюдаемых в квантовой теории через оператор эволюции. Интегралы по траекториям. Определение функциональных интегралов для описания эволюции систем. Модели квантования. Симметричное квантование по Вигнеру. Построение ядер операторов для симметричного квантования. Функциональный интеграл для квантовой системы в фазовом и конфигурационном пространствах.

Метод вторичного квантования для бозонов и фермионов. Выражения для наблюдаемых величин в голоморфном представлении, посредством функциональных интегралов.

Составные системы в квантовой теории. Определение функционала влияния для описания подсистем. Квадратичный функционал влияния. Функционал влияния гармонического осциллятора. Функционал влияния термостата. Функционал влияния электромагнитного поля. Цепочка уравнений Н.Н. Боголюбова и функционал влияния. Функционал влияния и эволюция систем с памятью. Квазиклассические методы вычисления функционала влияния.

## **РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА**

Квантовое релятивистское уравнение для частиц без спина.

Математические свойства и физическая интерпретация уравнения Клейна-Гордона. Проблема вероятностной интерпретации и отрицательных энергий. Частицы и античастицы. Спектр релятивистской заряженной частицы в кулоновском поле ядра.

Релятивистское волновое уравнение Дирака. Свойства  $\gamma$  матриц и ковариантная форма уравнения Дирака. Спиноры свободных частиц. Нерелятивистский предел уравнения Дирака для электрона во внешнем электромагнитном поле. Уравнение Дирака для фермионов с нулевой массой. Уравнение Дирака для электрона во внешнем электромагнитном поле. Локальная калибровочная инвариантность уравнения Дирака. Релятивистская теория рассеяния в борновском приближении. Кинематика релятивистских столкновений, сечение рассеяния и инвариантная амплитуда.

Описание поляризаций фотонов и электронов. Пропагатор фотона и электрона. Фейнмановские правила в электродинамике частиц спина  $\frac{1}{2}$ . Калибровочная инвариантность амплитуд рассеяния. Суммирование по поляризациям фотонов и электронов. Правила диаграммной техники Фейнмана.

Компьютерные методы расчета амплитуд процессов рассеяния. Пакет **FeynCalc**. Расчет элементарных процессов рассеяния фотонов и электронов:  $eZ \rightarrow eZ$ ,  $e\mu \rightarrow e\mu$ ,  $ee \rightarrow ee$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,  $e\gamma \rightarrow e\gamma$ ,  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $e^+e^-$ .

## ТЕОРИЯ ГРУПП И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Конечные группы. Комплексы. Подгруппы. Классы смежности. Теорема Лагранжа. Сопряженные элементы, классы, нормализатор. Инвариантные подгруппы. Фактор - группа  $G/H$ . Центр группы. Взаимные отображения групп. Изоморфизм, гомоморфизм. Теорема о ядре гомоморфизма. Автоморфизм и эндоморфизм. Прямое и полупрямое произведение групп. Простые и полупростые группы. Накрывающая группа. Коммутатор. Совершенные группы. Разрешимые и нильпотентные группы. Группа перестановок. Теорема Кэли.

Группы движений. Транзитивность и интранзитивность. Инвариантная подгруппа точки. Однородные пространства группы движений. Классические матричные группы  $SO(n)$ ,  $SU(n)$ ,  $SL(n, R)$ ,  $SL(n, C)$ ,  $SO(p, q)$ ,  $SU(p, q)$ ,  $Sp(2n, R)$ . Группа трехмерных вращений. Изоморфизм трехмерной группы вращений и фактор - группы  $SU(2)/Z_2$ . Двумерная сфера  $S^2$  как фактор - пространство  $SU(2)/U(1)$ . Дробно - линейные преобразования и их свойства. Модель Пуанкаре плоскости Лобачевского. Сфера Лобачевского. Модель Клейна плоскости Лобачевского. Эллиптическая, гиперболическая и параболическая подгруппы группы  $SU(1, 1) \approx SO(2, 1)$ . Однородные пространства группы Лоренца  $SO(3, 1) \approx SL(2, C)$ .

Топологические группы. Связность и  $n$  - связность. Группа путей. Фундаментальная группа. Компактные, некомпактные и локально - компактные группы. Группы Ли. Алгебры Ли. Структурные константы. Теоремы о связи между алгебрами и группами Ли. Ряд Кэмпбелла - Хаусдорфа. Локальный изоморфизм. Универсальная накрывающая группа. Векторные поля на многообразии. Скобка Пуассона векторных полей. Производные Ли. Поля Киллинга. Форма Киллинга. Классификация комплексных простых алгебр Ли.

Точные и неточные представления. Эквивалентные представления. Характер представления. Инвариантный вектор представления. Инвариантное подпространство. Приводимые, вполне приводимые и неприводимые представления. Унитарные представления. Регулярное и квазирегулярные представления. Лемма Шура. Инвариантные операторы. Операторы Казимира. Унитарные представления групп Ли. Тензорные (кронекеровские) произведения представлений и их разложения по неприводимым представлениям. Представления групп  $SU(2)$ ,  $SL(2, C)$ ,  $SU(3)$ ,  $SU(1, 1)$ . Коэффициенты Клебша - Гордона.

Симметрия и интегралы движения. Симметрия и вырождение уровней энергии. Правила отбора. Теоретико - групповая классификация стационарных состояний квантовых систем. Симметрии молекул и твердого тела. Теорема Крамерса. Группы симметрий в физике высоких энергий.

Метод индуцирования Макки. Малая группа. Метод ковариантных функций. Представления группы  $E(2)$ . Группа Пуанкаре. Релятивистские

уравнения движения. Физическая группа Галилея и нерелятивистская квантовая механика. Правило суперотбора по массе.

Симметрия уравнений. Динамическая симметрия гармонического осциллятора, ротатора, атома водорода. Алгебры генерирующие спектр. Квантовые системы с линейной группой динамической симметрии и оператор эволюции. Суперсимметрия в квантовой физике.

### **Классические поля и принципы симметрии**

Определение группы. Свойства основной групповой операции. Подгруппа. Элементарная классификация групп.

Группа Ли. Группы  $U(1)$  и  $SU(2)$  как примеры групп Ли. Изоморфизм и гомоморфизм групп. Группы линейных преобразований векторных пространств и их матричная реализация.

Компактные и некомпактные группы Ли. Группа сдвигов 3-мерного евклидова пространства как пример некомпактной группы Ли.

Линейное представление группы. Приводимые и неприводимые представления. Унитарные представления. Генераторы группы Ли. Алгебра Ли группы Ли. Экспоненциальная форма операторов линейного унитарного представления группы Ли в векторном пространстве.

Прямое произведение групп. Абелева группа Ли как прямое произведение линейных унитарных представлений группы  $U(1)$ . Алгебра Ли группы  $SU(2)$ . Связные и несвязные группы Ли. Односвязные и многосвязные группы Ли. Двухсвязность группы  $SO(3)$ . Условие разложимости группы Ли в прямое произведение групп. Подалгебра Картана. Ранг группы Ли.

Пространство Минковского. Преобразование системы отсчета. Преобразования Лоренца и Пуанкаре. Свойства преобразований Лоренца и их классификация. Группа Лоренца, ее подгруппы и связные компоненты. Группа Пуанкаре, ее подгруппы и связные компоненты. Параметризация собственной ортохронной группы Лоренца. Пространственные и гиперболические повороты системы отсчета и матрицы соответствующих преобразований Лоренца.

Пространство полевых функций. Лагранжиан системы полей. Ограничения, налагаемые на лагранжиан. Представления группы Пуанкаре в пространстве полевых функций. Тензоры, псевдотензоры и спиноры. Вариационный принцип стационарного действия для системы полей. Полевые уравнения как уравнения Лагранжа-Эйлера. Теорема Нетер. Сохраняющиеся токи и динамические инварианты системы полей. Тензоры энергии-импульса, момента импульса, орбитального момента и спинового момента поля. Закон движения центра инерции поля.

Внутренние симметрии системы полей. Группы  $U(1)$  и  $SU(N)$  как группы внутренних симметрий системы полей. Представления групп  $U(1)$  и  $SU(N)$  в пространстве полевых функций. Динамические инварианты полей, связанные с внутренними  $U(1)$ - и  $SU(N)$ - симметриями.

## **Классическая теория калибровочных полей**

Теория свободных скалярного и векторного полей: выбор лагранжиана; динамические инварианты в импульсном представлении и их интерпретация.

Теория свободного электромагнитного поля: ковариантная форма записи уравнений Максвелла; калибровочное преобразование 4-потенциала; условие Лоренца; условие поперечности; переход к локальному реперу в 4-мерном импульсном пространстве; условие Лоренца и динамические инварианты в импульсном представлении.

Теория свободного спинорного поля: уравнение Дирака; матрицы Дирака и их свойства; трансформационные свойства спиноров; уравнения Дирака в импульсном представлении и трансформационные свойства спинорных амплитуд; ортонормированные биспиноры и их свойства. Лагранжев формализм и динамические инварианты свободного спинорного поля. Переход в выражениях для динамических инвариантов к амплитудам состояний с определенными спиральностями. Спинорное поле с нулевой массой.

Общие принципы построения лагранжианов взаимодействия. Принцип локальной калибровочной инвариантности. Структура динамических инвариантов системы полей.

Модели теории поля с локальной  $U(1)$ -симметрией. Электромагнитное поле как калибровочное. Минимальное электромагнитное взаимодействие.

Модели теории поля с локальной  $SU(N)$ -симметрией. Калибровочные поля Янга-Миллса. Хромодинамика – калибровочная теория сильных взаимодействий кварковых полей.

Самодействующие скалярные поля и спонтанное нарушение симметрии. Модель Хиггса. Массивные поля Янга-Миллса.

Единая теория электромагнитного и слабого взаимодействий: группа  $SU(2) \times U_1(1)$  как калибровочная группа; свойства калибровочных полей; электрослабое взаимодействие лептонных и кварковых полей; спонтанное нарушение симметрии и генерация масс лептонов, кварков и бозонов; структура полного лагранжиана и классификация процессов электрослабого взаимодействия.

## **Квантовая теория поля**

Функции поля как локальные операторы. Трансформационные свойства полевых операторов и векторов состояний. Законы преобразования векторов состояний и полевых операторов при собственных ортохронных преобразованиях Пуанкаре. Операторы полей в картинах Шредингера и Гейзенберга.

Основной постулат квантования полей.

Физический смысл положительно– и отрицательно- частотных частей операторов свободных полей. Операторы рождения и уничтожения частиц. Определение вакуума. Построение вектора состояния произвольной системы свободных частиц.

Типы перестановочных соотношений. Трансляционная инвариантность перестановочных функций.

Установление перестановочных соотношений для полей с целым и полуцелым спином. Симметрия между частицами и античастицами. Теорема Паули о связи спина со статистикой. Теорема Паули для комплексного скалярного поля как следствие принципа макроскопической причинности. Нормальная форма операторов и нормальное произведение операторов.

Квантование скалярного, векторного, спинорного полей. Перестановочные функции и их частотные части. Операторы энергии, импульса и заряда.

Квантование электромагнитного поля. Перестановочные функции. Поперечные, продольные и временные фотоны. Необходимость введения пространства состояния с индефинитной метрикой. Метод квантования Гупты – Блейлера. Квантовое условие Лоренца. Операторы основных динамических переменных.

Причинные функции Грина различных полей и их связь с хронологическими произведениями полевых операторов. Вико и дайсоново хронологические произведения. Особенности перестановочных функций и функций Грина на световом конусе. Приведение операторных выражений к нормальной форме. Теорема Вика для обычных произведений полевых операторов.

Гамильтониан взаимодействия и операторы взаимодействующих полей в различных картинах движения. Представление взаимодействия. Оператор эволюции и матрица рассеяния в представлении взаимодействия.

Релятивистская ковариантность и унитарность S-матрицы. Условие причинности. Связь S-матрицы с лагранжианом взаимодействия. Лагранжианы различных типов взаимодействия и принципы симметрии.

Преобразования полевых операторов и векторов состояний при зарядовом сопряжении, инверсии пространства и обращении времени. СРТ-теорема.

Амплитуды и вероятности процессов взаимодействия частиц. Распределение конечных частиц, рождающихся в области пересечения пучков начальных частиц, по импульсам и дискретным квантовым числам.

Релятивистски инвариантное определение амплитуды реакции. Инвариантные фазовые объемы.

Упругое и неупругое столкновение двух частиц и эффективные сечения этих процессов. Инвариантные переменные для двухчастичных реакций ( $s$ ,  $t$ ,  $u$ ). Кросс-симметрия. Соотношение унитарности для инвариантных амплитуд рассеяния. Оптическая теорема. Упругое и неупругое рассеяние частицы во внешнем стационарном поле и эффективные сечения этих процессов. Двухчастичный распад. Полная ширина распада и время жизни нестабильной частицы.

Представление S-матрицы в виде виковской и дайсоновской T-экспонент. Приведение S-матрицы к нормальной форме. Хронологические спаривания. Теорема Вика для хронологических произведений полевых операторов.

Структура членов разложения S-матрицы в ряд теории возмущений в спинорной квантовой электродинамике. Диаграммы Фейнмана. Общая структура матричных элементов S-матрицы произвольного порядка. Критерии неравенства нулю матричных элементов нормальных произведений неспаренных полевых операторов. Теорема Фарри в спинорной квантовой электродинамике. Обобщение квантовой электродинамики при наличии внешнего электромагнитного поля. Правила Фейнмана для вычисления матричных элементов S-матрицы в квантовой электродинамике и других квантовополевых моделях. Примеры расчета амплитуд и сечений процессов взаимодействия частиц в низшем приближении теории возмущения.

Техника вычисления интегралов по виртуальным импульсам. Ультрафиолетовые расходимости и вспомогательные регуляризации фейнмановских диаграмм. Выделение однопетлевых расходимостей в  $\phi^4$ -модели и КЭД. Контрчлены. Перенормировка массы и заряда в КЭД в низшем порядке теории возмущений. Общий метод устранения расходимостей. R-операция Боголюбова-Парасюка. Ренормируемые и неренормируемые квантовополевые модели.

Перенормировки в  $\phi^4$ -модели (расходимости в высших порядках теории возмущений; общий вид контрчленов; полные функции Грина; перенормировки полных функций Грина, массы и константы связи).

Перенормировки в КЭД (локальная калибровочная инвариантность матрицы рассеяния; полные функции Грина; тождества Уорда-Такахаси и ренормируемость КЭД; общий вид контрчленов и конечный произвол; перенормировки пропагаторов, вершин, массы и заряда). Уравнения Дайсона-Швингера.

### **Основы квантовой электродинамики.**

Релятивистское волновое уравнение Клейна-Гордона-Фока (КГФ). Теория тонкой структуры спектра энергии атома водорода на основе уравнения КГФ. Решения с отрицательной энергией.

Уравнение Дирака. Свойства матриц Дирака. Решение уравнения Дирака для свободных частиц. Соотношение полноты и ортогональности. Античастицы. Движение дираковского электрона в поле центральных сил. Решение уравнения Дирака в кулоновском потенциальном поле. Формула тонкой структуры спектра энергии. Уравнение Дирака в нерелятивистском и слаборелятивистском приближении. Преобразование Фолди-Ваутхайзена. Общее решение уравнения Дирака. Дираковская плотность вероятности и плотность тока вероятности. "Шредингеровское" дрожание. Скорость и координата релятивистского электрона в теории Дирака. Теория Коба аномального магнитного момента электрона.

Фейнмановская теория позитрона. Проблема решений с отрицательной энергией. Метод функции распространения. Нерелятивистский пропагатор.

Ряд теории возмущений для функции распространения нерелятивистского электрона в электромагнитном поле. Пропагатор электрона в импульсном представлении. Графические правила построения функции распространения. Релятивистская функция распространения. Ряд теории возмущений для функции распространения релятивистского электрона. Релятивистский пропагатор в импульсном представлении. Интерпретация решений с отрицательной энергией по Фейнману-Штюкельбергу. Решение уравнения Дирака с помощью релятивистской функции Грина. Амплитуда перехода электрона из начального положения в конечное. Правила вычисления вероятностей перехода. Диаграммы Фейнмана. Построение диаграмм Фейнмана с участием фотонов. Правила Фейнмана в квантовой электродинамике.

Элементарные процессы квантовой электродинамики. Эффект Комптона. Амплитуда электрон – фотонного взаимодействия в импульсном представлении. Вычисление вероятности комптон-эффекта. Законы сохранения энергии импульса. Усреднение и суммирование по поляризациям начального и конечного электрона. Суммирование по поляризациям фотонов. Дифференциальное эффективное сечение комптоновского рассеяния. Формула Клейна-Нишины-Тамма. Полное сечение комптоновского рассеяния. Угловое распределение неполяризованных фотонов. Рассеяние электронов в кулоновском поле. Амплитуда рассеяния. Вероятность перехода в единицу времени. Дифференциальное эффективное сечение рассеяния – сечение Мотта. Формула Резерфорда. Экспериментальная проверка формул Мотта и Резерфорда. Превращение электрон-позитронной пары в два фотона. Вычисление дифференциального эффективного сечения аннигиляции в системе центра масс. Дифференциальное эффективное сечение аннигиляции в системе покоя электрона. Формула Дирака – Тамма. Предел малых энергий позитрона – аннигиляция медленной пары. Вычисление ширины распада паразитрония. Волновая функция позитрония. Зарядовая четность позитрония. Формула Дирака – Уилера для времени жизни паразитрония. Вычисление радиационных поправок Харрисом-Брауном. Сравнение теории и эксперимента для времени жизни паразитрония. Вычисление ширины распада ортопозитрония – формула Орра-Пауэлла. Вычисление релятивистских эффектов в ширине распада ортопозитрония. Эксперимент группы Токийского университета.

Радиационные поправки.

Амплитуда рассеяния двух частиц в квантовой электродинамике. Вычисление оператора взаимодействия частиц по амплитуде рассеяния. Спин-орбитальное взаимодействие, спин-спиновое взаимодействие, релятивистские поправки. Вычисление оператора взаимодействия в координатном представлении. Уравнение Брейта. Определение поляризационного оператора, массового оператора, вершинного оператора в квантовой электродинамике. Точные пропагаторы частиц. Операторы полей в гейзенберговском представлении и представлении взаимодействия. Соотношения Гелл-Манна-Лоу. Графическое представление точного



пропагатора электрона и фотона. Уравнения Швингера-Дайсона. Скелетное разложение вершинного оператора. Вычисление поляризационного оператора. Соотношение унитарности для амплитуды рассеяния. Дисперсионное соотношение для поляризационного оператора. Поперечная структура поляризационного тензора. Мнимая часть поляризационного оператора. Предельные выражения для поляризационного оператора. Модификация закона Кулона за счет поляризации вакуума. Потенциал Улинга – Сербера. Понятие эффективного заряда. Вычисление вклада поляризации вакуума в лэмбовский сдвиг атома водорода. Точное выражение для кулоновского потенциала с учетом поляризации вакуума. Вычисление вклада поляризации вакуума в лэмбовский сдвиг атома мюонного водорода. Проблема лэмбовского сдвига в атоме мюонного водорода. Вычисление мнимой части поляризационного оператора по интегралу Фейнмана. Правило Мандельштама – Кутковского. Массовый оператор в старшем порядке теории возмущений. Ультрафиолетовая расходимость интеграла. Методы регуляризации интегралов Фейнмана. Вычисление массового оператора в калибровке Фрида – Йенни с помощью регуляризации обрезанием. Структура массового оператора после снятия регуляризации. Перенормированный массовый оператор. Связь массового оператора и пропагатора электрона. Перенормировка массы электрона. Вычисление вершинного оператора в старшем порядке теории возмущений. Электромагнитные формфакторы электрона. Значение магнитного формфактора электрона в нуле. Вычисление аномального магнитного момента электрона. Проблема инфракрасных расходимостей. Тождество Уорда – Такахаши. Формула Швингера. Расходимости и размерная регуляризация КЭД. Вычисление поляризационного и массового оператора с помощью размерной регуляризации. Однопетлевая перенормировка КЭД. Измерение аномальных магнитных моментов лептонов. Эксперимент по измерению аномального магнитного момента мюона в Брукхейвенской национальной лаборатории. Экспериментальная проверка квантовой электродинамики. Вычисление лэмбовского сдвига уровней энергии атома водорода. Формула Бете.

### **Проблема связанных состояний в квантовой теории поля**

Теория водородоподобных атомов в нерелятивистской квантовой механике.

Радиальное волновое уравнение. Исследование вырождения по  $l$  для кулоновского поля. Спектр излучения для водородоподобных атомов. Учет движения ядра. Теорема вириала в квантовой механике. Учет релятивистских эффектов. Спин-орбитальное взаимодействие. Формула тонкой структуры. Магнитный момент электрона. Магнитный момент ядра. Сверхтонкое взаимодействие электрона и ядра. Сверхтонкая структура основного состояния атома водорода. Энергия Ферми. Сверхтонкая структура атома мюония. Лэмбовский сдвиг уровней энергии. Метод Вельтона.

Релятивистская квантовая механика связанных состояний.

Релятивистское волновое уравнение Клейна-Гордона-Фока (КГФ). Теория тонкой структуры спектра энергии атома водорода на основе уравнения КГФ.

Уравнение Дирака. Свойства матриц Дирака. Решение уравнения Дирака для свободных частиц. Соотношение полноты и ортогональности. Античастицы. Движение дираковского электрона в поле центральных сил. Решение уравнения Дирака в кулоновском потенциальном поле. Формула тонкой структуры спектра энергии.

Связанные состояния в квантовой электродинамике

Амплитуда рассеяния двух частиц в квантовой электродинамике. Вычисление оператора взаимодействия частиц по амплитуде рассеяния. Спин-орбитальное взаимодействие, спин-спиновое взаимодействие, релятивистские поправки. Вычисление оператора взаимодействия в координатном представлении. Вычисление лэмбовского сдвига уровней энергии атома водорода. Формула Бете. Уравнение Бете-Солпитера. Двухчастично-неприводимое ядро. Спектральное представление функции Грина взаимодействующего спинорного поля. Вычисление функций Грина методом теории возмущений. Уравнение Бете-Солпитера для волновой амплитуды. Волновая Функция Бете-Солпитера и ее физическая интерпретация. Условие нормировки для волновой функции Бете-Солпитера. Особенности ковариантного уравнения Бете-Солпитера. Модель Вика-Кутковского. Точные решения модели Вика-Кутковского. Уравнение Солпитера. Волновая функция Солпитера. Нерелятивистский предел уравнения Солпитера. Предел уравнения Солпитера в случае бесконечно тяжелого ядра. Двухчастичная кинематика. Квазипотенциальное уравнение Логунова-Тавхелидзе. Исключение относительного времени из двухчастичной функции Грина. Методы построения оператора взаимодействия частиц – квазипотенциала. Условие нормировки квазипотенциальной волновой функции. Вычисление квазипотенциала по амплитуде рассеяния. Уравнение Липпмана-Швингера. Построение квазипотенциала однофотонного взаимодействия. Сверхтонкая структура основного состояния мюония: вычисление поправок на отдачу двухфотонных обменных диаграмм. Вычисление радиационных поправок в сверхтонком расщеплении спектра энергии водородоподобного атома в калибровке Фрида-Йенни. Вычисление ширины распада парапозитрония. Волновая функция позитрония. Ортопозитроний и парапозитроний. Зарядовая четность позитрония. Формула Дирака – Уилера для времени жизни парапозитрония. Вычисление радиационных поправок Харрисом-Брауном. Сравнение теории и эксперимента для времени жизни парапозитрония. Вычисление ширины распада ортопозитрония – формула Орра-Пауэлла. Проблема распада ортопозитрония. Вычисление релятивистских эффектов в ширине распада ортопозитрония. Эксперимент группы Токийского университета. Эффекты поляризуемости ядра в лэмбовском сдвиге и сверхтонкой структуре атома водорода. Общая структура амплитуды комптоновского рассеяния вперед протона. Структурные функции лептон – протонного рассеяния. Вклад поляризуемости ядра в лэмбовский сдвиг.

Изотопический сдвиг водород-дейтерий для расщепления  $1S-2S$ . Зарядовый радиус протона и сравнение теоретических расчетов с экспериментом. Поляризационные структурные функции глубокоэластичного рассеяния. Вклад поляризуемости протона в сверхтонкое расщепление. Радиус Земача. Вклад адронной поляризации вакуума в сверхтонкую структуру атомов. Сравнение теории и эксперимента для сверхтонкого расщепления мюония и атома водорода. Магнитный момент двухчастичного связанного состояния в квантовой электродинамике. Гиромагнитные факторы свободных и связанных лептонов. Матричные элементы локальных операторов между связанными состояниями. Пятиточечная функция Грина. Спектральное представление пятиточечной функции Грина. Матричный элемент оператора векторного тока между связанными состояниями. Построение двухчастичного вершинного оператора по теории возмущений. Вычисление поправок второго и третьего порядка по постоянной тонкой структуры в гиромагнитных факторах связанных лептонов. Экспериментальные данные по гиромагнитным факторам связанных лептонов, сравнение теории и эксперимента. Определение фундаментальных физических констант.

Связанные состояния в квантовой хромодинамике.

Лагранжиан квантовой хромодинамики. Цветовая симметрия. Асимптотическая свобода в КХД. Киральная симметрия и ее спонтанное нарушение. Соотношение Голдбергера – Треймана. Понятие вакуумного конденсата. Инстантоны. Глюонный конденсат. Операторное разложение Вильсона. Физический смысл операторного разложения. Метод правил сумм КХД. Вычисление степенных пертурбативных и непертурбативных поправок. Правило сумм для  $\rho$ -мезона. Пропагатор легкого кварка во внешнем поле. Правила сумм КХД для нуклона. Радиационные распады тяжелых мезонов. Вычисление магнитных моментов протона и нейтрона методом правил сумм КХД. Гибридные мезоны и барионы.

## ТЕОРИЯ ПЕРЕНОРМИРОВОК

Собственная энергия электрона. Подсчет ультрафиолетовых расходимостей. Перенормируемая теория возмущений. Перенормировка квантовой электродинамики. Калибровочная инвариантность и перенормировка для Стандартной модели. Однопетлевая структура КЭД. Перенормировка теории Юкавы. Перенормировка поля в теории  $\phi^4$ . Асимптотическое поведение диаграмм в теории  $\phi^4$ . Модель взаимодействующих скалярного и фермионных полей. Распад бозона Хиггса. Подход Вильсона к теории перенормировок. Уравнение Каллана–Симанчика. Эволюция констант связи.

## КОГЕРЕНТНЫЕ И КООПЕРАТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Глауберовские когерентные состояния (КС). Группа Гейзенберга-Вейля, ее представления и связь с Глауберовскими КС. КС для произвольной группы Ли в смысле А.М. Переломова.

Квантовомеханический язык и преобразования симметрии. Симметрия и интегралы движения. Симметрия и вырождение уровней энергии. Правила отбора. Теоретико-групповая классификация стационарных состояний квантовых систем. Симметрии молекул и твердого тела. Оператор обращения времени. Теорема Крамерса. Вырождение уровней и симметрия многомерного гармонического осциллятора, атома водорода.

Симметрия уравнений. Динамическая симметрия гармонического осциллятора, ротатора, атома водорода.

Алгебры, генерирующие спектр. Квантовые системы с линейной группой динамической симметрии и оператор эволюции.

Группы  $SO(3)$  и  $SU(2)$  и связанные с ними КС. Группы  $SO(2,1)$ ,  $SU(1,1)$ , группа Лоренца и когерентные состояния.

Супергруппы и супералгебры Ли и суперкогерентные состояния. Квантовый осциллятор в поле внешней силы. Параметрическое возбуждение гармонического осциллятора.

Спин в однородном внешнем переменном магнитном поле. Концепция геометрической фазы Берри. Фаза Берри для спина в прецессирующем магнитном поле. Фаза Ааронова - Анандона. Геометрическая фаза для многоуровневых атомов.

$O(4)$  – симметрия и «далекие» столкновения атома водорода с тяжелыми ионами. «Когерентные состояния» для атома водорода и ридберговские волновые пакеты.

Квантовая механика и формализм интегралов по траекториям (континуальных интегралов). Гамильтоновы интегралы по траекториям. S-матрица и теория возмущений. Интегралы по траекториям в представлении КС. Символы операторов и классическая механика на Кэлеровых многообразиях. Квантование по Ф.А. Березину.  $1/N$  - разложение и классические пределы.

Теория возмущений и многофотонные процессы. Уравнение Дайсона и диаграммная техника. Квазиэнергии в методе функций Грина. Однофотонный резонанс в двухуровневом атоме. Квазиэнергии высоковозбужденного атома водорода. Сдвиги и ширины атомных уровней в сильном лазерном поле. Оптическая нутация в двухуровневом атоме.

Метод уравнения Фоккера - Планка. Релаксация эквидистантных квантовых систем. Релаксация квантового осциллятора, взаимодействующего с классической внешней силой. Квантовый затухающий осциллятор как модель детектора фотонов. Релаксация спиновых систем и ансамбля двухуровневых атомов и уравнение Фоккера - Планка в представлении КС на группе  $SU(2)$

Двухуровневый атом во внешнем классическом поле. Группа  $SU(N)$  и динамика N-уровневого атома. Кооперативные квантовые числа. Многоатомное спонтанное излучение и сверхизлучательный распад.

Модель Джейнса - Каммингса и ее свойства. Квантовая модель Дикке и фазовый переход в сверхизлучающее состояние. Представление электромагнитного поля по когерентным состояниям. Хаотические и

тепловые состояния. Квантовые корреляционные функции. Идеальные детекторы и скорость счета числа квантов. Полная и частичная когерентность. Распределение фотоотсчетов. Сжатый свет и коррелированные когерентные состояния. Генерация и детектирование сжатого света. Квантовый параметрический усилитель.

Фотонная модель одномодового лазера, скоростные уравнения. Полуклассическая теория. Квантовомеханические теории лазера. Теория Скалли - Лэмба. Допороговый режим. Поведение выше порога генерации. Поведение вблизи порога, статистика фотонов.

Связь кооперативных и нелинейных процессов. Сверхтекучесть бозе – газа. Метод квазисредних Боголюбова. Теория Гинзбурга-Ландау. Фазовые переходы и спонтанное нарушение симметрии. Бозе - Эйнштейновская конденсация. Атомные конденсаты и атомный лазер. Квантовый эффект Холла. Анионы.

Зацепленные состояния и «квантовая телепортация» Невозможность клонирования квантовых состояний. “Квантовая телепортация”. Эксперименты Цайлингера и парадоксы ЭПР. Квантовая криптография. Квантовые вычисления. Квантовая коррекция ошибок. Схема работы квантового компьютера. Алгоритмы Шора и Китаева.

Физическая реализация квантовых компьютеров. Ионные ловушки. Ядерный магнитный резонанс. Высокодобротные квантово-оптические резонаторы. Атомные конденсаты. Эффект Джозефсона. Квантовые точки.

### **Квантовая теория твердого тела**

Адиабатический принцип Борна-Эренфеста. Пространственная решетка кристаллов. Обратная решетка кристалла. Зоны Бриллюэна. Собственные значения и собственные функции оператора трансляций. Общие свойства стационарных состояний кристалла.

Фононы в одномерном кристалле с одним атомом в элементарной ячейке. Фононы. Фононы в одномерном кристалле с двумя атомами в элементарной ячейке. Акустические и оптические фононы. Фононы в трехмерном кристалле. Фонон-фононное взаимодействие. Теплопроводность. Поглощение звука.

Макроскопическая теория оптических колебаний в ионных кристаллах. Макроскопическая теория поляритонов. Взаимодействие света с фононами. Определение спектра колебаний решетки с помощью рассеяния нейтронов.

Плазменные волны в твердых телах. Плазмоны. Спиновые волны в ферромагнетиках. Магноны. Взаимодействие магнонов с фононами. Теплоемкость газа магнонов..

Электрон в периодическом поле кристалла. Приближенные методы вычисления одноэлектронных состояний. Метод эффективной массы. Приближения почти свободных и сильно связанных электронов. Метод псевдопотенциала. Классификация твердых тел на основе энергетического спектра их одноэлектронных состояний.

Метод потенциала деформации в ковалентных кристаллах. Расчет проводимости для металлов и полупроводников. Электрон-фононные взаимодействия в ионных кристаллах. Поляроны. Сверхпроводимость. Модель БКШ. Метод Боголюбова в теории сверхпроводимости.

Зонная структура полупроводников. Собственное поглощение фотонов в полупроводниках. Экситоны.

### **Неравновесная статистическая физика**

Чистые и смешанные квантовые состояния. Статистический оператор. Квантовые канонические распределения. Квантовое уравнение Лиувилля. Иерархия временных масштабов Боголюбова и сокращенное описание неравновесной системы на различных этапах ее эволюции.

Метод двухвременных температурных функций Грина. Вычисление одночастичной функции Грина. Квазичастицы. Идеальные ферми- и бозе-газы. Модель Гейзенберга. Ферромагнетизм. Модель Бардина-Купера-Шриффера. Сверхпроводимость.

Линейная реакция систем на механические возмущения. Формула Кубо. Ферромагнитный резонанс. Температурная зависимость сопротивления металлов (за счет рассеяния на фононах). Спиновая релаксация.

Метод проекционного оператора. Уравнение Паули.

Неравновесный статистический оператор Зубарева. Движение с трением в равновесной среде. Самодиффузия.

Метод исключения бозонных переменных. Сверхизлучение.

### **Применение компьютеров в современной физике, в квантовой теории поля и физике высоких энергий**

Изучение пакетов символьных вычислений: Mathematica, Mathcad, Maple. Принципы программирования в среде Delphi. Аналитические расчеты амплитуд в пакете **FeynCalc**. Расчет элементарных процессов рассеяния фотонов и электронов. Моделирование прохождения нейтронов через вещество методом Монте-Карло. Моделирование прохождения электронов через вещество методом Монте-Карло. Моделирование колебаний в системе связанных линейного и нелинейного колебательных контуров. Моделирование распространения волн на мелкой воде и получение уединенных волн. Моделирование эволюции белого карлика. Квазиклассическое квантование двухатомной молекулы. Моделирование квантовомеханического движения в поле ангармонического осциллятора.