

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Квантовая теория поля. Часть 1
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика и педагогика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау центр образовательных программ ЛФИ
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 75 всего, в том числе:

лекции: 45 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: В.В. Киселев, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

Программа обсуждена на заседании центр образовательных программ ЛФИ 20.02.2025

Аннотация

В отличие от подавляющего большинства специальных курсов по "квантовой теории поля для теоретиков" этот представляет из себя научный взгляд на квантовую теорию поля для всех физиков.

В первой части курса "Квантовая теория поля" (осенний семестр 4 курса бакалавриата) изучается теория Вигнера построения базиса свободных релятивистских полей в пространстве Минковского, теория представлений группы $SL(2, \mathbb{C})$, после чего проводится вторичное квантование скалярных, спинорных и векторных полей в пространстве квантовых состояний Фока. Вводятся калибровочные взаимодействия и рассматривается решение кулоновской задачи для скалярного и спинорного полей как точно, так и в рамках построения эффективного действия до второго порядка малости по обратной скорости света.

Далее проводится построение диаграммной техники Фейнмана на основе уравнений Швингера--Дайсона в представлении континуального интеграла. Излагается формализм построения наблюдаемых вероятностных величин для квантовых переходов в релятивистской теории: сечений рассеяния и ширины распадов. Рассматриваются типичные процессы Стандартной Модели калибровочных взаимодействий элементарных частиц в древесном приближении. Излагается механизм Хиггса нарушения локальной электрослабой симметрии, а также проводится сравнение со случаем спонтанного нарушения глобальной калибровочной симметрии с неизбежным появлением безмассовой моды --- голдстоуновского бозона. Излагается кварковая модель адронов и основы квантовой хромодинамики. Описывается введение духов Фаддеева--Попова в формализме континуального интеграла и выводятся следующие из калибровочной инвариантности действия тождества Славнова--Тейлора--Уорда--Такахаси, в том числе, с использованием BRST-инвариантности.

Практическим итогом усвоения первой части курса должно стать уверенное вычисление студентами в рамках теории возмущений стандартных диаграмм типа ширины лептонного распада мюона и сечение электрон-позитронной аннигиляции в пару мюон-антимюон.

В целом, от освоившего курс студента не требуется воспроизводить все технические выкладки самостоятельно без использования литературы, но предполагается, что уровень понимания предмета настолько высок, что сами выкладки, что называется, "прозрачны" и при надобности аналогичные вычисления могут быть проведены студентом достаточно оперативно и без ошибок, а не так, словно нужно изучать вопрос с чистого листа.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Изучение современного теоретического аппарата изучения фундаментальной структуры микромира и его феноменологии.

Задачи дисциплины

Практическим итогом усвоения первой части курса должно стать уверенное вычисление студентами в рамках теории возмущений типовых диаграмм класса ширины лептонного распада мюона и сечение электрон-позитронной аннигиляции в мюон-антимюон.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физики, математики и химии	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения

области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Теория Вигнера построения базиса свободных релятивистских полей в пространстве Минковского, теория представлений группы $SL(2, \mathbb{C})$, вторичное квантование скалярных, спинорных и векторных полей в пространстве квантовых состояний Фока, калибровочные взаимодействия, решение кулоновской задачи для скалярного и спинорного полей как точно, так и в рамках построения эффективного действия до второго порядка малости по обратной скорости света, построение диаграммной техники Фейнмана на основе уравнений Швингера--Дайсона в представлении континуального интеграла, формализм построения наблюдаемых вероятностных величин для квантовых переходов в релятивистской теории: сечений рассеяния и ширин распадов.

уметь:

Вычислять в рамках теории возмущений типовых диаграмм класса ширина лептонного распада мюона и сечение электрон-позитронной аннигиляции в мюон-антимюон.

владеть:

Аппарат квантовой теории поля в рамках теории возмущений, методы описания неабелевых калибровочных теорий, включая основы Стандартной модели, размерная регуляризация, перенормировка в одной петле.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа

1	Свободные релятивистские поля.	9	6		14
2	Вторичное квантование скалярного поля.	3	2		6
3	Свободные вейлевские и дираковские спиноры	6	4		10
4	Калибровочное векторное поле	3	2		6
5	Релятивистская частица в кулоновском поле	3	2		6
6	Нерелятивистское приближение: эффективная теория	3	2		6
7	Диаграммы Фейнмана	12	8		15
8	Слабое взаимодействие	3	2		6
9	Кварки	3	2		6
Итого часов		45	30		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

1. Свободные релятивистские поля.

Группа Лоренца: генераторы вращений, их коммутатор, спин векторной частицы, полный момент количества движения, генераторы бустов и полная алгебра группы Лоренца, собственные ортохронные преобразования, дискретные операции инверсии пространства и времени, классификация преобразований полной группы Лоренца, базис полей и группа $SL(2, \mathbb{C})$, релятивистские спиноры, индексы с точкой и без точки, 4-векторное поле в терминах спинорных индексов. Группа Пуанкаре: трансляции и неоднородная группа Лоренца, коммутаторы генераторов, вектор Паули-Любанского, классификация Вигнера для массивных и безмассовых полей, спиральность, киральные поля, действие дискретных преобразований на генераторы, СРТ-теорема.

2. Вторичное квантование скалярного поля.

Свободные классические вещественное и комплексное скалярные поля, положительно- и отрицательно-частотные решения, совокупность осцилляторов, динамические переменные поля и их квантование, операторы рождения и уничтожения скалярных частиц, их зависимость от времени и координаты, классическое поле как среднее значение оператора поля по когерентным состояниям, пространство Фока, ток Нётер, оператор заряда, античастицы, зарядовое сопряжение и инверсии пространства и времени в фоковском пространстве и их действие на квантованное скалярное поле. Скалярное поле с источником: причинная функция Грина, амплитуда квантовых переходов при наличии источника как производящий функционал многоточечных функций Грина, Т-произведение операторов поля и интеграл по траекториям, производящий функционал связанных функций Грина, преобразование Лежандра от источников к полям и функционал эффективного действия. Уравнения Швингера-Дайсона. Голоморфное представление для интеграла по траекториям, нормальное упорядочение, асимптотические состояния, стабильность вакуума, переходы вакуум-вакуум при наличии источников, фейнмановские граничные условия, причинный пропагатор Фейнмана, физический смысл двухточечной функции Грина, \mathcal{S} -матрица как функционал от свободного классического решения, физический смысл коэффициентных функций, их связь с многоточечными функциями Грина, графическое представление редукционных формул.

3. Свободные вейлевские и дираковские спиноры

Уравнения движения для киральных безмассовых спиноров Вейля, действие кирального поля, гамильтониан и заряд, базисные спиноры и квантование вейлевского спинора, античастицы с противоположной спиральностью и СР-инвариантность, инверсия времени, безмассовый биспинор Дирака и операция пространственной инверсии, гамма-матрицы и их алгебра, киральные проекторы, дираковски сопряженный спинор, зарядовое сопряжение биспинора, дираковский спинор с массой, уравнение Дирака, квантование, проекторы на состояния с заданным значением спина, сумма по поляризациям, представление Дирака для гамма-матриц, ковариантные билинейные по биспинорам Дирака токи, дискретные симметрии для поля Дирака, зарядово самосопряженные спиноры Майорана, майорановская масса. Поле Дирака с источником: пропагатор электрона.

4. Калибровочное векторное поле

Векторное поле и уравнения Максвелла, циркулярная поляризация, продольное поле, преобразования Лоренца и калибровочная инвариантность, действие для поперечных мод, квантованное поле, массивное векторное поле, уравнение Прока, калибровочное преобразование базиса гильбертова пространства в нерелятивистской и релятивистской квантовой механике, операция трансляций и ковариантная производная, калибровочное поле, тензор напряженности как коммутатор ковариантных производных, минимальное взаимодействие заряженных релятивистских частиц с калибровочным полем.

5. Релятивистская частица в кулоновском поле

Спектр атом водорода из релятивистского уравнения для скалярной частицы, сведение к нерелятивистскому уравнению, расщепление уровней по орбитальному моменту, спектр уровней из уравнения Дирака, квантовые числа состояний, важность \mathbb{Z}_2 -четности, расщепление уровней по полному моменту.

6. Нерелятивистское приближение: эффективная теория

Операторное уравнение для двухкомпонентного спинора во внешнем поле в одночастичном приближении, разложение операторов в ряд по малому отношению v/c , ведущий вклад в нерелятивистское приближение, эффективное действие для спинора Паули, магнитный момент электрона и фактор Ланде $g=2$, поправки к эффективному действию в случае движения в статическом потенциале, роль нормировки заряда на единицу, природа кинетической поправки, спин-орбитального взаимодействия и дарвиновского члена, релятивистские поправки как возмущение в атоме водорода.

7. Диаграммы Фейнмана

Уравнения Швингера—Дайсона в квантовой электродинамике и их графическое представление, теория возмущений в формулировке континуального интеграла, правила Фейнмана, матричные элементы с хронологическим упорядочиванием, амплитуда квантового перехода при наличии внешних полей, сохранение 4-импульса, вероятность перехода в единицу времени в единичном объеме, поток в релятивистской нормировке, дифференциальное сечение, ширина распада.

8. Слабое взаимодействие

Слабый заряженный ток, четырёхфермионное взаимодействие и распад нейтрона, поколения лептонов, W -бозон, распад мюона, распад заряженного пиона, калибровочное слабое взаимодействие и нейтральный ток.

9. Кварки

Кварковая модель адронов. Цвет. Квантовая хромодинамика - калибровочная теория сильных взаимодействий, генераторы группы $SU(3)$, фундаментальное и присоединенное представления группы $SU(3)$, матрицы Гелл-Мана, самодействие неабелевых калибровочных векторных бозонов - глюонов. Калибровочное условие и трюк Фаддева-Попова: континуальный интеграл в неабелевых теориях поля, пропагатор калибровочного бозона в различных калибровках, духи Фаддева-Попова. Тожества Славнова-Тейлора-Уорда-Такахаси. BRST-инвариантность действия.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Лекционная аудитория, доска, мел.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Квантовая механика [Текст] : Курс лекций : [учеб. пособие для вузов] / В. В. Киселев .— М. : МЦНМО, 2009 .— 560 с.

Дополнительная литература

1. Квантовая электродинамика [Текст] : учеб. пособие для студентов физ. спец. ун-тов / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский .— 4-е изд., испр. — М. : Физматлит, 1989, 2001, 2002, 2006 .— 720 с.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<https://sites.google.com/view/ktp-fopf/>

Текущая информация по дисциплине, включая тесты, успеваемость, текст лекций, видео семинаров, контактная информация

А также arXiv.org лекции из цикла TASI

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

arXiv.org статьи разделов hep-ph, hep-th

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Физика и педагогика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
центр образовательных программ ЛФИ
курс: 4
квалификация: бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Экзамен

Разработчик: В.В. Киселев, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая теория поля. Часть 1» обучающийся должен:

знать:

Теория Вигнера построения базиса свободных релятивистских полей в пространстве Минковского, теория представлений группы $SL(2, \mathbb{C})$, вторичное квантование скалярных, спинорных и векторных полей в пространстве квантовых состояний Фока, калибровочные взаимодействия, решение кулоновской задачи для скалярного и спинорного полей как точно, так и в рамках построения эффективного действия до второго порядка малости по обратной скорости света, построение диаграммной техники Фейнмана на основе уравнений Швингера--Дайсона в представлении континуального интеграла, формализм построения наблюдаемых вероятностных величин для квантовых переходов в релятивистской теории: сечений рассеяния и ширин распадов.

уметь:

Вычислять в рамках теории возмущений типовых диаграмм класса ширины лептонного распада мюона и сечение электрон-позитронной аннигиляции в мюон-антимюон.

владеть:

Аппарат квантовой теории поля в рамках теории возмущений, методы описания неабелевых калибровочных теорий, включая основы Стандартной модели, размерная регуляризация, перенормировка в одной петле.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. Правила Фейнмана в теории юкавского взаимодействия спинорного поля Дирака с вещественным скалярным полем.
2. Диаграммы Фейнмана
3. Доказать, что разложение связанных диаграмм по петлям совпадает с разложением по постоянной Планка.
4. Вывести уравнения Швингера--Дайсона и графическое представление для двухточечной вершинной функции для скалярной электродинамики.
5. Эффективный потенциал Коулмена--Вайнберга.
6. Действие Черна--Саймонса.
7. Векторное поле и уравнения Максвелла.
8. Уравнения движения для киральных безмассовых спиноров Вейля.
9. Операторное уравнение для двухкомпонентного спинора во внешнем поле в одночастичном приближении.
10. Спектр атом водорода из релятивистского уравнения для скалярной частицы.

Примеры контрольных заданий:

1. Вычислить ширину двухчастичного распада Z -бозона на нейтрино.
2. Вычислить время двухчастичного лептонного распада заряженного пиона.
3. Боксовая кварковая диаграмма для процесса осцилляций нейтральный K -мезонов.
4. Вычислить функцию расщепления партонных распределений кварков.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Эффект Хиггса в абелевой теории

Билет 2.

1. Угол Вайнберга и масса Z -бозона

Билет 3.

1. Генераторы вращений и бустов, их коммутатор и базис полей в алгебре $sl(2, \mathbb{C})$

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в устной форме по билетам.

В каждом билете представлен 1 теоретический вопрос.

Оценка на экзамене выставляется на основе опорной оценки за работу в семестре по итогам сдачи заданий.

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку.

Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.