

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Квантовая теория поля. Часть 2
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика и педагогика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау центр образовательных программ ЛФИ
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

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.

Вторая часть курса "Квантовая теория поля" (весенний семестр 4 курса бакалавриата) направлена на углубленное изучение однопетлевой структуры квантовой электродинамики, размерной регуляризации расходимостей и теории перенормировки, а также уравнений ренорм-группы. В программу включены в качестве обязательных следующие разделы: операторное разложение и правила сумм квантовой хромодинамики, партонная интерпретация глубокоэластичного рассеяния лептонов на адронах, рождение адронов в жестких процессах, смешивание заряженных токов в кварковом и лептонном секторах, эффективная теория тяжелых кварков как пример эффективной динамической теории с двумя масштабами пороговых энергий, элементы теории великого объединения калибровочных взаимодействий.

Структура задания для студентов существенно изменена по сравнению с первой частью дисциплины: задание включает в себя как стандартные задачи вроде вывода аномального момента мюона в однопетлевом приближении квантовой электродинамики, так и тематические семинары с использованием текущей литературы. По каждой теме преподаватель самостоятельно определяет референсную статью из архива электронных препринтов или из журнала, по которой на занятии проводится литературный семинар. Минимальный набор тематических семинаров указан в задании (например, эффективный потенциал Коулмена-Вайнберга, тета-вакуум квантовой хромодинамики,  $1/N$ -разложение, BPS-состояния, действие Черна-Саймонса и проч.). Дополнительные литературные семинары проводятся преподавателем при наличии аудиторных часов, не занятых обязательным минимальным набором. Литературный семинар по теме может занимать более одного занятия.

Активное участие студентов в работе литературного семинара учитывается как необходимый элемент сдачи задания. При сдаче задания студент отвечает на вопросы по всем проведенным в учебной группе семинарским занятиям.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

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

### Задачи дисциплины

Практическим итогом усвоения второй части курса должно стать уверенное решение студентами стандартных задач вроде вывода аномального момента мюона в однопетлевом приближении квантовой электродинамики.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности

ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
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
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-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
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:

1. Теория Вигнера: построение базиса свободных релятивистских полей в пространстве Минковского.
2. Теория представлений группы  $SL(2, \mathbb{C})$ .
3. Вторичное квантование скалярных, спинорных и векторных полей в пространстве квантовых состояний Фока.
4. Калибровочные взаимодействия.
5. 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.
6. Построение диаграммной техники Фейнмана на основе уравнений Швингера–Дайсона в представлении континуального интеграла.
7. Формализм построения наблюдаемых вероятностных величин для квантовых переходов в релятивистской теории: сечений рассеяния и ширин распадов.
8. Типичные процессы Стандартной Модели калибровочных взаимодействий элементарных частиц в древесном приближении.
9. Механизм Хиггса нарушения локальной электрослабой симметрии, а также сравнение со случаем спонтанного нарушения глобальной калибровочной симметрии с образованием голдстоуновского бозона.
10. Кварковая модель адронов и основы квантовой хромодинамики.
11. Введение духов Фаддеева–Попова в формализме континуального интеграла.
12. Вывод следующих из калибровочной инвариантности действия тождеств Славнова–Тейлора–Уорда–Такахаши.

уметь:

1. Выводить аномальный момент мюона в однопетлевом приближении квантовой электродинамики.

владеть:

1. Аппарат квантовой теории поля в рамках теории возмущений.
2. Методы описания неабелевых калибровочных теорий, включая основы Стандартной модели.
3. Размерная регуляризация.
4. 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	Однопетлевые вершины квантовой электродинамики	4	4		8
2	Регуляризация расходимостей	4	4		10
3	Перенормировка	4	4		9
4	Перенормировка заряда, массы и поля	2	2		6
5	Операторное разложение	2	2		6
6	Глубоконеупругое рассеяние лептонов на адронах	2	2		6
7	Рождение адронов в жестких процессах	2	2		6
8	Электрослабая теория	4	4		6
9	Эффективные динамические теории	2	2		6
10	Великое объединение калибровочных взаимодействий	4	4		12
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 8 (Весенний)

###### 1. Однопетлевые вершины квантовой электродинамики

Взаимодействие электрона с фотоном и аномальный магнитный момент  $g-2$ , собственная энергия фотона, собственная энергия электрона, нормировка поля, тождества Уорда-Такахаши. Степень расходимости.

###### 2. Регуляризация расходимостей

Размерная регуляризация: интегрирование в пространстве  $D$  измерений, размерности полей и заряда, вычитание расходимостей, зависимость от масштаба регуляризации, размерная трансмутация. Регуляризация Паули-Вилларса. Обрезание больших виртуальностей. Инфракрасные расходимости из-за безмассовости фотона.

### 3. Перенормировка

Рецепт перенормировки. Независимость физических наблюдаемых от масштаба регуляризации. Понятие о перенормируемой теории на примере квантовой электродинамики. Уравнения ренорм-группы.

### 4. Перенормировка заряда, массы и поля

Функция Гелл-Мана-Лоу в электродинамике. Ультрафиолетовые и инфракрасные фиксированные точки для заряда в теории общего вида. Асимптотическая свобода в неабелевых калибровочных теориях. Полусная и бегущая массы. Аномальная размерность поля.

### 5. Операторное разложение

Затравочное действие и эффективное действие как пример операторного разложения: переход к внешним полям. Коррелятор векторных токов, мнимая часть диаграммы и правила Кутковского, сечение инклюзивного рождения адронов и  $R$ -отношение, экспериментальные доказательства существования кварков и их сильного взаимодействия, вакуумные конденсаты на примере глюонного конденсата в квантовой хромодинамике (КХД), правила сумм КХД.

### 6. Глубоконеупругое рассеяние лептонов на адронах

Партонная модель. Неполаризованное рассеяние и структурные функции. Эволюция функций распределения партонов в квантовой теории поля: метод Альтарелли-Паризи, работы Грибова, Липатова, Докшицера.

### 7. Рождение адронов в жестких процессах

Теория возмущений для жестких партонных процессов.

### 8. Электрослабая теория

Матрица смешивания для заряженных кварковых токов, матрица смешивания для заряженных лептонных токов и осцилляции нейтрино, иерархия масс, фаза нарушения  $CP$ -инвариантности, эффект Михеева--Смирнова-Вольфенштейна. Осцилляции нейтральных мезонов с  $b$ -кварками, механизм Глэшоу—Иллюпулиса—Майани.

### 9. Эффективные динамические теории

Иерархия энергетических порогов и разложение наблюдаемых и состояний по малому динамическому параметру, тяжелый кварк и масштаб конфайнмента, скорость электрона в атоме как малый параметр, тяжелый кварк в адроне с легкими валентными кварками и в тяжелом кварконии: сравнение пропагаторов NRQCD и  $p$ NRQCD, NRQED, статический потенциал эффективной теории и петля Вильсона. Сшивка констант разложения эффективного действия. Лэмбовский сдвиг в атоме водорода.

### 10. Великое объединение калибровочных взаимодействий

Бегущие константы и энергия унификации. Модель  $SU(5)$ . Распад протона.

## 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)**

Описание информационных ресурсов: 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: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

**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
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-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
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
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-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
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 2» обучающийся должен:

**знать:**



1. Теория Вигнера: построение базиса свободных релятивистских полей в пространстве Минковского.
2. Теория представлений группы  $SL(2, \mathbb{C})$ .
3. Вторичное квантование скалярных, спинорных и векторных полей в пространстве квантовых состояний Фока.
4. Калибровочные взаимодействия.
5. 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.
6. Построение диаграммной техники Фейнмана на основе уравнений Швингера–Дайсона в представлении континуального интеграла.
7. Формализм построения наблюдаемых вероятностных величин для квантовых переходов в релятивистской теории: сечений рассеяния и ширин распадов.
8. Типичные процессы Стандартной Модели калибровочных взаимодействий элементарных частиц в древесном приближении.
9. Механизм Хиггса нарушения локальной электрослабой симметрии, а также сравнение со случаем спонтанного нарушения глобальной калибровочной симметрии с образованием голдстоуновского бозона.
10. Кварковая модель адронов и основы квантовой хромодинамики.
11. Введение духов Фаддеева–Попова в формализме континуального интеграла.
12. Вывод следующих из калибровочной инвариантности действия тождеств Славнова–Тейлора–Уорда–Такахаси.

**уметь:**

1. Выводить аномальный момент мюона в однопетлевом приближении квантовой электродинамики.

**владеть:**

1. Аппарат квантовой теории поля в рамках теории возмущений.
2. Методы описания неабелевых калибровочных теорий, включая основы Стандартной модели.
3. Размерная регуляризация.
4. 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.

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Аттестация по дисциплине «Квантовая теория поля. Часть 2» осуществляется в форме дифференцированного зачета после весеннего семестра.

Умения и навыки студентов определяются по итогам сдачи домашнего задания. Задание содержит типовые задачи, которые разбираются на семинарских (практических) занятиях. Домашние задания оценены в определённую сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов.

*Пример типовых заданий:*

1. Правила Фейнмана в теории юкавского взаимодействия спинорного поля Дирака с вещественным скалярным полем
2. Доказать, что разложение связанных диаграмм по петлям совпадает с разложением по постоянной Планка
3. Вывести уравнения Швингера--Дайсона и графическое представление для двухточечной вершинной функции для скалярной электродинамики
4. Эффективный потенциал Коулмена--Вайнберга
5. Действие Черна—Саймонса
6. Основные процессы, характеризующие взаимодействия элементарных частиц в контексте Стандартной Модели, рассматриваемые в древесном приближении.
7. Механизм Хиггса, который приводит к нарушению локальной электрослабой симметрии, а также сопоставление с ситуацией спонтанного нарушения глобальной калибровочной симметрии, приводящей к возникновению голдстоуновского бозона.
8. Модель кварков для адронов и базовые принципы квантовой хромодинамики.
9. Введение в концепцию духов Фаддеева—Попова в рамках формализма континуального интеграла.
10. Получение тождеств Славнова—Тейлора—Уорда—Такахаши, вытекающих из калибровочной инвариантности действия.

Каждый вопрос задания оценён в определённую сумму баллов в зависимости от сложности и уровня (знания, умения и навыки).

Условия набора баллов за работу в семестре могут определяться лектором в начале каждого семестра, но удовлетворяют общему правилу, принятому на заседании кафедры. В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам сдачи домашнего задания, что

соответствует оценке видов работы. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

Итоговая оценка дифференцированного зачёта выставляется в соответствии со схемой, приведенной в следующем разделе.

#### **4а. Критерии оценивания (дифференцированный зачёт)**

Оценка	Набранные баллы
отлично (10)	более 90%
отлично (9)	от 80% до 90% включительно
хорошо (8)	от 70% до 80% включительно
хорошо (7)	от 60% до 70% включительно
хорошо (6)	от 50% до 60% включительно
удовлетворительно (5)	от 40% до 50% включительно
удовлетворительно (4)	от 30% до 40% включительно
удовлетворительно (3)	Требуется дополнительное тестирование по проблемным вопросам (темам)
неудовлетворительно (2)	Не получена удовлетворительная оценка в период зачётной сессии.

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

Работа с учебной и научной литературой является главной формой самостоятельной работы. Она включает проработку лекционного материала – изучение литературы по тематике лекций. Типовые задачи разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Работа с литературой не только полезна как средство более глубокого изучения любой дисциплины, но и является неотъемлемой частью профессиональной деятельности будущего выпускника. Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.