

**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:	Введение в квантовую хромодинамику
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой теории поля, теории струн и математической физики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: И.В. Полюбин, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой теории поля, теории струн и математической физики
27.03.2025

Аннотация

Курс представляет собой введение в квантовую хромодинамику (КХД).

Осенний семестр посвящен в основном изучению неабелевых калибровочных теорий, примером которых является КХД. В частности, рассматриваются:

Классическая теория полей Янга-Миллса, включая инстантоны. Квантование калибровочных теорий (фиксация калибровки, духи Фаддева-Попова, БРСТ-квантование). Перенормировка теории. Эффективный заряд и асимптотическая свобода. Инфракрасные и коллинеарные расходимости. $1/N$ разложение.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

формирование у студентов представления о современном состоянии КХД и калибровочных полях в контексте квантовой теории поля.

Задачи дисциплины

- обучение студентов основным принципам и методам теории калибровочных полей,
- подготовка студентов к проведению исследований в области КХД, калибровочных полей и смежных областях теоретической и математической физики.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию

ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основные принципы теории калибровочных полей, пертурбативные и, отчасти, непертурбативные методы КХД.

уметь:

вычислять древесные и однопетлевые амплитуды и функции Грина.

владеть:

диаграммной техникой.

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	Классическая теория калибровочных полей	6			3
2	Квантование калибровочных теорий	6			3
3	Основы перенормировок	6			3
4	Эффективный заряд и асимптотическая свобода	6			3
5	Инфракрасные и коллинеарные расходимости	6			3
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Классическая теория калибровочных полей

Введение. Алгебра $su(N)$. Калибровочная инвариантность. Наблюдаемые. Инвариантное действие. Уравнения движения. Гамильтониан. Топологический заряд. Инстантоны. Явные решения.

2. Квантование калибровочных теорий

Квантование систем со связями первого рода. Фиксация калибровки. Духи Фаддеева-Попова. Правила Фейнмана. Грибовские копии. Тождества Славнова-Тэйлора. Калибровка внешнего поля.

3. Основы перенормировок

Ультрафиолетовые расходимости и регуляризация. Разные типы регуляризаций. Перенормируемость.

Перенормировки пропагаторов, вершин, заряда. Неоднозначности.

4. Эффективный заряд и асимптотическая свобода

Вычисление бета-функции. Асимптотическая свобода. Размерная трансмутация и лямбда кхд. Метод внешнего поля. Аномалия в следе тензора энергии-импульса.

5. Инфракрасные и коллинеарные расходимости

Инфракрасные расходимости и их сокращение. Коллинеарные расходимости. Теорема КЛН. Дважды логарифмическая асимптотика.

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

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц [Текст]/М. Б. Волошин, К. А. Тер-Мартirosян, -М., Энергоатомиздат, 1984
2. Квантовая теория поля [Текст]. В 2 т. Т. 1 / К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер. -М.: Мир, 1984
3. Квантовая теория поля [Текст]. В 2 т. Т. 2 / К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер. -М.: Мир, 1984
4. A. Smilga, Lectures on QUANTUM CHROMODYNAMICS. World Scientific, 2001

Дополнительная литература

1. Введение в квантовую теорию поля [Текст] : [учебник для вузов] / М. Пескин, Д. Шредер ; пер. с англ. под ред. А.А. Белавина, А. В. Беркова. — М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. — 784 с.
2. А. М. Поляков, Калибровочные поля и струны.- РХД, 1999
3. Иоффе Б.Л., Липатов Л.Н., Фадин В.С. , Квантовая хромодинамика: в 2т. - URSS, 2019

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

<http://issp3.issp.ac.ru/kafedra/>

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

Не предусмотрено.

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 дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач. Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях;
- при необходимости подготовку к коллоквиумам, дифференцированному зачету.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

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

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:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой теории поля, теории струн и математической физики
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
Разработчик:	И.В. Полюбин, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в квантовую хромодинамику» обучающийся должен:

знать:

основные принципы теории калибровочных полей, пертурбативные и, отчасти, непертурбативные методы КХД.

уметь:

вычислять древесные и однопетлевые амплитуды и функции Грина.

владеть:

диаграммной техникой.

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

Вопросы из домашнего задания:

1. Вычислить $f^{\{kam\}} f^{\{mbn\}} f^{\{nck\}}$
2. Найти тензор энергии-импульса для самодуального калибровочного поля.

3. Вычислить скобку Пуассона связей калибровочного поля.
4. Вычислить пропагатор калибровочного поля в аксиальной калибровке.
5. Получить вершину взаимодействия духов с внешним калибровочным полем в калибровке внешнего поля.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Как спадает напряженность поля инстантона с расстоянием?
2. Нулевые моды инстантона.
3. Проверить, что БРСТ-преобразование примененное дважды действует нулем.
4. Преимущества и недостатки размерной регуляризации.
5. Размерная трансмутация и $\Lambda_{\overline{MS}}$.
6. Найти вклад духов в поляризационный оператор в лоренцовой калибровке.
7. Показать, что лагранжиан теории Янга-Миллса инвариантен относительно преобразования инверсии.
8. Вычислить Z-фактор для вершины кварк-кварк-глюон.
9. Вычислить фазовый объем двух безмассовых частиц в $d=4-2\epsilon$ измерениях.
10. Вычислить действие и топологический заряд меронного решения.

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Размерная трансмутация и $\Lambda_{\overline{MS}}$.
2. Найти вклад духов в поляризационный оператор в лоренцовой калибровке.

Билет 2.

1. Вычислить фазовый объем двух безмассовых частиц в $d=4-2\epsilon$ измерениях.
2. Вычислить действие и топологический заряд меронного решения.

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

Дифференцированный зачёт проводится в письменной (устной) форме по билетам.

В каждом билете представлено два теоретических вопроса.

При проведении зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку.

Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.