

**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:	Сильное взаимодействие
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Дифференцированный зачет
2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

лекции: 60 час.
семинары: 30 час.
лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: Б.О. Кербиков, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
28.03.2025

Аннотация

Изучается теория сильных взаимодействий кварков и глюонов – квантовая хромодинамика (КХД). Излагаются базовые принципы, лежащие в основе КХД, и применение теории к описанию ключевых физических процессов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Целью дисциплины «Сильные взаимодействия» является формирование у студентов понимания устройства материи на фундаментальном кварковом уровне. В дальнейшем это позволит изучать современные научные публикации и работать в области экспериментальной и теоретической физики элементарных частиц.

Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний по электрослабым взаимодействиям;
- формирование навыков для решения задач.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
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-2.3 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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

теорию Вайнберга-Салама.

уметь:

вычислять времена жизни частиц.

владеть:

математическим аппаратом квантовой теории поля.

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	Введение.	5	5		5
2	Цвет, кварки и глюоны.	5	5		5
3	Калибровочная инвариантность.	5	5		5
4	Лагранжиан КХД. Правила Фейнмана.	5	5		5
5	Асимптотическая свобода. Структурные функции, партоны.	5	5		5
6	Инфракрасная проблема. Кварконий.	5	5		5
7	Перенормировки. Функция Гелл-Манна-Лоу.	5			5
8	Уравнение Каллана-Симанчика.	5			5
9	Размерная трансмутация. Масштабная инвариантность.	5			5
10	Кварковый и глюонный конденсаты.	5			5
11	КХД на решетке.	5			5
12	Новые подходы.	5			5
Итого часов		60	30		60
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	180 час., 4 зач.ед.
--------------------	---------------------

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение.

Система единиц и метрика. Стандартная модель. Действие и лагранжиан. Глобальная и локальная симметрии.

2. Цвет, кварки и глюоны.

Цветовая структура мезонов и барионов. Аннигиляция электрона и позитрона в адроны. Группа $SU(3)$, генераторы и представления.

3. Калибровочная инвариантность.

Длинная производная. Калибровочное преобразование. Тензор глюонного поля.

4. Лагранжиан КХД. Правила Фейнмана.

Кинетический член и член Янга-Миллса. Трехглюонная вершина. Пропагаторы кварка и глюона. Кварк-глюонная вершина.

5. Асимптотическая свобода. Структурные функции, партоны.

Глубоко-неупругое рассеяние. Переменная Бьеркена. Структурные функции. Партоны. Функции распределения.

6. Инфракрасная проблема. Кварконий.

Бегущая константа связи. Размерный параметр. Чармоний и малая ширина. Спектроскопия чармония и боттомония.

Семестр: 2 (Весенний)

7. Перенормировки. Функция Гелл-Манна-Лоу.

Расходимости в КХД. Однопетлевое приближение. Поля «духов» Фаддеева-Попова. Функция Гелл-Манна—Лоу.

8. Уравнение Каллана-Симанчика.

Канонические и аномальные размерности. Зависимость амплитуд от импульсов. Эволюция константы КХД.

9. Размерная трансмутация. Масштабная инвариантность.

Физическая причина появления размерной константы в КХД. Нарушение масштабной инвариантности квантовыми эффектами.

10. Кварковый и глюонный конденсаты.

Киральная симметрия. Соотношение Гелл-Манна-Оакса-Реннера. Правила сумм.

11. КХД на решетке.

Евклидова формулировка. Глюонное поле на ребре решетки. Петля Вильсона.

12. Новые подходы.

Суперсимметрия, великое объединение, дополнительные измерения.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном, доской.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Классические калибровочные поля. Теории с фермионами. Некоммутативные теории [Текст], [учеб. пособие для вузов] / В. А. Рубаков. - М., ЛЕНАНД, 2018
2. 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.
3. Квантовая теория поля [Текст] = Quantum field theory : [учеб. пособие для вузов] / Л. Райдер, пер. с англ. С. И. Азакова ; под ред. Р. А. Мир-Касимова. — М. : Мир, 1987. — 512 с.
4. Квантовая теория поля в физике конденсированного состояния [Текст]/А. М. Цвелик, -М., Физматлит, 2004
5. Классические калибровочные поля : Бозонные теории [Текст] / В. А. Рубаков - М.ЛИБРОКОМ, 2016
6. Зи Э. Квантовая теория поля в двух словах. Москва-Ижевск: НИЦ «РХД», 2009.
7. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц [Текст]/М. Б. Волошин, К. А. Тер-Мартirosян, -М., Энергоатомиздат, 1984

Дополнительная литература

1. Теория поля : Современный вводный курс [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / П. Рамон ; пер. с англ. А. В. Беркова. — М. : Мир, 1984. — 332 с.
2. Терентьев М.В. Введение в теорию элементарных частиц. М.: ИТЭФ, 1998.

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

- <http://www.gpntb.ru/> -- сайт Государственной публичной научно-технической библиотеки
- <http://elibrary.ru/> -- база данных научных статей
- <http://pdg.lbl.gov/> -- официальный ресурс Particle Data Group

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Mathlab и Wolfram Mathematica (и др.)

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

Для освоения данной дисциплины обучающийся должен:

- иметь хорошую математическую подготовку, включая базовые знания по теории групп;

- свободно владеть аппаратом квантовой механики;
- обладать знанием основ теории поля, включая технику диаграмм Фейнмана;
- иметь навык устных и письменных вычислений.

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 и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену, 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 или преподавателю, ведущему практические занятия.

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

Для более глубокого освоения дисциплины рекомендуется литература:

1. Iliopoulos J. Introduction to the Standard Model of the Electro-Weak Interactions. CERN, 2012. (<http://arxiv.org/pdf/1305.6779.pdf>)
2. Ioffe B.L., Fadin V.S. and Lipatov L.N. Quantum Chromodynamics: Perturbative and Nonperturbative Aspects. N.Y.: CUP, 2010.

ПРИЛОЖЕНИЕ

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 фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: Б.О. Кербиков, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
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-2.3 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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Сильное взаимодействие» обучающийся должен:

знать:

теорию Вайнберга-Салама.

уметь:

вычислять времена жизни частиц.

владеть:

математическим аппаратом квантовой теории поля.

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

Не предусмотрено.

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

Перечень контрольных вопросов (9 семестр):

Тема 1. КХД как теория поля

1. Действие, лагранжиан.
2. Симметрия и её нарушение.
3. Калибровочная инвариантность.

Тема 2. Цвет, элементы теории группы

1. Принцип Паули и цвет. Аннигиляция. Электрон-позитрон и цвет.
2. Группа $SU(N)$, генераторы, матрицы Гелл-Манна.
3. Фундаментальное и присоединённое представление.

Тема 3. Лагранжиан КХД

1. Ковариантная производная.
2. Лагранжиан Янга-Миллса.
3. Уравнения движения.

Тема 4. Калибровочная инвариантность

1. Калибровочное преобразование.
2. Типы калибровки электромагнитного поля.
3. Кулоновская калибровка.

Тема 5. Асимптотическая свобода

4. Опыты по рассеянию электронов на протонах.
5. Переменная Бьеркена и её физический смысл.
6. Структурные функции и соотношение Каллана-Гросса.

Тема 6. Инфракрасная проблема и кварконий

1. Струна КХД и потенциал.
2. Кварк-антикварковый потенциал.
3. Спектроскопия чармония и боттомония.

Перечень Контрольных вопросов (10 семестр):

Тема 7. Перенормировки

1. Расходимости в теории поля.
2. Перенормировки в КЭД или КХД.
3. Функции Гелл-Манна—Лоу.

Тема 8. Уравнение Каллана-Симанчика

1. Ренормгрупповые потоки.
2. Перенормировочная функция Грина.
3. Уравнение для двухточечной функции.

Тема 9. Размерная трансмутация. Масштабная инвариантность.

1. Безмассовая скалярная электродинамика.

2. Перенормируемость и калибровочная инвариантность.

Тема 10. Конденсаты в КХД

1. Киральная симметрия.

2. Аномалия.

3. Глюонный конденсат.

Тема 11. КХД на решетке

1. Почему решетка?

2. Вычисление глюонного квадрата.

3. Петля вильсона и невылетание.

Тема 12. Новые подходы

1. Суперсимметрия – основная идея.

2. Великое объединение, распад протона.

3. Дополнительные измерения, голография.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ (9 СЕМЕСТР):

1) Размерность действия и лагранжиана в натуральной системе единиц.

2) Фундаментальное и просоединенное представление группы $SU(2)$.

3) Калибровочная инвариантность и масса фотона.

4) Уравнение движения глюонного поля без кварков.

5) Соотношение Каллана-Гросса.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ (10 СЕМЕСТР):

1) Формула для волновой функции в начале координат.

2) Однопетлевое приближение.

3) Спин кваркового конденсата.

4) Лагранжиан Янга-Миллса на решетке.

5) Ограничение на время жизни протона.

Примеры билетов в 9-ом семестре:

Билет 1.

1. Расходимости в КХД. Однопетлевое приближение. Поля «духов» Фаддеева-Попова. Функция Гелл-Манна—Лоу.

2. Лагранжиан Янга-Миллса на решетке.

Билет 2.

1. Уравнение Каллана-Симанчика. Канонические и аномальные размерности. Зависимость амплитуд от импульсов. Эволюция константы КХД.

2. Ограничение на время жизни протона.

Примеры билетов в 10-ом семестре:

Билет 1.

1. Струна КХД и потенциал. Кварк-антикварковый потенциал. Спектроскопия чармония и боттомония.

2. КХД на решетке. Вычисление глюонного квадрата. Петля вильсона и невылетание.

Билет 2.

1. Принцип Паули и цвет. Аннигиляция. Электрон-позитрон и цвет. Группа $SU(N)$, генераторы, матрицы Гелл-Манна. Фундаментальное и присоединённое представление.

2. Калибровочное преобразование. Типы калибровки электромагнитного поля. Кулоновская калибровка.

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

Прием дифференцированного зачета и экзамена проводится по билетам. В каждом билете представлено два задания. Обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.