

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
природоподобных, плазменных и  
ядерных технологий им. И.В.  
Курчатова**

**Т.Е. Григорьев**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Сильные взаимодействия
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.А. Петров, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической астрофизики и квантовой теории поля 21.02.2025

## Аннотация

Курс лекций посвящен систематическому изложению современной теории сильных взаимодействий и предназначен для студентов, специализирующихся в области экспериментальной физики высоких энергий.

В лекциях изложены основы аксиоматического метода в квантовой теории поля. Подробно рассматриваются теоретические описания процессов сильного взаимодействия при больших энергиях на основе общих принципов. Изложены основные идеи реджевской феноменологии. Дано введение в статистический подход в теории частиц и квантовой теории поля на решётке.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- ознакомить студентов с основами и методами теории взаимодействий адронов в столкновениях при высоких энергиях.

### Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний неабелевых калибровочных теорий, а также эффективных теорий поля.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
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-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-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- лагранжев формализм в теории поля, основы построения квантовой теории поля, группы и алгебры Ли, линейные представления.

уметь:

- применять формализм Лагранжа для построения полевых моделей, вычислять амплитуды простейших процессов в КЭД слабых процессов.

владеть:

- правилами работы с диаграммами Фейнмана;
- методами построения простейших квантовых теорий 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	S-матрица в квантовой теории поля. Эффективные сечения.	3	3		5
2	Аналитические свойства амплитуды рассеяния. Основные постулаты теории сильных взаимодействий. Редукционные формулы.	3	3		5
3	Дисперсионные соотношения.	3	3		5
4	Асимптотические ограничения на поведение сечений.	3	3		5
5	Полуса Редже. Дифракционные процессы.	3	3		5
6	КХД. Ренормгруппа. Асимптотическая свобода. Конфайнмент.	3	3		5
7	Жёсткие процессы.	4	4		5
8	Термодинамические и статистические методы в теории сильных взаимодействий.	4	4		5
9	Элементы решёточной КХД.	4	4		5
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. S-матрица в квантовой теории поля. Эффективные сечения.

Определение амплитуды процессов взаимодействия в терминах S-матрицы. Условие унитарности. Вероятности и эффективные сечения. Упругие, эксклюзивные и инклюзивные процессы.

2. Аналитические свойства амплитуды рассеяния. Основные постулаты теории сильных взаимодействий. Редукционные формулы.

Условие микропричинности. Аналитические свойства амплитуды упругого рассеяния по энергии и углу рассеяния.

3. Дисперсионные соотношения.

Представление Челлена - Лемана. Кроссинг – симметрия и дисперсионные соотношения для амплитуды рассеяния вперёд. Теорема Померанчука и её модификации.

4. Асимптотические ограничения на поведение сечений.

Разложение упругой амплитуды по парциальным волнам. Ограничение на поведение амплитуд и сечений при высоких энергиях из условия унитарности и полиномиальной ограниченности.

5. Полюса Редже. Дифракционные процессы.

Полюса Редже в квантовой механике. Понятие о реджеоне на примере атома водорода.

Представление Фруассара-Грибова. Сигнатура. Полюса и разрезы в плоскости комплексных угловых моментов и асимптотическое поведение упругих и инклюзивных сечений.

6. КХД. Ренормгруппа. Асимптотическая свобода. Конфайнмент.

Произвол в перенормированных функциях Грина. Независимость физических величин от схемы перенормировки. «Бегущие» параметры в КЭД и КХД.

7. Жёсткие процессы.

Партонная модель.  $e^+ e^-$  - аннигиляция в адроны, глубоконеупругое рассеяние лептонов, процесс Дрелла-Яна, процессы с большим поперечным импульсом.

8. Термодинамические и статистические методы в теории сильных взаимодействий.

Условия термализации в области взаимодействия. Термодинамические модели Ферми-Янга и Померанчука. Гидродинамическая модель Ландау.

9. Элементы решёточной КХД.

Евклидова теория поля. Решёточная регуляризация. Получение оценок на массы связанных состояний.

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

Учебная аудитория, оснащенная доской, мультимедиапроектором и экраном.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Квантовые поля [Текст] / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков - М. Физматлит, 2005
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. Квантовая хромодинамика [Текст] = Quantum chromodynamics, Введение в теорию кварков и глюонов/Ф. Индурайн, -М., Мир, 1986
5. Теоретическая физика [Текст]. В 10 т. Т. 4. Квантовая электродинамика / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский, М., Физматлит, 1989, 2001, 2002, 2006
- Фонд литературы кафедры

#### Дополнительная литература

1. Лептоны и кварки [Текст]/Л. Б. Окунь, -М., ЛКИ, 2013
  2. Калибровочные теории в физике элементарных частиц [Текст] = Gauge theory of elementary particle physics/Та-пей Ченг, Линг-фонг Ли, -М., Мир, 1987
  3. Взаимодействие фотонов с адронами [Текст]/Р. Фейнман, -М., Мир, 1975
  4. Квантовая теория поля [Текст]. В 2 т. Т. 1/С. Вайнберг, -М., Физматлит, 2003
- Фонд литературы кафедры
5. The Review of Particle Physics (2016)" / C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, {\bf 40}, 100001 (2016).

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

<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».

<http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

<http://www.i-exam.ru> – единый портал Интернет-тестирования в сфере образования.

### **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:

- 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 текущей и 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.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.А. Петров, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
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-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-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Сильные взаимодействия» обучающийся должен:

### знать:

- лагранжев формализм в теории поля, основы построения квантовой теории поля, группы и алгебры Ли, линейные представления.

### уметь:

- применять формализм Лагранжа для построения полевых моделей, вычислять амплитуды простейших процессов в КЭД слабых процессов.

### владеть:

- правилами работы с диаграммами Фейнмана;
- методами построения простейших квантовых теорий поля.

## 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 по теме прошлого занятия.

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

1. Поле Дирака.
2. Перенормировки.
3. Инвариантный заряд и ренормализационная группа.
4. Поля Янга-Миллса.
5. Правила Фейнмана в теориях Янга-Миллса.
6. Квантовая хромодинамика.
7. Лагранжиан квантовой хромодинамики.
8. Инфракрасная проблема КХД.
9. Жесткие процессы.
10. Эволюция структурных функций и  $\alpha_s$ .
11. Стандартная модель.
12. Механизм Хиггса.
13. Уравнение для связанных состояний в КТП.
14. Распады и рождение тяжелых кваркониумов.
15. Элементы алгебры токов.
16. Физика бозонов Хиггса и топ-кварков в рамках Стандартной модели.
17. Проблемы стандартной модели.
18. Эффективная теория поля. Примеры лагранжианов в ЭТП.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Поле Дирака.
2. Жесткие процессы.

Билет 2.

1. Перенормировки.
2. Эффективная теория поля. Примеры лагранжианов в ЭТП.

#### 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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.