

**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)

по дисциплине:	Феноменология сильных взаимодействий
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики высоких энергий
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (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: А.М. Зайцев, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высоких энергий 31.03.2025

Аннотация

Курс лекций посвящен систематическому изложению современной теории сильных взаимодействий. Рассматриваются основные вопросы кинематики, партонная модель и основные моменты процессов распадов и столкновений частиц. Также излагаются основы реджеонного подхода. Подробно описывается кварковая модель адронов и ее основные следствия. В заключительных лекциях обсуждаются (на качественном уровне) элементы Квантовой хромодинамики.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Систематическое изложение феноменологии сильных взаимодействий.

Задачи дисциплины

дать студентам понимание основных концепций феноменологии сильных взаимодействий: квантовой хромодинамики, партонной модели, кварковой модели адронов; сформировать знания, необходимые для теоретических исследований по современным актуальным проблемам, обучить их, на примере решения задач, активно использовать полученные знания.

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-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	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-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-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Кинематику физики высоких энергий, основы КХД как квантовой неабелевой теории поля.

уметь:

- Применять непертурбативные методы описания адронной динамики в области малых энергий.

владеть:

- Теоретическим описанием процессов сильного взаимодействия при больших энергиях в рамках теории возмущений.

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	Основы кинематики. Лоренц-инвариантный фазовый объем.	3	3		3
2	Основные процессы с элементарными частицами.	3	3		3
3	Партонная модель.	3	3		3
4	Глубоко-неупругое рассеяние лептонов.	2	2		4
5	Эффект Примакова.	2	2		4
6	Конструирование амплитуд процессов.	3	3		3
7	Элементы "Реджистики".	2	2		4
8	Введение в унитарную симметрию SU(n).	2	2		4
9	SU(6): кварки со спином, орбитальные возбуждения кварковых систем.	2	2		4
10	Примеры моделей адронов.	2	2		4
11	Цветовая группа SU(3). Физические принципы построения КХД.	2	2		3
12	Качественные следствия КХД.	2	2		3
13	Адронные струи.	2	2		3
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: 8 (Весенний)

1. Основы кинематики. Лоренц-инвариантный фазовый объем.

Классификация процессов в ФВЭ. Распады частиц. Ширина и время жизни. Рассеяние частиц. Сечение. Лоренц-инвариантный фазовый объем. Двух-частичный фазовый объем. Трех-частичный фазовый.

2. Основные процессы с элементарными частицами.

Распад $1 \rightarrow 2$. Реконструкция 4-импульса W-бозона. Якобиановский пик. Инвариантное интегрирование фазового объема. Построение амплитуды рассеяния. Понятие S-матрицы. Оптическая теорема.

3. Партонная модель.

Введение. Партонная модель в системе бесконечного импульса. Основная формула партонной модели. Функции распределения кварков и глюонов в адронах. Адронизация кварков и глюонов. Функции фрагментации. Процесс Дрелла-Яна. Образование векторных мезонов в партонной модели ("слияние" кварков). Качественное описание спектров мезонов в мезонных и барионных пучках. Рождение адронов с большими поперечными импульсами.

4. Глубоко-неупругое рассеяние лептонов.

Кинематика. Дифференциальное сечение рассеяния. Бьеркеновский скейлинг. Сечения поглощения поперечных и продольных фотонов. Рассеяние лептонов на партонах.

5. Эффект Примакова.

Одно-фотонный механизм рассеяния. Измерение радиационных ширин адронов.

6. Конструирование амплитуд процессов.

Понятие виртуальной частицы. Пропагатор. Построение амплитуд процессов. Модель Земаха. Оценки ширин распадов и сечений. Форм-факторы частиц. Описание распада $\eta \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^-$ в модели векторной доминантности.

7. Элементы "Реджистики".

Траектории Редже. Построение амплитуд. Описание процессов.

8. Введение в унитарную симметрию SU(n).

Основные понятия об унитарной симметрии SU(n). Кварковая модель мезонов и барионов.

9. SU(6): кварки со спином, орбитальные возбуждения кварковых систем.

Мезоны и барионы. Примеры простых вычислений. Расщепление масс в адронных супермультиплетях.

10. Примеры моделей адронов.

Модели мешков и др.

11. Цветовая группа SU(3). Физические принципы построения КХД.

Понятие ``цвета" и "цветных" сил. Матрицы Гелл-Манна, примеры вычислений. Цветные волновые функции (спиноры, вектора), матрицы плотности, нормировки. Вычисления цветовых коэффициентов матричных элементов.

12. Качественные следствия КХД.

Связанные состояния. Потенциал в КХД. Модель кваркония. Массы и ширины распадов в модели кваркония.

13. Адронные струи.

Адронные струи. Алгоритмы реконструкции адронных струй. ``Широкие" (boosted) струи.

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

Для занятий требуется аудитория, оборудованная доской.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лептоны и кварки [Текст] / Л. Б. Окунь .— 3-е изд., стереотип. — М. : Едиториал УРСС, 2005 .— 352 с.
 2. Кинематика элементарных частиц [Текст] = Particle kinematics/Е. Бюклинг, К. Каянти , -М., Мир, 1975
 3. Кварки и партоны [Текст], введение в теорию /Ф. Клоуз; пер. с англ. П. Б. Вигмана; под ред. Н. Н. Николаева, An introduction to quarks and partons. -М., Мир, 1982
 4. Взаимодействие фотонов с адронами [Текст]/Р. Фейнман, -М., Мир, 1975
- Фонд литературы кафедры

Дополнительная литература

1. Введение в теорию квантовых полей [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков .— 4-е изд., испр. — М. : Наука, 1984 .— 600 с.
 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
- Фонд литературы кафедры

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

Не используются

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)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики высоких энергий
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	А.М. Зайцев, д-р физ.-мат. наук, 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-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	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-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-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Феноменология сильных взаимодействий» обучающийся должен:

знать:

- Кинематику физики высоких энергий, основы КХД как квантовой неабелевой теории поля.

уметь:

- Применять непертурбативные методы описания адронной динамики в области малых энергий.

владеть:

- Теоретическим описанием процессов сильного взаимодействия при больших энергиях в рамках теории возмущений.

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

- Необходимость введения нового квантового числа - "цвет" и нового взаимодействия
- Различие между квантовым числом и зарядом
- Матрицы Гелл-Мана (SU(3)-группа)
- Цветные волновые функции (спиноры, вектора), матрицы плотности, нормировки
- Вычисления цветовых коэффициентов матричных элементов.
- e^+e^- - аннигиляция в адроны
- Глубоко-неупругое рассеяние
- Нарушение скейлинга в структурных функциях
- Основные жесткие подпроцессы в адронных столкновениях
- Глюон-глюонная аннигиляция в кварки
- Адронизация кварков и глюонов. Функции фрагментации
- Адронизация кварков и глюонов. Адронные струи и алгоритмы их реконструкции
- Потенциал в КХД. Модель кваркония
- Вычисление масс и ширины распадов в модели кваркония
- Появление новых типов вершин, форм-факторы, "бегущая" константа связи
- Простейшие следствия: константы связи в КЭД, КХД, электрослабой теории
- Извлечение бегущей константы связи КХД из эксперимента
- Киральная инвариантность. Частичное сохранение аксиального тока
- Отношения масс кварков. Ограничения на массы легких кварков
- Распады легких мезонов
- КХД вакуум. Экзотические связанные состояния: глюболы, гибриды

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Необходимость введения нового квантового числа - "цвет" и нового взаимодействия.
2. Нарушение скейлинга в структурных функциях.

Билет 2.

1. Различие между квантовым числом и зарядом. Матрицы Гелл-Мана (SU(3)-группа).
2. Потенциал в КХД. Модель кваркония.

Критерии оценивания

- оценка "отлично (10)" 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 (9)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "отлично (8)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "хорошо (7)" выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "хорошо (6)" выставляется студенту, если он знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

- оценка "хорошо (5)" выставляется студенту, если он знает материал, по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "удовлетворительно (4)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировка базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом владеющему основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и способному применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка "удовлетворительно (3)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировка базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом владеющему фрагментарно основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и способному применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка "неудовлетворительно (2)" выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;
- оценка "неудовлетворительно (1)" выставляется студенту, который не знает формулировок основных понятий дисциплины.

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

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 1 час времени на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также любой литературой и вычислительной техникой.