

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ****Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования****«Московский физико-технический институт (государственный университет)»  
МФТИ****Кафедра «Фундаментальных и прикладных проблем физики микромира»****«УТВЕРЖДАЮ»****Проректор по учебной работе****\_\_\_\_\_ О.А. Горшков  
\_\_\_\_\_ 2012 г.****РАБОЧАЯ УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА****по дисциплине: Квантовая хромодинамика****по направлению: 010900 «Прикладные математика и физика»****магистерская программа: 010912 – «Теоретические проблемы физики  
элементарных частиц»****факультет: ФОПФ****кафедра: Фундаментальных и прикладных проблем физики микромира****курс: 5 (магистратура)****семестр: весенний****Экзамен: 10 семестр****Трудоёмкость в зач. ед.: вариативная - 4 зач.ед.****в т.ч.:****лекции: вариативная часть - 32 часа****семинарские занятия: вариативная часть - 32 часа****лабораторные занятия: нет****самостоятельная работа: вариативная часть - 94 часов, 2 зач.ед.****ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ: 64****Программу составил к.ф.-м.н. Нестеренко А.В.****Программа обсуждена на заседании кафедры «Фундаментальных и прикладных  
проблем физики микромира»****« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.****Заведующий кафедрой****д.ф.-м.н., профессор Казаков Д.И.**

## ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ

<b>Вариативная часть, в т.ч. :</b>	<u>  4  </u> зач. ед.
Лекции	<u>  32  </u> часа
Семинарские занятия	<u>  32  </u> часа
Лабораторные работы	<u>  –  </u> часов
Индивидуальные занятия с преподавателем	<u>  –  </u> часов
Самостоятельные занятия	<u>  94  </u> часов
<b>ВСЕГО</b>	158 часов (4 зач. ед.)
<b>Итоговая аттестация</b>	<b>Экзамен 10 семестр</b>

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель курса - освоение студентами фундаментальных знаний в области современной физики элементарных частиц, изучение основ теории сильных взаимодействий и методов теоретического описания различных процессов адронной физики, а также приобретение базовых навыков самостоятельной научно-исследовательской работы.

*Задачами данного курса являются:*

- формирование базовых знаний в области теоретической физики элементарных частиц;
- обучение студентов современным методам теоретического описания различных процессов сильного взаимодействия и навыкам решения сопутствующих задач;
- формирование подходов к выполнению студентами исследований в области теоретической физики в рамках выпускных работ на степень магистра.

### 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП МАГИСТРАТУРЫ

Дисциплина «**Квантовая хромодинамика**» включает в себя разделы, которые могут быть отнесены к вариативной части профессионального цикла ООП М.1.

Дисциплина «**Квантовая хромодинамика**» базируется на материалах курсов, читаемых в рамках базовой и вариативной частей УЦ ООП Б.2 и Б.3 (Математический анализ, Дифференциальные уравнения, Теория функций комплексного переменного, Уравнения математической физики, Квантовая теория поля, Физика элементарных частиц, Квантовая теория калибровочных полей), и относится к профессиональному циклу.

### КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Освоение дисциплины «**Квантовая хромодинамика**» направлено на формирование следующих общекультурных и профессиональных компетенций магистра:

#### **а) общекультурные (ОК):**

- компетенция самообразования и самоорганизации (ОК-1);

- компетенция профессиональной мобильности (ОК-2);
- компетенция получения знаний и использования новой информации (ОК-3);
- компетенция системного аналитического мышления (ОК-4);
- компетенция креативности (ОК-5).

**б) профессиональные (ПК):**

- компетенция профессионального использования информации (ПК-1);
- компетенция профессиональной аналитической деятельности (ПК-2);
- компетенция креативности в научно-исследовательской и инновационной деятельности (ПК-3);
- компетенция профессионального владения информационно-коммуникационными технологиями (ПК-4);
- компетенция презентации своей деятельности (ПК-6);
- компетенция самостоятельных исследований (ПК-10);
- компетенция обобщения и презентации результатов исследований (ПК-15).

### **3. КОНКРЕТНЫЕ ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ И НАВЫКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**В результате освоения дисциплины «Квантовая хромодинамика» обучающийся должен:**

**1. Знать:**

- лагранжиан квантовой хромодинамики;
- особенности квантования калибровочных теорий;
- правила Фейнмана для квантовой хромодинамики;
- перенормировку в квантовой хромодинамике;
- уравнения ренормализационной группы;
- определение и свойства инвариантного заряда квантовой хромодинамики;
- асимптотическую свободу в квантовой хромодинамике;
- партонную модель, партонные функции распределения и функции фрагментации;
- особенности описания процессов сильного взаимодействия во времениподобной области;
- операторное разложение и вакуумные конденсаты;
- особенности описания мезонов и барионов в рамках потенциального подхода;
- модель мешков;
- уравнения самодуальности, одноинстантонное решение и его свойства.

**2. Уметь:**

- эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики элементарных частиц.

**3. Владеть:**

- техникой вычисления основных характеристик процессов сильного взаимодействия;
- основными методами регуляризации импульсных интегралов;
- основными схемами вычитания расходимостей;
- методом ренормализационной группы в квантовой хромодинамике;
- методом дисперсионных соотношений;
- методом правил сумм в квантовой хромодинамике;
- техникой описания мезонов в рамках потенциального подхода;
- техникой описания адронов в рамках модели мешков;
- техникой описания топологически нетривиальных полевых конфигураций.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

##### Структура преподавания дисциплины

##### Перечень разделов дисциплины и распределение времени по темам

№ темы и название	Количество часов
1. Введение (часть I).	8
2. Введение (часть II).	8
3. Расходимости в квантовой теории поля и их устранение методом перенормировки.	8
4. Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть I).	8
5. Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть II).	8
6. Инвариантный заряд и асимптотическая свобода в квантовой хромодинамике.	8
7. Партоновая модель (часть I).	8
8. Партоновая модель (часть II).	8
9. Электрон-позитронная аннигиляция в адроны.	8
10. Инклюзивный распад тау-лептона в адроны.	8
11. Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть I).	8
12. Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть II).	8
13. Правила сумм в квантовой хромодинамике.	8
14. Конфайнмент кварков: потенциальные модели.	8
15. Конфайнмент кварков: модель мешков.	8
16. Топологическая структура вакуума в квантовой хромодинамике.	8
ВСЕГО (часов (зач.ед.))	128 часов (4 зач.ед.)

##### ВИД ЗАНЯТИЙ: ЛЕКЦИИ

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость в зач. ед. (количество часов)
1	Введение (часть I).	2
2	Введение (часть II).	2
3	Расходимости в квантовой теории поля и их устранение методом перенормировки.	2
4	Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть I).	2
5	Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть II).	2

6	Инвариантный заряд и асимптотическая свобода в квантовой хромодинамике.	2
7	Партонная модель (часть I).	2
8	Партонная модель (часть II).	2
9	Электрон-позитронная аннигиляция в адроны.	2
10	Инклюзивный распад тау-лептона в адроны.	2
11	Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть I).	2
12	Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть II).	2
13	Правила сумм в квантовой хромодинамике.	2
14	Конфайнмент кварков: потенциальные модели.	2
15	Конфайнмент кварков: модель мешков.	2
16	Топологическая структура вакуума в квантовой хромодинамике.	2
ВСЕГО (зач. ед. (часов))		1 зач. ед. (32 часа)

#### ВИД ЗАНЯТИЙ: СЕМИНАРЫ

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость в зач. ед. (количество часов)
1	Введение (часть I).	2
2	Введение (часть II).	2
3	Расходимости в квантовой теории поля и их устранение методом перенормировки.	2
4	Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть I).	2
5	Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть II).	2
6	Инвариантный заряд и асимптотическая свобода в квантовой хромодинамике.	2
7	Партонная модель (часть I).	2
8	Партонная модель (часть II).	2
9	Электрон-позитронная аннигиляция в адроны.	2
10	Инклюзивный распад тау-лептона в адроны.	2
11	Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть I).	2
12	Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть II).	2
13	Правила сумм в квантовой хромодинамике.	2
14	Конфайнмент кварков: потенциальные модели.	2

15	Конфайнмент кварков: модель мешков.	2
16	Топологическая структура вакуума в квантовой хромодинамике.	2
ВСЕГО (зач. ед. (часов))		1 зач. ед. (32 часа)

### ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость в зач. ед. (количество часов)
1	<b>Изучение теоретического курса</b> Выполняется самостоятельно каждым студентом по итогам каждой из лекций. Результаты контролируются преподавателем на лекционных занятиях. Используются конспекты лекций, учебное пособие, а также рекомендованная учебная литература.	32
2	<b>Решение задач по заданию преподавателя</b> Решаются задачи, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий. Результаты контролируются преподавателем на семинарских занятиях. Используются конспекты лекций, учебное пособие, включающее сборник задач, а также рекомендованная учебная литература.	32
3	<b>Подготовка к экзамену</b>	30
ВСЕГО (зач. ед. (часов))		94 часов (2 зач.ед.)

### Содержание дисциплины

#### Развёрнутые темы и вопросы по разделам

№ п/п	Название модулей	Разделы и темы лекционных занятий	Содержание	Объем	
				Аудиторная работа (зачетные единицы / часы)	Самостоятельная работа (зачетные единицы / часы)
1		Введение (часть I).	Предпосылки к созданию квантовой хромодинамики. SU(3) симметрия в физике адронов и кварковая модель. Квантовое число "цвет". Неабелевы калибровочные поля. Кварки и глюоны. Локальная калибровочная инвариантность теории. Лагранжиан квантовой хромодинамики. Ковариантные и аксиальные калибровки.	4	4

2		Введение (часть II).	Особенности квантования калибровочных теорий. Представление взаимодействия и матрица рассеяния в квантовой хромодинамике. Общие свойства S-матрицы. Теоремы Вика. Правила Фейнмана для квантовой хромодинамики.	4	4
3		Расходимости в квантовой теории поля и их устранение методом перенормировки.	Техника вычисления петлевых поправок. Методы регуляризации импульсных интегралов. Схемы вычитания расходимостей. Контрчлены и перенормировки. Преобразования Дайсона. Причины расходимостей в квантовой теории поля.	4	4
4		Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть I).	Перенормировка в глюодинамике. Метод ренормализационной группы. Инвариантный заряд квантовой хромодинамики. Уравнения ренормгруппы в функциональной и дифференциальной форме.	4	4
5		Метод ренормализационной группы в квантовой хромодинамике (часть II).	Ренормгрупповая бета-функция в рамках теории возмущений. Вычисление бета-функции квантовой хромодинамики в однопетлевом приближении.	4	4
6		Инвариантный заряд и асимптотическая свобода в квантовой хромодинамике.	Бегущая константа связи сильного взаимодействия на однопетлевом уровне. Масштабный параметр теории. Инвариантный заряд в высших петлевых приближениях. Извлечение бегущей константы связи квантовой хромодинамики из экспериментальных данных. Пороговые эффекты. Зависимость результатов теории возмущений от схемы вычитания.	4	4

7		Партонная модель (часть I).	Кинематика процессов лептон-адронного рассеяния. Сечения упругого рассеяния электрона на точечном и реальном протоне. Глубоконеупругое рассеяние лептонов на нуклонах. Структурные функции, бьеркеновский скейлинг. Дифференциальное сечение глубоконеупругого электрон-протонного рассеяния. Экспериментальные данные.	4	4
8		Партонная модель (часть II).	Партонные функции распределения, функции фрагментации, способы их параметризации. Операторное разложение и моменты структурных функций. Уравнение ренормализационной группы для моментов структурных функций и его решение в рамках теории возмущений.	4	4
9		Электрон-позитронная аннигиляция в адроны.	Кинематика и сечение процесса электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Особенности описания процессов сильного взаимодействия во времениподобной области. Дисперсионное соотношение для адронной функции поляризации вакуума. Дисперсионное соотношение для функции Адлера. Вклад сильного взаимодействия в адронную функцию поляризации вакуума. Вычисление R-отношения в рамках теории возмущений. Экспериментальные данные и их теоретический анализ.	4	4
10		Инклюзивный распад тау-лептона в адроны.	Кинематика и ширина адронного распада тау-лептона. Сильные поправки к адронной функции поляризации вакуума.	4	4

			Специфика описания инклюзивного распада тау-лептона в рамках теории возмущений. Экспериментальные данные и их теоретический анализ.		
11		Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть I).	Аномальный магнитный момент мюона. Экспериментальные данные и их теоретический анализ.	4	4
12		Вклад сильного взаимодействия в электрослабые процессы (часть II).	Эволюция бегущей константы связи электромагнитного взаимодействия: вычисление сдвига постоянной тонкой структуры на масштабе массы Z-бозона. Экспериментальные данные и их теоретический анализ.	4	4
13		Правила сумм в квантовой хромодинамике.	Пертурбативный вклад в корреляционную функцию кварковых токов. Операторное разложение и вакуумные конденсаты. Кварк-адронная дуальность. Вычисление константы распада $\rho$ -мезона в рамках метода правил сумм. Преимущества и недостатки метода правил сумм.	4	4
14		Конфайнмент кварков: потенциальные модели.	Закон Кулона в спинорной электродинамике. Кварк-антикварковый потенциал в приближении одноглюонного обмена. Описание мезонов и барионов в рамках потенциального подхода. Некоторые модели статического кварк-антикваркового потенциала. Методы регуляризации сингулярных Фурье-преобразований. Исследование конфайнмента кварков на решетке.	4	4
15		Конфайнмент кварков: модель мешков.	Феноменологическое описание вакуумного	4	4

			состояния в квантовой хромодинамике. Формулировка модели мешков, граничные условия для кварковых и глюонных полей. Давление внутри мешка и его устойчивость. Модель "MIT bag": преимущества и недостатки. Основные результаты и область применимости модели мешков.		
16		Топологическая структура вакуума в квантовой хромодинамике.	Евклидовы конфигурации полевых систем. Индекс Понтрягина. Уравнения самодуальности. Инстантоны в теории Янга-Миллса и их физическая интерпретация. Одноинстантонное решение для калибровочной группы SU(2) и его свойства. Вклад инстантонов в процессы сильного взаимодействия. Исследование топологической структуры вакуума квантовой хромодинамики на решетке.	4	4

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В учебном процессе используются следующие образовательные технологии:

№ п/п	Вид занятия	Форма проведения занятий	Цель
1	Лекция	Изложение теоретического материала	Получение теоретических знаний по дисциплине
2	Семинар	Решение задач	Повышение степени понимания материала, осознание связи между теорией и практикой, осознание взаимосвязи между различными дисциплинами, а также выработка навыков практического применения полученных знаний
3	Самостоятельная работа студента	Изучение теоретического курса и решение задач	Повышение степени понимания материала и выработка профессиональных навыков

## 6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

### Контрольно-измерительные материалы:

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в 10-ом семестре:

1. Лагранжиан квантовой хромодинамики.
2. Особенности квантования калибровочных теорий.
3. Правила Фейнмана для квантовой хромодинамики.
4. Методы регуляризации импульсных интегралов.
5. Схемы вычитания расходимостей.
6. Уравнения ренормализационной группы в функциональной и дифференциальной форме.
7. Инвариантный заряд квантовой хромодинамики.
8. Ренормгрупповая бета-функция квантовой хромодинамики в рамках теории возмущений.
9. Бегущая константа связи сильного взаимодействия на однопетлевом уровне.
10. Масштабный параметр квантовой хромодинамики.
11. Инвариантный заряд квантовой хромодинамики в высших петлевых приближениях.
12. Извлечение бегущей константы связи квантовой хромодинамики из экспериментальных данных.
13. Кинематика процессов лептон-адронного рассеяния.
14. Глубоконеупругое рассеяние лептонов на нуклонах.
15. Структурные функции, бьеркеновский скейлинг.
16. Дифференциальное сечение глубоконеупругого электрон-протонного рассеяния.
17. Партонные функции распределения и функции фрагментации.
18. Кинематика и сечение процесса электрон-позитронной аннигиляции в адроны.
19. Особенности описания процессов сильного взаимодействия во времениподобной области.
20. Дисперсионное соотношение для адронной функции поляризации вакуума.
21. Дисперсионное соотношение для функции Адлера.
22. Вычисление R-отношения электрон-позитронной аннигиляции в адроны.
23. Специфика описания инклюзивного распада тау-лептона в адроны в рамках теории возмущений.
24. Описание адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона.
25. Вычисление адронного вклада в сдвиг постоянной тонкой структуры на масштабе массы Z-бозона.
26. Правила сумм в квантовой хромодинамике.
27. Операторное разложение и вакуумные конденсаты. Кварк-адронная дуальность.
28. Кварк-антикварковый потенциал в приближении одноглюонного обмена.
29. Методы регуляризации сингулярных Фурье-преобразований.
30. Модель мешков, граничные условия для кварковых и глюонных полей.
31. Уравнения самодуальности. Индекс Понтрягина.
32. Инстантоны в теории Янга-Миллса и их физическая интерпретация.

## 7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Необходимое оборудование для лекций и практических занятий:

компьютер и мультимедийное оборудование (проектор)

### Необходимое программное обеспечение:

Adobe Acrobat Reader

### Обеспечение самостоятельной работы:

доступ к библиотеке и базам данных по журналам Теоретическая и математическая физика, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Physical Review D, Reviews of Modern Physics.

## 8. НАИМЕНОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ТЕМ КУРСОВЫХ РАБОТ

учебным планом не предусмотрено

## 9. ТЕМАТИКА И ФОРМЫ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ РАБОТЫ

учебным планом не предусмотрено

## 10. ТЕМАТИКА ИТОГОВЫХ РАБОТ

учебным планом не предусмотрено

## 11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Основная литература:

1. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. *Введение в теорию квантованных полей (4 изд., испр.)*. М.: Наука, 1984.
2. А.А. Славнов, Л.Д. Фаддеев. *Введение в квантовую теорию калибровочных полей (2 изд.)*. М.: Наука, 1988.
3. С. Вайнберг. *Квантовая теория поля, т. 1, 2*. М.: Физматлит, 2003.
4. F.J. Yndurain. *The Theory of Quark and Gluon Interactions (4th ed.)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
5. W. Greiner, S. Schramm, and E. Stein. *Quantum Chromodynamics (3rd ed.)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
6. В.А. Рубаков. *Классические калибровочные поля. Бозонные теории. (2 изд.)*. М.: УРСС, 2005.
7. Т.П. Ченг, Л.Ф. Ли. *Калибровочные теории в физике элементарных частиц*. М.: Мир, 1987.
8. М.Б. Волошин, К.А. Тер-Мартirosян. *Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц*. М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Л.Б. Окунь. *Лептоны и кварки (3 изд.)*. М.: УРСС, 2005.
10. А.В.Нестеренко. *Теоретическое описание функции Адлера и электрон-позитронной аннигиляции в адроны*. Дубна: Издательский отдел ОИЯИ, УНЦ-2011-49, 144 с., 2011.

### Электронные ресурсы, включая доступ к базам данных:

Информационные ресурсы: Доступные через интернет журналы по физике элементарных частиц (Теоретическая и математическая физика, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Physical Review D, Reviews of Modern Physics), а также учебное пособие и сборник задач, разработанные для данного курса.

Программу составил

к.ф.-м.н. Нестеренко А.В.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.