

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ



УТВЕРЖДАЮ  
И.о. директора  
филиала МГУ в г.Дубне  
/ Э.Э. Боос /  
« 09 » 2022 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Наименование дисциплины:**

Основы квантовой хромодинамики

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Физика элементарных частиц

---

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Дубна 2022 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки программы магистратуры 03.04.02 «Физика».

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Доктор физ.-мат. наук Теряев Олег Валерианович, профессор физического факультета МГУ по совместительству

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, профессор академик РАН В.А. Матвеев, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Основы квантовой хромодинамики»**

Курс направлен на изучение современных представлений о фундаментальной теории сильных взаимодействий, принципов строения адронов и их взаимодействий при высоких энергиях, изучение понятий асимптотической свободы, конфайнмента и их проявлений в жестких адронных процессах.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Формат обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Основы квантовой хромодинамики» реализуется на 2-ом курсе в 3-ем семестре магистратуры и входит в состав профессионального блока вариативной части.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Результаты обучения
<b>МПК-1</b> Способен решать практические задачи профессиональной деятельности в области физики элементарных частиц на основе фундаментальных знаний	<b>ИМПК-1.2</b> умеет выполнять следующие операции в рамках решения профессиональной деятельности: вычисления на древесном уровне ширины и сечений различных процессов физики элементарных частиц	<b>З-1</b> Знать: основные теоремы, уравнения и методы, используемые в квантовой хромодинамике <b>У-1</b> Уметь: описывать основные процессы квантовой хромодинамики и рассчитывать их характеристики. <b>В-1</b> Владеть: способностью создавать физическую модель для описания процессов физике элементарных частиц с использованием теории квантовой хромодинамики, определять границы ее применимости и ее недостатки.

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Кватновое число Цвет.*

Экспериментальные указания на цвет кварков. Цветовая калибровочная симметрия и уравнения Янга-Миллса для глюонного поля. Группа  $SU(N)$ . Матрицы Гелл-Манна и их свойства. Тожества Фирца.  $1/N$  разложение. Планарные диаграммы. Операторы Казимира в фундаментальном и присоединенном представлении.

*Тема 2. Квантование КХД и асимптотическая свобода.*

Поперечность амплитуд в КЭД и КХД. Самодействие глюонов. Правила Фейнмана для КХД. Дисперсионные соотношения и оптическая теорема. Понятие о расходимостях, вычитаниях, регуляризации и перенормировке. Эффективный заряд в КЭД. Понятие о ренормгруппе. Нуль заряда в КЭД, его связь с оптической теоремой и дисперсионными соотношениями. Эффективный заряд в КХД. Асимптотическая свобода.

*Тема 3. Кварк-адронная дуальность и жесткие адронные процессы.*

Электрон-позитронная аннигиляция в адроны. R-отношение. Кварк-адронная дуальность. Преобразование Бореля Вакуумные конденсаты и «правила сумм» КХД. Спектроскопия тяжелых кваркониев. Киральная инвариантность.

*Тема 4. Факторизация и модификация партонной модели.*

Факторизация в КХД и жесткие процессы. Электротехнические аналогии. Глубоко неупругое рассеяние. Партонные функции распределения и их моменты. Структурные функции. Соотношение Каллана-Гросса. Сохраняющиеся операторы и их свойства. Правила сумм. Инфракрасные и коллинеарные сингулярности. Уравнения эволюции. Глубоко неупругое рассеяние поляризованных частиц. Поляризационные партонные распределения. Спиновая структура адронов. Функции, зависящие от поперечного импульса. Процесс Матвеева-Мурадяна-Тавхелидзе- Дрелла-Яна. Факторизация в соударениях адронов. Роль интегрирования по поперечному импульсу. Сечение процесса ММТДЯ. Партонный поток. Поляризация виртуальных фотонов. Угловые распределения. Полуинклюзивные и эксклюзивные процессы. Функции фрагментации T-нечетные асимметрии и партонные функции. Электромагнитные и гравитационные формфакторы. Обобщенные партонные распределения. Давление в протоне. Связь физики адронов и тяжелых ионов. Поляризация в соударениях адронов и тяжелых ионов.

*Тема 5. Экспериментальный статус КХД и Что дальше?*

Экспериментальный статус КХД. Применение КХД к процессам на Большом Адронном Коллайдере и комплексе NICA. Образование бозонов Хиггса в адронных соударениях Движение к Великому Объединению.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемкость	в том числе ауд.занятий			Учебно-практические занятия	
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров		
Основы квантовой хромодинамики	2	72	36	18	18	36	

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Основы квантовой хромодинамики» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ тем		Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Само-столь-ная ра-бота	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Семинары	Учебно-практические занятия (лабораторные или практические занятия)			
1	Кватновое число Цвет	12	3	3		6		
2	Квантование КХД и асимптотическая свобода	14	4	4		6		
3	Кварк-адронная дуальность и жесткие адронные процессы	14	4	4		6		
4	Факторизация и модификация партонной модели	14	4	4		6		
5	Экспериментальный статус КХД и Что дальше?	12	3	3		6		
	Промежуточная аттестация	6				6	экзамен	
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>18</b>	<b>18</b>		<b>36</b>		

ДЗ- домашнее задание, Оп- опрос, КР- контрольная работа, Т- тестирование, Реф - реферат

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Основы квантовой хромодинамики» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Основы квантовой хромодинамики» проводится в третьем семестре в форме экзамена.

Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

#### 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний аспиранта по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

#### 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2/ неудовлетворительно	3/ удовлетворительно	4/ хорошо	5/ отлично
ЗНАТЬ: основные теоремы, уравнения и методы, используемые в квантовой хромодинамике ИМПК-1.2	Отсутствие знаний основных теорем, уравнений и методов, используемых в квантовой хромодинамике	В целом успешные, но не систематические знания основных теорем, уравнений и методов, используемых в квантовой хромодинамике	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных теорем, уравнений и методов, используемых в квантовой хромодинамике	Успешные и систематические знания основных теорем, уравнений и методов, используемых в квантовой хромодинамике
УМЕТЬ: описывать основные процессы квантовой хромодинамики и рассчитывать их характеристики ИМПК-1.2	Отсутствие умения описывать основные процессы квантовой хромодинамики и рассчитывать их характеристики	В целом успешное, но не систематическое умение описывать основные процессы квантовой хромодинамики и рассчитывать их характеристики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение описывать основные процессы квантовой хромодинамики и рассчитывать их характеристики	Успешное и систематическое умение описывать основные процессы квантовой хромодинамики и рассчитывать их характеристики
ВЛАДЕТЬ: способностью создавать физическую модель для описания процессов физике элементарных частиц с использованием теории квантовой хромодинамики, определять границы ее применимости и ее недостатки ИМПК-1.2	Отсутствие/фрагментарное владение способностью создавать физическую модель для описания процессов физике элементарных частиц с использованием теории квантовой хромодинамики, определять границы ее применимости и ее недостатки	В целом успешное, но не систематическое владение способностью создавать физическую модель для описания процессов физике элементарных частиц с использованием теории квантовой хромодинамики, определять границы ее применимости и ее недостатки	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение способностью создавать физическую модель для описания процессов физике элементарных частиц с использованием теории квантовой хромодинамики, определять границы ее применимости и ее недостатки	Успешное и систематическое владение способностью создавать физическую модель для описания процессов физике элементарных частиц с использованием теории квантовой хромодинамики, определять границы ее применимости и ее недостатки

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

#### **Пример:**

#### Вопросы по теории:

1. Калибровочные теории в квантовой хромодинамике.
2. Основы теории перенормировок.
3. Оптическая теорема.



4. Дисперсионные соотношения.
5. Инвариантный заряд в квантовой электродинамике.

### **13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

Экзамен проводится в виде письменной работы с последующим собеседованием по изучаемым темам.

#### ***Материалы промежуточной аттестации обучающихся***

##### Вопросы к экзамену:

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ КХД: Кварковая модель. Спектроскопия адронов. Цвет. Глубоконеупругое рассеяние и электрон-позитронная аннигиляция. Партоны.
2. АБЕЛЕВЫ И НЕАБЕЛЕВЫ КАЛИБРОВОЧНЫЕ ТЕОРИИ: Глобальные и локальные симметрии. Законы сохранения и калибровочные взаимодействия. Матрицы Гелл-Манна. Поперечность амплитуд в абелевой и неабелевой калибровочной теории. Тождества Уорда. Необходимость самодействия глюонов.
3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОРМИРОВОК: Расходимости диаграмм. Регуляризация и вычитания. Перенормируемость. Поляризационный оператор. Физические условия перенормировки. Понятие об инвариантном заряде в КЭД и КХД
4. ОПТИЧЕСКАЯ ТЕОРЕМА: Унитарность S-матрицы и ее следствия. Мнимые части амплитуд и их источники. Правила Кутковского. Диаграммная техника для амплитуд и сечений. Матрица плотности.
5. ДИСПЕРСИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ: Физический смысл дисперсионных соотношений. Причинность. Аналитические свойства амплитуд. Восстановление амплитуд по мнимым частям. Вычитания. Связь с перенормировками.
6. ИНВАРИАНТНЫЙ ЗАРЯД В КЭД: Вычисление мнимой части поляризационного оператора и дисперсионное соотношение для него. Нуль заряда и его связь с унитарностью. Физическая интерпретация.
7. АСИМТОТИЧЕСКАЯ СВОБОДА: Кварковые и глюонные вклады в инвариантный заряд. Поляризации глюонов. Неуниверсальность аргументов, связанных с унитарностью. Антиэкранировка.
8. ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННАЯ АННИГИЛЯЦИЯ В АДРОНЫ В КХД: R-отношение, его зависимость от характеристик кварков. Струи и кварк-адронная дуальность. Радиационные и степенные поправки. Понятие о кварковых конденсатах. Правила сумм КХД.

### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

#### Основная литература

6. Н.Н. Боголюбов и Д.В. Ширков, Квантовые поля, М: Наука, 1993, 2005.
7. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика: т. IV. Квантовая Электродинамика; М: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
8. Б.Л. Иоффе, Л.Н. Липатов, В.А. Хозе, Глубоконеупругие процессы, М: Наука, 1983

#### Дополнительная литература

1. М. Пескин, Д. Шредер, Введение в квантовую теорию поля, РХД, 2001 г.
2. И.В. Андреев, Хромодинамика и жесткие процессы при высоких Энергиях, М: Наука, 1981.
3. М.Б. Волошин, К.А. Тер-Мартirosян, Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц, М: Энергоатомиздат 1981.

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Операционная система Astra Linux ( <https://astralinux.ru/> ) или аналог, с офисным пакетом.

#### Перечень интернет ресурсов

1. Сайт кафедры <https://msu-dubna.ru/hep>

#### **Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика», курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.