

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета

(подпись) И.С. Огнев

23 мая 2023 года

Рабочая программа дисциплины
«Введение в квантовую хромодинамику»

Направление подготовки
03.04.02 Физика

Направленность (профиль)
«Теоретическая физика»

Форма обучения
очная

Программа одобрена
на заседании кафедры
от «17» апреля 2023 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК
физического факультета
протокол № 5 от « 25» апреля 2023 года

Ярославль

1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Введение в квантовую хромодинамику» является изучение основ квантовой хромодинамики (КХД) как калибровочной теории сильного взаимодействия кварков и глюонов, специфических особенностей КХД как неабелевой калибровочной теории и овладение методами расчетов простейших процессов в физике адронов с участием кварков и глюонов.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Введение в квантовую хромодинамику» является обязательной дисциплиной вариативной части Блока 1.

Для освоения данной дисциплиной студенты должны знать квантовую теорию поля, владеть аппаратом диаграммной техники Фейнмана и методами теории групп в квантовой теории поля.

Дисциплина «Введение в квантовую хромодинамику» — один из базовых курсов магистерской программы «Теоретическая физика». Изложение данного курса необходимо для подготовки студентов к дальнейшей работе в области квантовой теории поля и современной физики элементарных частиц.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

| Формируемая компетенция (код и формулировка) | Индикатор достижения компетенции (код и формулировка) | Перечень планируемых результатов обучения |
|---|---|---|
| Профессиональные компетенции | | |
| ПК-1 Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность по решению комплексных фундаментальных задач физики | ИД-ПК-1_1 Знает теоретические методы проведения и анализа научных исследований | Уметь: - Использовать лагранжиан КХД и соответствующие ему правила диаграммной техники для расчетов сильных процессов с участием кварков и глюонов. Владеть навыками: - расчетов в рамках КХД простейших процессов древесного и однопетлевого приближения; - расчетов ширин лептонных и адронных распадов тяжелых кваркониев. |
| | ИД-ПК-1_2 Знает современные теории и модели физики | Знать: - Обоснование и структура лагранжиана КХД; - правила диаграммной техники в КХД; |

| | | |
|--|--|---|
| | | <p>- основные подходы к описанию свойств тяжелых кваркониев на основе КХД;</p> <p>- основные принципы описания процессов столкновений адронов высоких энергий в терминах структурных функций и партонных функций распределения.</p> |
|--|--|---|

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 акад. часа.

| № п/п | Темы (разделы) дисциплины, их содержание | С е м е с т р | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах) | | | | | Формы текущего контроля успеваемости | |
|-------|--|---------------|---|----------------------|----------|-----------------------------------|------------|---|---------|
| | | | Контактная работа | | | | | Форма промежуточной аттестации (по семестрам) | |
| | | | лекции | практические занятия | семинары | аудиторная самостоятельная работа | | | |
| 1 | Введение. Первоначальные сведения о кварках. | 3 | 4 | 2 | | | 6 | | |
| 2 | Основные уравнения хромодинамики. | 3 | 7 | 3 | | 1 | 10 | Задания для самостоятельной работы | |
| 3 | Квантование глюонного и кваркового полей. | 3 | 7 | 4 | | 1 | 11 | Задания для самостоятельной работы | |
| 4 | КХД и физика тяжелых кваркониев. | 3 | 8 | 4 | | 1 | 13 | Задания для самостоятельной работы | |
| 5 | КХД и жесткие процессы при высоких энергиях. | 3 | 8 | 4 | | 1 | 13 | Задания для самостоятельной работы | |
| | | | | | | 2 | 0,5 | 33,5 | Экзамен |
| | Всего за 3 семестр | | 34 | 17 | | 4 | 0,5 | 86,5 | |
| | Всего | | 34 | 17 | | 4 | 0,5 | 86,5 | |

Содержание разделов дисциплины:

1. Введение. Первоначальные сведения о кварках.

История, успехи и трудности простейшей кварковой модели.
Цвет кварков. Цветовая и ароматовая симметрии адронов.

2. Основные уравнения хромодинамики.

Электродинамика как пример абелевой калибровочной теории.
Калибровочные цветовые преобразования и лагранжиан КХД.
Кварк-глюонное, трехглюонное и четырехглюонное взаимодействия.
Цветовые токи и уравнения поля для кварков и глюонов.

3. Квантование глюонного и кваркового полей.

Особенности квантования глюонного поля (α -калибровка, духи).
Правила Фейнмана в КХД. $\bar{q}qg$ -, $\bar{\xi}\xi g$ -, 3g - и 4g- вершины.
Простейшие процессы с кварками и глюонами.
Амплитуда рассеяния кварка на кварке и пертурбативный потенциал взаимодействия двух кварков в симметричном и антисимметричном по цвету состояниях.
Амплитуда рассеяния кварка на антикварке и пертурбативный потенциал взаимодействия кварка и антикварка в синглетном и октетном цветовых состояниях.
Поляризация вакуума в КХД. Вклады кварков, глюонов и духов в поляризационный оператор в однопетлевом приближении.
Бегущая константа связи и понятие асимптотической свободы в КХД.

4. КХД и физика тяжелых кваркониев.

История открытия и основные свойства Ψ - и Y -мезонов (спектр масс, квантовые числа, моды распадов).
Спектроскопия Ψ - и Y -мезонов и потенциальные модели.
Пертурбативный и удерживающий потенциалы.
Зависимые от спина силы и расщепления масс тяжелых кваркониев.
Электромагнитные, лептонные и глюонные распады тяжелых кваркониев:

$$n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow \mu^+ \mu^- ,$$

$$n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow \gamma \bar{q}q ,$$

$$n^1S_0(\bar{Q}Q) \rightarrow 2\gamma ,$$

$$n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow 3\gamma ,$$

$$n^1S_0(\bar{Q}Q) \rightarrow 2g ,$$

$$n^3S_1(\bar{Q}Q) \rightarrow 3g .$$

Адронные ширины распадов Ψ - и Y -мезонов и константа сильного взаимодействия α_s на масштабах их масс.

Радиационные E1- и M1-переходы в Ψ - и Y -системах.
КХД и статус потенциальных моделей тяжелых мезонов.

5. КХД и жесткие процессы при высоких энергиях.

Глубоко неупругое рассеяние лептонов на нуклонах. Структурные функции.
Партоны и партонные функции распределения.

Рождение $\mu^+ \mu^-$ -пар в протон-протонных столкновениях.

5. Образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

Вводная лекция – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

Академическая лекция (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

Практическое занятие – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

Консультации – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронный учебный курс «Введение в квантовую электродинамику» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы обучающихся по темам дисциплины и рекомендации по их выполнению;
- осуществляется проведение отдельных мероприятий текущего контроля успеваемости студентов;
- представлены тексты лекций по отдельным темам дисциплины;
- представлены правила прохождения промежуточной аттестации по дисциплине;
- представлен список учебной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения занятий и консультаций по дисциплине в случае проведения их в дистанционном формате;
- посредством форума осуществляется синхронное и (или) асинхронное взаимодействие между обучающимися и преподавателем в рамках изучения дисциплины.

6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по

дисциплине

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

Для формирования электронного учебного курса «Электродинамика» используется система управления электронными курсами LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ.

7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»
http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины

а) основная литература

1. Смирнов А. Д. Введение в квантовую хромодинамику: учеб. пособие для вузов. / А. Д. Смирнов; Науч.-метод. совет ун-та ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова - Ярославль: Б.и., 2008. - 99 с.

б) дополнительная литература

1. Славнов А. А. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. / А.А.Славнов,Л.Д.Фаддеев - 2-е изд.,перераб.и доп. - М.: Наука, 1988. - 267с.

2. Пескин М. Введение в квантовую теорию поля: Пер.с англ. / М.Пескин, Д.Шредер; Под ред. А.А.Белафина, А.В.Беркова - М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. - 784с.

3. Вайнберг С. Квантовая теория поля. Т. 2, Современные приложения. / С.Вайнберг; под ред. В.Ч. Жуковского ; пер. с англ. - М.: Физматлит, 2004. - 527 с.

4. Боголюбов Н. Н. Квантовые поля: Учебное пособие для вузов. / Н.Н.Боголюбов,Д.В.Ширков; Гос.комитет СССР по народному образованию - М.: Наука;Физматлит, 1993. - 332с.

5. Боголюбов Н. Н. Введение в теорию квантованных полей. / Н.Н.Боголюбов,Д.В.Ширков - М.: Наука;Физматлит, 1984. - 597с.

6. Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами. / Р. Фейнман; пер. с англ. Д. И. Дьяконова, М. И. Стрикмана; под ред. В. М. Шехтера - М.: Мир, 1975. - 389 с.

7. Смирнов, А. Д., Введение в квантовую хромодинамику [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Д. Смирнов ; Яросл. гос. ун-т, Ярославль, ЯрГУ, 2008, 99с

8. Волошин М.Б., Тер-Мартirosян К.А. Введение в калибровочную теорию взаимодействий элементарных частиц. — М.: Энергоатомиздат,1984.

9. Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.Ч., Борисов А.В. Калибровочные поля. — М.: Изд-во МГУ, 1986.
10. Андреев И.В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. — М.: Наука, 1981.
11. Ченг Т.-П., Ли Л.-Ф. Калибровочные теории в физике элементарных частиц. — М.: Мир, 1988.
12. Коноплева Н.П., Попов В.Н. Калибровочные поля. — М.: Атомиздат, 1980.
13. Sterman G. et al. (The CTEQ Collaboration). Handbook of perturbative QCD. — www.phys.psu.edu/~cteq/#Handbook

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий;
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Профессор кафедры
теоретической физики, д.ф.-м.н.

должность, ученая степень

А.Д. Смирнов

подпись

И.О. Фамилия

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Введение в квантовую хромодинамику»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущей аттестации**

Задания для самостоятельной работы

Задания по теме № 2-4: задачи и упражнения из учебного пособия

Смирнов А.Д. Введение в квантовую хромодинамику. Ярославль: ЯрГУ, 2008.

1.2 Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

Список вопросов к экзамену:

1. История, успехи и трудности простейшей кварковой модели: спектроскопия адронов и кварки, проблема статистики кварков, проблема удержания кварков в адронах и качественные особенности экспериментальных данных по глубоко неупругому рассеянию электронов на нуклонах.
2. Понятие цвета кварков. Проявления цветовых степеней свободы кварков в эксперименте. Цветовая и ароматовая симметрия адронов. Группы ароматовых и цветовых преобразований кварков.
3. Электродинамика как пример абелевой калибровочной теории.
4. Калибровочные цветовые преобразования и КХД- лагранжиан. Кварк-глюонное, трехглюонное и четырехглюонное взаимодействия.
5. Цветовые токи и уравнения поля для кварков и глюонов.
6. Особенности квантования глюонного поля (α –калибровка, духи).
7. Правила Фейнмана в КХД. $\bar{q}qg$ -, $\bar{\xi}\xi g$ - вершины.
8. Правила Фейнмана в КХД. $3g$ – вершина.
9. Правила Фейнмана в КХД. $4g$ – вершина.
10. Амплитуда рассеяния кварка на кварке и пертурбативный потенциал взаимодействия двух кварков в симметричном и антисимметричном по цвету состояниях.
11. Амплитуда рассеяния кварка на антикварке и пертурбативный потенциал взаимодействия кварка и антикварка в синглетном и октетном цветовых состояниях.
12. Поляризация вакуума в КХД. Вклад кварков в поляризационный оператор в однопетлевом приближении.
13. Поляризация вакуума в КХД. Вклад глюонов в поляризационный оператор в однопетлевом приближении.
14. Поляризация вакуума в КХД. Вклад духов в поляризационный оператор в однопетлевом приближении.
15. Бегущая константа связи и понятие асимптотической свободы в КХД.
16. История открытия и основные свойства Ψ – и Y –мезонов (спектр масс, квантовые

числа, моды распадов).

17. Спектроскопия Ψ - и Y - мезонов и потенциальные модели. Пертурбативный и удерживающий потенциалы.

18. Спин-зависимые силы и расщепления масс тяжелых кваркониев.

19. Электромагнитные, лептонные и глюонные распады тяжелых кваркониев

$$n^3 S_1 \bar{Q} Q \rightarrow \mu^+ \mu^- ,$$

$$n^3 S_1 \bar{Q} Q \rightarrow \gamma \bar{q} q ,$$

$$n^1 S_0 \bar{Q} Q \rightarrow 2\gamma .3 \quad n^1 S_0 \bar{Q} Q \rightarrow 2\gamma ,$$

$$n^3 S_1 \bar{Q} Q \rightarrow 3\gamma .3 \quad n^3 S_1 \bar{Q} Q \rightarrow 3\gamma ,$$

$$n^1 S_0 \bar{Q} Q \rightarrow 2g .3 \quad n^1 S_0 \bar{Q} Q \rightarrow 2g ,$$

$$n^3 S_1 \bar{Q} Q \rightarrow 3g .3 \quad n^3 S_1 \bar{Q} Q \rightarrow 3g .$$

20. Адронные ширины Ψ - и Y -мезонов и константа сильного взаимодействия α_s на масштабе их масс.

21. Радиационные E1- и M1-переходы в Ψ - и Y -системах.

22. Глубоко неупругое рассеяние лептонов на нуклонах. Структурные функции. Выражение сечения глубоко неупругое рассеяние лептонов на нуклонах через структурные функции.

23. Партоны и партонные функции распределения. Выражение структурных функций через партонные функции распределения.

24. Рождение $\mu^+ \mu^-$ -пар в протон-протонных столкновениях.

Правила выставления оценки на экзамене.

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

Оценка «Отлично» выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение содержанием материала и понятийным аппаратом квантовой механики; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует терминологию квантовой механики

Оценка «Хорошо» выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствуют указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

Оценка «Удовлетворительно» выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагаются в терминах квантовой механики, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется студенту, который демонстрирует

разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Введение в квантовую хромодинамику»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Введение в квантовую хромодинамику» являются лекции. По ряду тем предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем его применения для решения задач и выполнения упражнений.

Основная цель решения задач – помочь усвоить фундаментальные понятия квантовой хромодинамики и приобрести навыки расчетов основных КХД-процессов. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала и приобретенных практических навыков в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в течение семестра изучения дисциплины. Также (при необходимости) проводятся консультации по вопросам, вызывающим затруднения при их усвоении.

В конце семестра изучения дисциплины студенты сдают экзамен. Экзамен проводится по теории с учетом результатов выполнения выданных заранее самостоятельных расчетных заданий.

Успешное усвоение курса предполагает серьезную над ним работу, и посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым для этого условием.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов по дисциплине

Для самостоятельной работы рекомендуется использовать учебную литературу:

а) основная литература

1. Смирнов А. Д. Введение в квантовую хромодинамику. Учебное пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2008.

б) дополнительная литература

1. Волошин М.Б., Тер-Мартirosян К.А. Введение в калибровочную теорию взаимодействий элементарных частиц.
2. А.А.Соколов, И.М.Тернов, В.Ч.Жуковский, А.В.Борисов. Калибровочные поля. - М.:Изд-во МГУ, 1986.
3. Андреев И.В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. - М.: Наука, 1981.
4. Славнов А.А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. - М.: Наука, 1978.
5. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Квантовые поля - М.: Наука, 1980.
6. Ченг Т.-П., Ли Л.-Ф. Калибровочные теории в физике элементарных частиц. - М.: Мир, 1988.
7. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. - М.: РХД, 2001.

8. Коноплева Н.П., Попов В.Н. Калибровочные поля. - М.: Атомиздат, 1980.
9. Фейнман Р. Взаимодействие фотонов с адронами. -- М.: Мир, 1975.
10. Stermann G. et al. (The CTEQ Collaboration). Handbook of perturbative QCD.
11. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. - М.: Наука, 1976.

Также для подбора учебной литературы рекомендуется использовать широкий спектр интернет-ресурсов.