

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

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Теория фундаментальных взаимодействий
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

- лекции: 30 час.
- семинары: 60 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Программу составил: А.В. Бедняков, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
04.06.2020

Аннотация

Цель теории фундаментальных взаимодействий состоит в том, чтобы свести все многообразие природных явлений к набору законов и правил, позволяющих количественно описывать и предсказывать экспериментальные факты. На уровне микромира все свойства материи и излучения можно тремя видами фундаментальных взаимодействий: сильным, слабым и электромагнитным. Целью данного курса является знакомство с понятиями и методами современной теории фундаментальных взаимодействий. Основной упор сделан на использование симметрий и особенно локальных калибровочных симметрий, диаграмм Фейнмана и проверке экспериментальных предсказаний, сделанных на их основе. Курс состоит из двух частей, первая из которых (Стандартная модель) изучается в осеннем семестре и знакомит с современной теорией объединенного электромагнитного и слабого взаимодействия. Вторая часть (Квантовая хромодинамика) изучается в весеннем семестре и знакомит с современной теорией сильного взаимодействия кварков и ее приложениями к физике адронов.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

изучение студентами основных понятий и методов современной теории элементарных частиц и их взаимодействий и взаимопревращений.

Задачи дисциплины

В ходе данного курса студент должен получить представление об основах квантовой теории поля, описании и расчётах процессов рассеяния и распада элементарных частиц, теории их структуры и основных принципах, на которых строится эта теория.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
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-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей 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
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов

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

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

лагранжиан Стандартной модели;
 особенности квантования калибровочных теорий;
 свойства электрослабых калибровочных бозонов;
 механизм Хиггса;
 основные методы прецизионной проверки стандартной модели и поиска новых физических явлений во взаимодействиях частиц;
 лагранжиан КХД;
 методы вычисления радиационных поправок в КХД, КЭД и слабом секторе Стандартной модели;
 асимптотическую свободу в квантовой хромодинамике;
 партонную модель, партонные функции распределения и функции фрагментации.

уметь:

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

владеть:

техникой вычисления основных характеристик процессов электрослабого взаимодействия;
 техникой вычисления основных характеристик процессов сильного взаимодействия;
 методом правил сумм в квантовой хромодинамике;
 методом дисперсионных соотношений.

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	Введение	3	9		6
2	Релятивистская квантовая механика	3	9		6
3	Основы квантовой электродинамики	3	9		6
4	Слабые взаимодействия	3	9		6
5	Стандартная модель электрослабого взаимодействия	3	9		6
6	Цвет и цветовая калибровочная симметрия	3	3		6
7	Квантование КХД и асимптотическая свобода	3	3		6

8	Кварк-адронная дуальность и адронные процессы	3	3		6
9	Факторизация и модификация партонной модели	3	3		6
10	Экспериментальный статус КХД и Что дальше?	3	3		6
Итого часов		30	60		60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение

В поисках «элементарных» частиц. Лептоны, фотоны, адроны, изотопическая инвариантность, силы взаимодействия. Гипотеза кварков, строение адронов, цвет, удержание цвета, скейлинг, асимптотическая свобода, партонная модель.

2. Релятивистская квантовая механика

Уравнение Клейна-Гордона. Уравнение Дирака, античастицы. Алгебра гамма-матриц, решения свободного уравнения Дирака, их смысл, угловой момент и спин электрона. Фермионы с нулевой массой. Уравнение Шредингера-Паули, магнитный момент электрона.

3. Основы квантовой электродинамики

Лагранжиан, локальная калибровочная симметрия и электродинамика. Уравнения Максвелла для потенциала. Калибровка. Теория возмущений. Диаграммы Фейнмана. Сечение рассеяния. Рассеяние электрона на мюоне, пропагатор фотона. Комптоновское рассеяние. Пропагатор электрона.

4. Слабые взаимодействия

Бета-распад. Теория Ферми. Нарушение четности, киральность. CP-чётность. Время жизни мюона. Распад каонов. Угол Каббибо. Смешивание поколений, матрица смешивания Каббибо-Кабаяши-Маскава. Нарушение CP-чётности. Нейтральные слабые токи. Глубоко неупругое рассеяние нейтрино и антинейтрино на нуклоне.

5. Стандартная модель электрослабого взаимодействия

Объединение электромагнитных и слабых взаимодействий на основе $SU(2)_L \times U(1)_Y$ симметрии. Угол Вайнберга, нейтральные слабые токи, W- и Z-бозоны. Неренормируемость теории с массивными бозонами. Неабелева калибровочная симметрия. Самодействие бозонов. Спонтанное нарушение симметрии. Появление массы. Голдстоуновские бозоны. Механизм Хиггса. Модель Салама-Вайнберга. Выбор поля Хиггса. Массы W- и Z-бозонов. Взаимодействие бозонов с хиггсом. Массы фермионов. Взаимодействия фермионов с хиггсом. Понятие о перенормируемости теории. Лептон-кварковая аналогия. Экспериментальный статус теории.

Семестр: 2 (Весенний)

6. Цвет и цветовая калибровочная симметрия

Экспериментальные указания на цвет кварков. Цветовая калибровочная симметрия и уравнения Янга-Миллса для глюонного поля. Группа $SU(3)$. Матрицы Гелл-Манна и их свойства. Тожества Фирца. Операторы Казимира в фундаментальном и присоединенном представлении.

7. 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.

8. Кварк-адронная дуальность и адронные процессы

Электрон-позитронная аннигиляции в адроны. R-отношение. Кварк-адронная дуальность. Вакуумные конденсаты и «правила сумм» КХД. Киральная инвариантность.

9. Факторизация и модификация партонной модели

Факторизация в КХД и жесткие процессы. Глубоко неупругое рассеяние. Партонные функции распределения и их моменты. Структурные функции. Соотношение Каллана-Гросса. Сохраняющиеся операторы и их свойства. Правила сумм. Уравнения эволюции. Глубоко неупругое рассеяние поляризованных частиц. Спиновый кризис. Процесс Дрелла-Яна.

10. Экспериментальный статус КХД и Что дальше?

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

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

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лептоны и кварки [Текст] / Л. Б. Окунь .— 6-е изд. — [Научное изд.] .— М. : ЛКИ, 2013 .— 352 с.
2. Квантовые поля [Текст] / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков - М.Физматлит, 2005
3. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц [Текст]/М. Б. Волошин, К. А. Тер-Мартirosян, -М., Энергоатомиздат, 1984
4. С.М.Биленький "Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов", Энергоиздат, 1981.

Дополнительная литература

1. Квантовая электродинамика [Текст] : учеб. пособие для студентов физ. спец. ун-тов / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский .— 4-е изд., испр. — М. : Физматлит, 1989, 2001, 2002, 2006 .— 720 с.
2. Введение в квантовую теорию поля [Текст] : [учебник для вузов] / М. Пескин, Д. Шредер ; пер. с англ. под ред. А.А. Белавина, А. В. Беркова .— М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001 .— 784 с.

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)

Необходимое программное обеспечение: Adobe Reader.

Доступные через интернет база данных Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov>), поисковая система INSPIRE (<http://inspirehep.net/>) и электронные версии журналов Phys. Lett., Phys. Rev., Eur. Phys. J., Nucl. Phys., Nucl. Instrum and Meth.

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 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.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: А.В. Бедняков, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
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-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей 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
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
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

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теория фундаментальных взаимодействий» обучающийся должен:

знать:

лагранжиан Стандартной модели;
особенности квантования калибровочных теорий;
свойства электрослабых калибровочных бозонов;
механизм Хиггса;
основные методы прецизионной проверки стандартной модели и поиска новых физических явлений во взаимодействиях частиц;
лагранжиан КХД;
методы вычисления радиационных поправок в КХД, КЭД и слабом секторе Стандартной модели;
асимптотическую свободу в квантовой хромодинамике;
партонную модель, партонные функции распределения и функции фрагментации.

уметь:

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

владеть:

техникой вычисления основных характеристик процессов электрослабого взаимодействия;
техникой вычисления основных характеристик процессов сильного взаимодействия;
методом правил сумм в квантовой хромодинамике;
методом дисперсионных соотношений.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Не предусмотрено.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета в 9-ом семестре:

1. V-A форма слабых взаимодействий.
2. Экспериментальные проявления нарушения четности.
3. Угол смешивания Каббиво.
4. Механизм ГИМ.
5. Матрица смешивания Кабаяши-Маскава.
6. Нейтральные токи.
7. Объединение электромагнитных и слабых взаимодействий.
8. Угол Вайнберга. Массы W– и Z–бозонов.
9. Механизм Хиггса.
10. Массы фермионов.

Примеры экзаменационных билетов в 10-м семестре:

Билет 1.

1. Симметрии в спектроскопии адронов.
2. Конфайнмент

Билет 2.

1. Лагранжиан КХД.
2. Глубоко неупругое рассеяние.

Билет 3.

1. Экспериментальные обоснования партонной модели.
2. Асимптотическая свобода.

Билет 4.

1. Самодействие неабелевых полей.
2. Экспериментальный статус КХД.

Билет 5.

1. Нарушение киральной симметрии.
2. Великое Объединение.

Критерии оценивания

Обучающемуся ставится оценка в соответствии с продемонстрированным уровнем подготовки; оценивание производится на усмотрения экзаменатора в соответствии с особенностями дисциплины и следующими критериями:

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 оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.