

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в физику элементарных частиц
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: М.Д. Фиткевич, канд. физ.-мат. наук, ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных взаимодействий и космологии 04.06.2021

## Аннотация

Учебный курс «Введение в физику элементарных частиц» представляет собой введение в современную теорию фундаментальных взаимодействий для студентов, специализирующихся как в теоретической, так и экспериментальной физике. В курсе предоставляются основные сведения, необходимые для понимания проблематики физики частиц, физики ускорительных экспериментов и построения современных теорий.

Внимание уделяется содержанию как Стандартной модели, так и ряда теорий за её рамками (ТВО, Суперсимметрия), а также объяснению связи, возникающей между экспериментом и теорией. Дополнительно, в рамках курса физики частиц, изучается ряд тем квантовой механики, не затрагиваемых в стандартной программе по теоретической физике.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

освоение современной экспериментальной и теоретической физики элементарных частиц.

#### Задачи дисциплины

- овладение терминологией и методологией физики элементарных частиц;
- приобретение навыков анализа результатов физических экспериментов по физике частиц;
- изучение Стандартной модели и теорий за её рамками, проверяемых в существующих ускорительных и иных экспериментах.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
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-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
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-1.2 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:

основы построения теорий физики элементарных частиц.

уметь:

решать задачи, возникающие в физике элементарных частиц.  
 владеть:  
 навыками поиска значимой информации, навыками самостоятельной работы.

#### 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	Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы.	3			3
2	Релятивистская кинематика.	3			3
3	Симметрии в физике частиц.	3			3
4	Сильное взаимодействие.	3			3
5	Элементы теории рассеяния.	3			3
6	Матрица плотности в квантовой механике.	3			3
7	Феноменологические подходы к описанию сильных взаимодействий	3			3
8	Квантовая электродинамика.	3			3
9	Слабое взаимодействие.	3			3
10	За пределами Стандартной модели.	3			3
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы.

Парадигма элементарных частиц и их взаимодействий. Типы фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое. Классификация частиц: адроны и лептоны, фотон и промежуточные бозоны. Классификация адронов, барионы и мезоны. Три поколения лептонов и кварков. Стандартная модель. Квантовые числа, характеризующие элементарные частицы. Время жизни частицы и ширина. Аддитивные и мультипликативные квантовые числа. Спин, четность  $P$ ,  $C$  и  $T$ .

###### 2. Релятивистская кинематика.

Инварианты и законы сохранения. Кинематические ограничения в реакциях взаимодействия  $2 \rightarrow 2$ . Переменные Мандельштама. Эллипс рассеяния и эллипс рождения. Пороги для рождения частиц. "Подпороговое" рождение. Процессы взаимодействия частиц с ядрами в "кинематически запрещенных областях". Понятие "о кумулятивном числе". Кинематические ограничения в распадах частиц  $1 \rightarrow 3$ . График Далица.

### 3. Симметрии в физике частиц.

Теорема Нётер и сохраняющиеся величины. Теорема Вигнера и симметрии. Группа Пуанкаре и её представления, спин.

### 4. Сильное взаимодействие.

Составная структура адронов. Модель составных гиперонов Сакаты-Маркова-Окуны. Модель дробнозарядных кварков Гелл-Манна – Цвейга. Странность, гиперзаряд, формула Гелл-Манна - Нишиджимы. Обобщение формулы Гелл-Манна - Нишиджимы для квантовых чисел  $s$ ,  $b$  и  $t$ .  $SU(3)$ -инвариантность сильных взаимодействий. Странность и  $SU(3)$ -мультиплеты элементарных частиц. Октет и декуплет барионов. Октеты псевдоскалярных и векторных мезонов. Кварковый состав октетов и декуплета барионов. Необходимость введения квантового числа – цвета. Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий. Изотопический спин. Соотношения между амплитудами различных процессов. Соотношения между амплитудами распада изобары. Соотношения между амплитудами рассеяния нуклонов на нуклонах и пи-мезонов на нуклонах. Соотношения между амплитудами распада векторных мезонов на два псевдоскалярных мезона.  $G$ -четность. Связь  $G$ -четности с зарядовой  $C$ -четностью и изотопическим спином. Правила отбора по  $G$ -четности в распадах мезонов. "Восьмеричный путь". Формула Гелл-Манна-Окубо. Соотношения между массами адронов, следующие из унитарной симметрии.

### 5. Элементы теории рассеяния.

Сечение рассеяния и способы его определения. Квантовомеханическое рассеяние в приближении Борна. Формфакторы.  $S$ -матрица. Связь вероятности процесса с матричными элементами  $S$ -матрицы. Формула для ширины распада через матричный элемент  $S$ -матрицы и фазовый объем. Вывод выражения для эффективного сечения взаимодействия через матричный элемент  $S$ -матрицы и фазовый объем. Рекуррентные соотношения для многочастичного фазового объема. Унитарность  $S$ -матрицы. Оптическая теорема.

### 6. Матрица плотности в квантовой механике.

Статистический оператор. Поляризационные матрицы плотности для частиц со спином  $1/2$  и  $1$ . Поляризация  $P$  и асимметрия  $A$  в реакциях рассеяния частиц. Вывод соотношения между  $P$  и  $A$  в реакции рассеяния частиц со спинами  $0$  и  $1/2$ .

### 7. Феноменологические подходы к описанию сильных взаимодействий

Глубоконеупругое рассеяние. Взаимодействие лептонов с нуклонами в партонной модели. Бьеркеновская переменная  $x$  и ее физический смысл. Структурные функции и сечения. Взаимодействие адронов при больших энергиях и переданных импульсах  $s$  и  $t$ . Правила кваркового счета. Дипольная формула для формфакторов нуклонов.

### 8. Квантовая электродинамика.

Описание процессов взаимодействия с помощью диаграмм Фейнмана. Эффективные теории поля. Уравнение Дирака. Биспиноры, матрицы Дирака и их свойства. Формулы для следа от произведения нескольких гамма-матриц. Правила Фейнмана для квантовой электродинамики в лестничном приближении. Фейнмановский пропагатор, калибровочная инвариантность. Комптоновское рассеяние в наинизшем порядке по константе связи, следствия калибровочной инвариантности для амплитуды. Формула Клейна-Нишины для сечения. Рассеяние  $e^+e^-$  в КЭД. Матричные элементы и сечение, следствия калибровочной инвариантности. Рассеяние света на свете. Эффективное действие Эйлера-Гейзенберга. Поиск аксионов и других экзотических частиц, взаимодействующих с электромагнетизмом. Электромагнитные процессы в ускорителях частиц: электромагнитная диссоциация.

### 9. Слабое взаимодействие.

Четырех-фермионное слабое взаимодействие. Бета-распад нейтрона и гиперонов. Спектр электронов. Зависимость вероятности распада от энергосвечения. Рассеяние нейтрино на лептонах. Обратный бета-распад, зависимость сечений от энергии и переданного импульса. Теория электрослабого взаимодействия Вайнберга-Салама. Слабый изоспин. 9 членов лагранжиана модели. Калибровочная инвариантность. Спонтанное нарушение симметрии. Возникновение масс калибровочных бозонов  $W$  и  $Z$ . Нейтральные токи. Константы связи нейтральных токов с лептонами и кварками как функции угла Вайнберга. Свойства  $W$ ,  $Z$ -бозонов, распады  $W \rightarrow l\nu$  и  $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ . Число сортов нейтрино из ширины распада  $Z$ -бозона в невидимые моды. Хиггсовский бозон и его свойства. Константы связи и ширина распада  $H \rightarrow ll$ .

#### 10. За пределами Стандартной модели.

Бегущие константы связи фундаментальных взаимодействий  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ . Основные идеи великого объединения (GUT). Квинтет кварков и лептонов в первом поколении. Лептокварки, распад нуклона. Понятие о суперсимметрии. Аксион КХД и аксионоподобные частицы.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном, доской.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Физика элементарных частиц [Текст]/Л. Б. Окунь, -М., Наука, 1984
2. Лептоны и кварки [Текст] / Л. Б. Окунь .— 3-е изд., стереотип. — М. : Едиториал УРСС, 2005 .— 352 с.

#### Дополнительная литература

1. 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.
2. Квантовая механика. Теоретический минимум [Текст], теоретический минимум/Л. Сасскинд, А. Фридман, -СПб., Питер, 2015
3. Г. Фраунфельдер, Э. Хенли. Субатомная физика – М.: Изд. Мир, 1979.

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

<http://arxiv.org/> - архив электронных публикаций. <http://pdg.lbl.gov/> - база данных Particle Data Group. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/> - ресурс “Ядерная физика в Интернете”.

### 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

### 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину “Введение в физику элементарных частиц”, 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 и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- жаркой 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 преподавателю. Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

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

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчик:** М.Д. Фиткевич, канд. физ.-мат. наук, ассистент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
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-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
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-1.2 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 «Введение в физику элементарных частиц» обучающийся должен:

### знать:

основы построения теорий физики элементарных частиц.

### уметь:

решать задачи, возникающие в физике элементарных частиц.

### владеть:

навыками поиска значимой информации, навыками самостоятельной работы.

## 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 или в конце занятия по пройденной теме.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Классификация фундаментальных частиц и их взаимодействий.
2. Инварианты релятивистской кинематики и законы сохранения.
3. Рассеяние  $2 \rightarrow 2$ . Переменные Мандельштама.
4. Распад  $1 \rightarrow 3$ . График Далица.
5. Сечение рассеяния.
6. Бьёркеновский скейлинг. Партоновая модель.



7. Структурные функции адронов.
8. Матрица плотности.

#### Примеры контрольных заданий

1. Найдите для реакции фоторождения  $\phi$ -мезона на покоящемся протоне в Л.С.О., импульс рожденного на пороге  $\phi$ -мезона в приближении равенства масс адронов.
2. Доказать, что если в какой-либо системе отсчета направления движения двух фотонов совпадают, то они будут совпадать и в любой другой системе отсчета.
3. Векторный нейтральный  $\rho$ -мезон может распасться посредством сильного взаимодействия на два заряженных  $\pi$ -мезона. Зная, что  $P$ -четность  $\pi$ -мезона равна  $-1$ , найти четность  $\rho$ -мезона. Разрешен ли распад  $\rho$ -мезона на два нейтральных пиона посредством сильного взаимодействия?
4. Найдите порог реакции рождения электрон-позитронной пары при рассеянии фотона на электроне.
5. Покажите, что распад фотона в электрон-позитронную пару запрещен. Что поменяется, если лоренц-симметрия для фотона окажется нарушенной:  $E = p + ap^3$ ?
6. Рассмотрите отображение пространства Минковского в пространство эрмитовых матриц:  $x^\mu \rightarrow M = x^\mu \sigma_\mu$ , где  $\sigma_\mu$  – матрицы Паули с единичной матрицей. Постройте обратное отображение.
7. Получить коммутационные соотношения генераторов группы Пуанкаре.
8. Найти  $C$  и  $P$  четности системы состоящей из частицы со спином  $0$  и её античастицы, если орбитальный момент их относительного движения равен  $L$ . Считать известным, что внутренние четности частицы и античастицы одинаковы.
9. Покажите, что следующие величины являются релятивистскими инвариантами:  $d^4x$ ,  $d^3p/p^0$ ,  $p^0 \delta^3(p)$ .
10. Каковы возможные значения полного изоспина различных двухпионных состояний?

Примеры экзаменационных билетов (заданий, тестов и др. материалов, используемых для проведения зачета, экзамена):

#### Билет №1

1. Сечение рассеяния.
2. Найдите для реакции фоторождения  $\phi$ -мезона на покоящемся протоне в Л.С.О., импульс рожденного на пороге  $\phi$ -мезона в приближении равенства масс адронов.

#### Билет №2

1. Структурные функции адронов.
2. Найти  $C$  и  $P$  четности системы состоящей из частицы со спином  $0$  и её античастицы, если орбитальный момент их относительного движения равен  $L$ . Считать известным, что внутренние четности частицы и античастицы одинаковы.

#### Критерии оценивания

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 недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо 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 твердо 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**

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.