

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**«Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН»**

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯФ СО РАН,

Академик РАН \_\_\_\_\_ П.В.Логачев

« 05 » октября 2018 г.

**СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ РАСШИРЕНИЯ**

Рабочая программа дисциплины

Направление подготовки

**03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации)**

Общая трудоемкость дисциплины: 6 зачетные единицы – **216** часов.

Форма промежуточной аттестации: зачет

Виды деятельности:

Лекции	64	контактная работа обучающихся с преподавателем	128
Семинарские занятия	64		
Самостоятельная работа	80	занятия в активной и интерактивной форме	128
Консультации			
Зачеты	8	Экзамены	

**Новосибирск- 2018**

Программа курса «Стандартная модель и ее расширения» составлена в соответствии с требованиями федерального государственного стандарта высшего образования 03.06.01 Физика и астрономия. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинары, самостоятельная работа студента.

Предлагаемый курс лекций является частью профессионального цикла подготовки аспирантов по специальностям 01.04.02 Теоретическая физика и 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц (уровень подготовки кадров высшей квалификации). Он ставит перед собой две основные задачи. Первой задачей является подготовка аспирантов указанных специальностей к сдаче кандидатского экзамена по широкому кругу вопросов. Второй задачей является детальное обсуждение некоторых вопросов, которые не входят в стандартную университетскую программу, но знание и правильное понимание которых очень важно для работы исследователей. Обучение предполагается проводить не на основе повторения университетского курса, а на основе обсуждения нетривиальных и интересных физических проблем, решение которых потребует напоминания основ теории. Это позволит подготовиться к сдаче кандидатских экзаменов, а также повысить интерес к исследовательской работе. В рамках курса излагаются основы единой теории сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий и современные методы теоретического анализа, позволяющие делать простые оценки для всего многообразия процессов и явлений физики элементарных частиц. Знание представленного материала важно как для теоретиков и вычислителей, так и для экспериментаторов.

Продолжительность курса - два семестра (одна лекция и один семинар в неделю)

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: сдача заданий в течение семестра.

Промежуточная аттестация: зачёт в каждом из семестров.

Общая трудоемкость составляет 6 зачетных единиц, 216 часов.

Составитель:

д.ф.-м.н., проф. В.С.Фадин

Рабочая программа

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины.....	4
2. Место дисциплины в структуре программы обучения.....	4
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины	4
4. Структура и содержание дисциплины.....	5
5. Образовательные технологии.....	8
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов.....	9
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины.....	9
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины .	11
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	12

## «Стандартная модель и ее расширения»

### Рабочая программа дисциплины

#### 1. Цели освоения дисциплины

Предлагаемый курс лекций является частью профессионального цикла подготовки аспирантов по специальностям 01.04.02 Теоретическая физика и 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц (уровень подготовки кадров высшей квалификации). Он ставит перед собой две основные задачи. Первой задачей является подготовка аспирантов указанных специальностей к сдаче кандидатского экзамена по широкому кругу вопросов. Второй задачей является детальное обсуждение некоторых вопросов, которые не входят в стандартную университетскую программу, но знание и правильное понимание которых очень важно для работы исследователей. Обучение предполагается проводить не на основе повторения университетского курса, а на основе обсуждения нетривиальных и интересных физических проблем, решение которых потребует напоминания основ теории. Это позволит подготовиться к сдаче кандидатских экзаменов, а также повысить интерес к исследовательской работе.

В рамках курса излагаются основы единой теории сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий и современные методы теоретического анализа, позволяющие делать простые оценки для всего многообразия процессов и явлений физики элементарных частиц. Знание представленного материала важно как для теоретиков и вычислителей, так и для экспериментаторов.

#### 2. Место дисциплины в структуре программы обучения

Дисциплина «Стандартная модель и ее расширения» входит в набор вариативных дисциплин блока 1 "Дисциплины (модули)". Дисциплина является элективной (дисциплиной по выбору), ориентированной на аспирантов, специализирующихся в области теоретической физики и физики элементарных частиц. Аспиранты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны иметь общую базовую подготовку в рамках программы 5-6 лет обучения в ВУЗе, в том числе:

- должны быть знакомы с основами нерелятивистской классической механики и специальной теории относительности,
- должны знать основы классической электродинамики,
- должны быть знакомы с основами нерелятивистской квантовой механики,
- должны владеть основами математического анализа и теории функций комплексного переменного.

Для лучшего усвоения дисциплины, ее изучение должно проводиться после прохождения аспирантом курса "Избранные главы современной физики"

#### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

- Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);
- Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов для решения научных и практических задач (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-1);

- Способность к получению, критическому осмыслению и реферативному изложению научных результатов в области физики (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-2);

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **иметь представление** о Стандартной Модели элементарных частиц и феноменологии сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий.
- **уметь** проводить анализ и оценку величин различных эффектов, которые важны при проведении современных экспериментов.
- **знать** современное состояние и направление развития физики элементарных частиц.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Стандартная модель и ее расширения» представляет собой годовой курс, читаемый в аспирантуре ИЯФ СО РАН. Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 часов.

Раздел дисциплины	Неделя	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
		Лекции	Семинары	Самостоятельная работа	
<b>Первый семестр</b>					
Абелевы и не-абелевы калибровочные преобразования. Принцип калибровочной инвариантности. Построение лагранжианов взаимодействия.	1	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Невозможность канонического квантования калибровочных теорий в ковариантном виде. Кулоновская калибровка. Другие нековариантные калибровки. Введение в лагранжиан членов, фиксирующих калибровку.	2	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Нефизические степени свободы. Индефинитная метрика. Вклады продольных и временных поляризаций в физические наблюдаемые.	3	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
"Интегрирование по путям" в квантовой механике. Континуальные интегралы. Грассмановы числа. Метод функционального	4	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.

интегрирования в теории поля. Производящий функционал.					
Ковариантное квантование неабелевых калибровочных теорий. "Духи" Фаддеева-Попова.	5	2	2	3	Контрольная работа по пройденному материалу.
Правила диаграммной техники в квантовой электродинамике и квантовой хромодинамике	6	2	2	3	Разбор контрольной работы
Перекрестная инвариантность амплитуд процессов. Зависимость поведения амплитуд в области больших энергий от спина частиц в перекрестных каналах.	7	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Основные процессы квантовой электродинамики. Характерные черты дифференциальных и полных сечений при высоких энергиях.	8	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Элементарные процессы квантовой хромодинамики. Характерные черты дифференциальных и полных сечений при высоких энергиях.	9	2	2	2	Контрольная работа по пройденному материалу.
Расходимости и перенормировки в теории поля. Критерий перенормируемости. Перенормировки и контрчлены в лагранжиане.	10	2	2	2	Разбор контрольной работы
Перенормировки в методе функционального интегрирования.	11	2	2	2	
Группа перенормировок. Уравнения Гелл-Манна – Лоу и Каллана – Симанчика. "Бегущая" константа связи.	12	2	2	2	
Нуль-заряд и асимптотическая свобода. Экранировка и анти-экранировка заряда	13	2	2	2	
Факторизация "жестких" и "мягких" вкладов в сечения процессов при больших энергиях. Партоновая модель.	14	2	2	2	
Партоновая модель в квантовой электродинамике. Методы эквивалентных	15	2	2	2	

фотонов и квазиреальных электронов.					
Партонная модель в квантовой хромодинамике. Уравнения эволюции патронных распределений.	16	2	2	2	
<b>Зачеты</b>					4
<b>Итого за 1 семестр</b>		<b>32</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>4</b>
<b>Второй семестр</b>					
Непертурбативные эффекты в квантовой хромодинамике. Глюонный и кварковый конденсаты. Спонтанное нарушение киральной симметрии.	1	2	2	2	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Спонтанное нарушение симметрии и Хиггсовский механизм введения масс калибровочных бозонов	2	2	2	3	
SU(2)×U(1) симметрия электро-слабого взаимодействия. Модель Вайнберга .	3	2	2	3	
В-А <sub>3</sub> смешивание. Фотон и Z-бозон. Угол смешивания Вайнберга.	4	2	2	3	
Матрица Кобаяши-Маскава. Нарушение CP и T инвариантности. Треугольник унитарности.	5	2	2	2	Контрольная работа по пройденному материалу.
Заряженные токи.	6	2	2	3	Разбор контрольной работы
Нейтральные токи	7	2	2	2	
Механизмы рождения и распада хиггсовского бозона. Наблюдение его на LHC.	8	2	2	3	
. Глубоко неупругое рассеяние. Нейтральные токи.	9	2	2	3	Контрольная работа по пройденному материалу.
Глубоко неупругое рассеяние. Заряженные токи.	10	2	2	3	Разбор контрольной работы
Спектроскопия мезонов и барионов с b-кварком. Спиновая симметрия тяжёлого кварка. Её нарушение - хромагнитное взаимодействие. Сверхтонкие расщепления B-B* и D-D*.	11	2	2	3	
Сильные распады B <sub>1</sub> и B <sub>2</sub> : спиновая симметрия, фабрика Шмушкевича.	12	2	2	2	
Полулептонные и адронные распады B	13	2	2	2	

мезонов. Лептонные Константы распадов $f_B$ и $f_D$ .	Оценки. распады.				
Физика t-кварка.		14	2	2	2
Барионная вселенной. Механизмы возникновения асимметрии.	асимметрия	15	2	2	2
Перспективы объединения сильного электрослабого взаимодействия.	теории и	16	2	2	2
<b>Зачет</b>					4
<b>Итого за 2 семестр</b>			<b>32</b>	<b>32</b>	<b>40</b>
					<b>4</b>

### Содержание дисциплины:

1. Абелевы и неабелевы калибровочные теории поля, их квантование, ковариантные и нековариантные калибровки, функциональные методы в квантовой теории поля, диаграммная техника для вычисления амплитуд.
2. Элементарные процессы квантовой электродинамики и квантовой хромодинамики в первом исчезающем приближении теории возмущений, свойства дифференциальных и полных сечений, поведение сечений при высоких энергиях.
4. Радиационные поправки, ультрафиолетовые расходимости и перенормировки, ренорм-группа, уравнения ренорм-группы, экранировка заряда в абелевых теориях и асимптотическая свобода в неабелевых.
5. Факторизация "жестких" и "мягких" вкладов в сечения процессов при больших энергиях. Приближенные методы вычисления сечений процессов высокого порядка теории возмущений. Партоновая модель. Уравнения эволюции партоновых распределений.
6. Спонтанное нарушение симметрии, теория электро-слабых взаимодействий Глэшоу-Вайнберга-Салама, CP несохранение, процессы рождения и распады векторных бозонов и хиггсовского бозона, физика частиц с тяжелыми и сверх-тяжелыми кварками.
7. Неполнота Стандартной Модели с теоретической и феноменологической точек зрения. Осцилляции нейтрино. Пути расширения Стандартной Модели. Единые модели теории сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий.

### 5. Образовательные технологии

При проведении лекционных занятий используется мультимедийное оборудование. Практические занятия включают в себя самостоятельное решение различных задач, иллюстрирующих лекционный материал. Особый упор делается на обучении аспирантов делать качественные оценки эффектов, а также на обучении аспирантов умению проводить всесторонний анализ полученных результатов и исследованию различных предельных случаев.

Лекции и семинары по курсу проводятся в малых группах (до 6 человек) в интерактивном режиме, с возможностью привлечения слушателей к обсуждению рассматриваемых вопросов.



## 6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов

Самостоятельная работа студентов поддерживается регулярными приемами заданий. Система контроля включает текущий (по ходу семестра) контроль освоения практического материала. В качестве текущего контроля успеваемости используется контроль посещаемости. Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на зачете, который проводится в конце семестра по билетам в устной форме.

## 7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины:

### Билеты для зачета за 1 семестр

Билет N: 1

1. Построение лагранжианов взаимодействия калибровочных теорий. \\\
2. Найти высокоэнергетическую асимптотику амплитуды глюон-глюонного рассеяния.

Билет N:2

1. Кулоновская калибровка в КЭД и КХД.
2. Найти асимптотику поляризованного оператора фотона.

Билет N: 3

1. Ковариантное квантование калибровочных теорий. Индефинитная метрика.
2. Оценить вклад однофотонного механизма в полное сечение электророжения адронов на встречных электрон-позитронных пучках.

Билет N: 4

1. Производящий функционал в квантовой хромодинамике. \\\
2. Оценить вклад двухфотонного механизма в полное сечение электророжения адронов на встречных электрон-позитронных пучках.

Билет N: 5

1. Ковариантное квантование неабелевых калибровочных теорий. "Духи" Фаддеева-Попова.
2. Оценить вклад однофотонного механизма в полное сечение электророжения  $\mu^+ + \mu^-$  пары на встречных электрон-позитронных пучках.

Билет N: 6

1. Зависимость поведения амплитуд в области больших энергий от спина частиц в перекрестных каналах.
2. Высокоэнергетическая асимптотика амплитуды процесса  $\bar{q}q \rightarrow \bar{q}q$  в КХД.

Билет N: 7

1. Основные процессы квантовой электродинамики. Характерные черты дифференциальных и полных сечений при высоких энергиях.
2. Оценить сечение рождения C-четных адронных резонансов на встречных электрон-позитронных пучках.

Билет N: 8

1. Элементарные процессы квантовой хромодинамики. Характерные черты дифференциальных и полных сечений при высоких энергиях.
2. Высокоэнергетическая асимптотика амплитуды процесса  $\bar{q}q \rightarrow \gamma\gamma$  в КХД.

Билет N: 9

1. Расходимости и перенормировки в теории поля. Критерий перенормируемости. \\\
2. Высокоэнергетическая асимптотика амплитуды процесса  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  в КХД.

Билет N: 10

1. Группа перенормировок. Уравнение Гелл-Манна -- Лоу. \\\
2. Высокоэнергетическая асимптотика амплитуды процесса  $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}$  в КХД.

Билет N: 11

1. Нуль-заряд и асимптотическая свобода.
2. Оценить отношение полной и радиационной ширины  $J/\psi$ .

Билет N: 12

1. Факторизация "жестких" и "мягких" вкладов в сечения процессов при больших энергиях.
2. Оценить отношение полной и двухфотонной ширины распадов  $\eta_c$ .

Билет N: 13

1. Методы эквивалентных фотонов и квазиреальных электронов.
2. Оценить  $\frac{d\sigma(e^+e^- \rightarrow 3 jets)}{d\sigma(e^+e^- \rightarrow 2 jets + \gamma)}$  в кинематической области, когда углы между струями и  $\gamma$ -квантом большие.

Билет N: 14

1. Уравнения эволюции патронных распределений в КХД. \\\
2. Найти наблюдаемую форму резонансного сечения  $\sigma_{e^+e^- \rightarrow hadrons}^{exp}(s)$  Учсть разброс энергий и радиационные поправки за счет излучения начальных частиц.

Билет N: 15

1. Метод структурных функций для вычисления радиационных поправок.
2. Оценить отношение множественностей в кварковых и глюонных струях.

Билет N: 16

1. Цветовая когерентность. Партоны распределения в области малых  $x$ . \\\
2. Оценить область существенных прицельных параметров в процессе тормозного излучения при рассеянии ультрарелятивистского электрона во внешнем поле. .

### Билеты для зачета за 2 семестр

Билет N: 1

1. Хиггсовский механизм введения масс калибровочных бозонов.
2. Вывести в партонной модели правило сумм Адлера

$$\left[ \int_0^1 \frac{dx}{2x} [F_2^{\bar{v}p}(x) - F_2^{\nu p}(x)] = \int_0^1 dx (u_v(x) - d_v(x)) = 1 \right] \quad \setminus$$

Билет N: 2

1. В-А\_3 смешивание. Фотон и Z-бозон. Угол смешивания Вайнберга.
2. Вывести в партонной модели правило сумм Готтфрида

$$\left[ \int_0^1 \frac{dx}{x} [F_2^p(x) - F_2^n(x)] = \frac{1}{3} \int_0^1 dx [(u(x) - \bar{u}(x)) - (d(x) - \bar{d}(x))] + \left[ \frac{2}{3} \int_0^1 dx [\bar{u}(x) - \bar{d}(x)] = \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{3} \int_0^1 dx [u_v(x) - d_v(x)] = \frac{1}{3} \right]$$

Билет N: 3

1. Матрица Кобаяши-Маскава. Нарушение CP и T инвариантности. Треугольник унитарности..
2. В SU(5) модели великого объединения, считая, что  $\underline{5}^* = (d_{\alpha}^c, e^-, -\nu_e)_L$ , выразить генераторы слабого изоспина T<sup>3</sup>, гиперзаряда S и электрического заряда Q через t<sub>0</sub> и t<sup>3</sup>.

Билет N: 4

1. Механизмы рождения и распада хиггсовского бозона.
2. Найти в SU(5) модели  $\sin^2 \theta_W$  ( $\theta_W$  – угол Вайнберга).

Билет N: 5

1. Глубоко неупругое рассеяние. Нейтральные токи. \\\
2. Оценить время жизни t- кварка.

Билет N: 6

1. Глубоко неупругое рассеяние. Заряженные токи.
2. Оценить время жизни Z-бозона.

Билет N: 7

1. Спектроскопия мезонов и барионов с  $b$ -кварком. Спиновая симметрия тяжёлого кварка. \\\
2. Оценить время жизни  $W$ -бозона.

Билет N: 8

1. Сильные распады  $B_1$  и  $B_2$ : спиновая симметрия, фабрика Шмушкевича. \\\
2. Оценить величину радиационных поправок к сечению электрон-позитронной аннигиляции в адроны.

Билет N: 9

1. Полуплептонные и адронные распады  $B$  мезонов.
2. Оценить время жизни  $t$ -кварка.

Билет N: 10

1. Лептонные распады  $B$  мезонов. \\\
2. Оценить, при какой массе  $t$ -кварка возможно формирование топония.

Билет N: 11

1. Константы распадов  $f_B$  и  $f_D$ .
2. В дваждылогарифмическом приближении вычислить радиационную поправку к сечению рассеяния электрона кулоновским полем.

Билет N: 12

1. Физика  $t$ -кварка.
2. Найти асимптотику поляризационного оператора фотона.

Билет N: 13

1. Барионная асимметрия вселенной. Механизмы возникновения асимметрии. \\\
2. Оценить вклад однофотонного механизма в полное сечение электророждения адронов на встречных электрон-позитронных пучках.

Билет N: 14

1. Наблюдаемые отклонения от стандартной модели. \\\
2. Оценить вклад двухфотонного механизма в полное сечение электророждения адронов на встречных электрон-позитронных пучках..

Билет N: 15

1. Стерильные нейтрино.
2. Оценить сечение рождения  $S$ -четных адронных резонансов на встречных электрон-позитронных пучках.

Билет N: 16

1. Темная материя. \\\
2. Оценить отношение полной и радиационной ширины  $J/\psi$ .

Билет N: 17

1. Суперсимметричная дуальность и голография. \\\
2. Оценить вклад адронов в аномальный магнитный момент мюона.

## **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **Основная литература**

1. Л. Д. Ландау, Е.М. Лифшиц; Квантовая механика, М.: Физматлит, 2012.
2. В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин; Сборник задач по электродинамике, М. 2002.

### **Дополнительная литература**

1. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: URSS, 2005.
2. В.Б.Берестецкий, Е.М.Лившиц, Л.П.Питаевский Квантовая электродинамика, М.1989

3. В.М. Галицкий , Б.М. Карнаков , В.И. Коган; Задачи по квантовой механике, М.: Наука, 1992.

#### **9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Лекционные занятия проводятся в аудитории, оборудованной мультимедийным проектором и компьютером, необходимых для презентации электронного варианта лекций и проведения компьютерных демонстраций.