

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Физический факультет
Кафедра физики элементарных частиц**



**Рабочая программа дисциплины
СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ 2**

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения

Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоя тельная работа, не включая период сессии	Самостоя тельная подготовк а к промежут очной аттестаци и	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практиче ские занятия	Лаборат орные занятия			Консультац ии	Зач ет	Диффе ренци рова нный зачет	Эк за ме н
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часа / 3 зачетные единицы из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции : ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре магистерской программы	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	5
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
Программа лекций	6
Программа практических занятий	7
5. Перечень учебной литературы.	8
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.	8
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	9
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	9
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	9
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	10

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Основными целями освоения дисциплины «Стандартная модель 2» является знакомство с современными приложениями теории сильных и слабых взаимодействий элементарных частиц и методами теоретического анализа процессов сильного и слабого взаимодействия, знание структуры квантовой хромодинамики и теории Глэшоу-Вайнберга-Салама, описание пределов применимости стандартной модели, формирование общекультурных и профессиональных навыков физика-исследователя. Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

- Описание экспериментальных процессов при высоких энергиях с помощью уравнений эволюции КХД.
- Описание рождения адронов и струй в e^+e^- столкновениях.
- Построение эффективного потенциала стандартной модели. Знакомство с вопросом устойчивости вакуума.
- Изучение СР нарушения в процессах стандартной модели.
- Изучение нейтринной физики.

В курсе излагается материал, знание которого необходимо как для теоретиков и вычислителей, так и для экспериментаторов. Он включает приложения квантовой хромодинамики, построение эффективного потенциала стандартной модели и его применение для понимания стабильности вакуума стандартной модели. В данном курсе, предназначенном для магистрантов, специализирующихся по профилю "физика ядра и элементарных частиц", излагаются основы теории и современные методы теоретического анализа, позволяющие делать простые оценки для всего многообразия процессов и явлений физики элементарных частиц.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать концепции калибровочной симметрии, перенормируемости, асимптотическое поведение зарядов стандартной модели, область применимости стандартной модели; –базовые разделы неабелевой квантовой калибровочной теории: основные понятия, модели, законы; теоретические и методологические основы построения Стандартной модели. Уметь –самостоятельно решать задачи и проводить оценки для ширин и сечений процессов в стандартной модели; уметь применять знания стандартной модели для анализа и обработки результатов физических экспериментов. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики элементарных частиц; основными методами научных

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		исследований, навыками использования теоретических основ базовых разделов общей и теоретической физики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области стандартной модели физики элементарных частиц.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Стандартная модель 2» реализуется в осеннем семестре 2 курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики элементарных частиц. Для освоения материала необходима предварительная подготовка студентов по дисциплинам «Квантовая электродинамика» и «Стандартная модель 1». Курс должен предшествовать выполнению магистерской диссертации т.к. дает магистранту необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследований в области физики элементарных частиц в рамках подготовки его квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоёмкость дисциплины составляет: 3 зачётные единицы, 108 часов.

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен.

№		Вид деятельности	Семестр
			1
1		Лекции, ч	32
2		Практические занятия, ч	32
3		Лабораторные занятия, ч	-
4		Занятия в контактной форме, ч из них	68
5		аудиторных занятий, ч	64
6		в электронной форме, ч	-
7		консультаций, час.	2
8		промежуточная аттестация, ч	2
9		Самостоятельная работа, час.	40
10		Всего, ч	108

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Дисциплина «Стандартная модель 2» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 2-ом курсе магистратуры физического факультета НГУ в осеннем семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 часов.

Программа лекций

1. Квантовая хромодинамика при высоких энергиях (12 часов)

Глубоконеупругое рассеяние лептонов на адронах. Форм-факторы адронов. Структурные функции, Бьёркеновский скейлинг.

Операторное разложение. Уравнения ренормгруппы для моментов структурных функций. Вильсоновские коэффициенты.

Коллинеарная факторизация. Партонная модель. Функции распределения партонов.

Уравнения Докшицера-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи (ДГЛАП). Преобразование Меллина и решение уравнения ДГЛАП.

Функции фрагментации. Инклюзивное рождение адронов. Рождение струй.

Электрон-позитронная аннигиляция в адроны. Дисперсионные соотношения. Правила сумм ИТЭФ. Глюонный и кварковый конденсаты.

2. CP нарушение (6 часов)

Θ -член, сильная CP проблема. Вакуум КХД, большие и малые калибровочные преобразования.

Нарушающий CP эффективный лагранжиан. Нарушение CP в слабых распадах $K(B,D)$ мезонов. Смешивание нейтральных мезонов.

3. Эффективный потенциал стандартной модели (10 часов)

Понятие эффективного потенциала. Построение однопетлевого эффективного потенциала для стандартной модели. Коррекция эффективного потенциала с помощью уравнений ренормгруппы. Появление нового вакуума на больших масштабах. Устойчивость текущего вакуума. Поведение вакуума при конечной температуре.

4. Физика нейтрино (14 часов)

Экспериментальные свидетельства наличия массы у нейтрино. Дираковский и майорановский механизмы введения массы нейтрино. Механизм качели (see-saw). Матрица смешивания нейтрино. Распространение нейтрино в вакууме и в среде. Эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна.

Программа практических занятий

1 Квантовая хромодинамика при высоких энергиях (12 часов)

1. Глубоконеупругое рассеяние. Уравнение Докшицера-Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи (ДГЛАП).
2. Вычисление $dn_g^g(x, q_\perp)$ (число глюонов в глюоне).
3. Преобразование Меллина и его свойства. Моменты (меллиновские образы) ядер уравнения ДГЛАП: явные выражения и аналитические свойства. Синглетные и несинглетные моменты партонных плотностей.
4. Решение уравнения ДГЛАП для несинглетных и синглетных моментов.
5. Операторы твиста два. Несинглетные и синглетные операторы твиста два в операторном разложении глубоконеупругого рассеяния. Определения операторов твиста два в КХД. Функции Грина синглетных операторов.
6. Операторное смешивание глюонного и фермионного операторов. Диаграммное представление. Вычисление недиагонального матричного элемента $\gamma_{f,g}$ в матрице аномальных размерностей.
7. Связь аномальных размерностей операторов твиста два и меллиновских образов ядер уравнения ДГЛАП.

8. Электрон-позитронная аннигиляция в адроны. Вычисление поправки порядка α_s к $R=\sigma_{e^+e^-\rightarrow\text{hadrons}}/\sigma_{e^+e^-\rightarrow\mu^+\mu^-}$ в размерной регуляризации $D=4+2\epsilon$. Вклад реальных поправок за счет излучения глюона. Вклад виртуальных поправок. Сокращение расходимостей.

2. СР нарушение

9. Вычисление топологического числа для больших калибровочных преобразований.
 10. Оценка электрического дипольного момента нейтрона, оценка Θ -члена.
 11. Построение лагранжиана аксиона Кима-Шифмана-Вайнштейна-Захарова. Вычисление массы аксиона и его константы связи с фотонами.
 12. Вычисление нелептонных распадов В мезонов. Эффективный лагранжиан. Вычисление его параметров. Приближение факторизации. Перенормировка сильных матричных элементов. Пингвинные диаграммы. Различие ширины распада B^+ и B^- мезонов.

3 Эффективный потенциал стандартной модели (10 часов)

13. Квантование стандартной модели в R_ξ калибровке.
 14. Вычисление однопетлевого эффективного потенциала в модели $\lambda\phi^4$.
 15. Вычисление однопетлевого эффективного потенциала стандартной модели.
 16. Вычисление бэта функций констант связи стандартной модели. Исследование асимптотического поведения этих констант связи.
 17. Решение уравнения Каллана-Симанчика для эффективного потенциала стандартной модели. Наличие нового вакуума при больших масштабах.
 18. Исследование зависимости эффективного потенциала при конечной температуре.

Физика нейтрино (14 часов)

19. Построение матрицы смешивания нейтрино. Исследование ее свойств. Механизм качели (see-saw) для трех поколений нейтрино.
 20. Построение осциллирующей волновой функции нейтрино.
 21. Вычисление вероятности смены флейвора в зависимости от пройденного расстояния для ультрарелятивистского нейтрино в вакууме.

Самостоятельная работа студентов (40 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям (решение задач, разбор теоретических аспектов)	22
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. М. Пескин, Д. Шредер, Введение в квантовую теорию поля. Москва-Ижевск, 2001г., ISBN 5-93972-083-8 (10 экз.)
2. Н. Ф. Нелипа, Физика элементарных частиц, М. Высш. Шк., 1977.(6 экз.)
3. К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер, Квантовая теория поля, М., т. 1, 2, 1984. Т1-448с (3 экз.), Т2-400с (3 экз.)
4. С. Вайнберг, Квантовая теория поля, т.1-2, М. ФИЗМАТЛИТ 2003., Т.1: Общая теория 2003, 648 с., ISBN 5-9221-0403-9 (4 экз.), Т.2: Современные приложения. 2003, 527 с. : ил. ISBN 5-9221-0404-7 (4 экз.)
5. Окунь Л. Б. Слабое взаимодействие элементарных частиц, ФИЗМАТЛИТ, 1963. (9 экз.)
6. Окунь Л. Б. Лептоны и кварки, УРСС, 1990, ISBN 5-02-014027-9 (12 экз.)

7. В. М. Емельянов, Стандартная модель и ее расширения, ФИЗМАТЛИТ 2007., ISBN 978-5-9221-0830-0 (4 экз.)

6 Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся

1. Б.Л. Иоффе, Л.Н. Липатов, В.С. Фадин, Квантовая хромодинамика: пертурбативные и непертурбативные аспекты. Т.1-2, М.: ЦСП и М, 2012.
2. Yu. Makeenko, Methods of Contemporary Gauge Theory, Cambridge University Press, 2002.
3. E. Shuryak, The QCD Vacuum, Hadrons and Superdense Matter, World Scientific Lecture Notes in Physics Vol. 71, 2004.
4. G. Dissertori, I. G. Knowles, M. Schmelling, Quantum Chromodynamics, Clarendon Press 2003.
5. E. Levin, Yu. V. Kovchegov, Quantum Chromodynamics at High Energy, Cambridge University Press, 2012.
6. M. Srednicki, Quantum Field Theory, Cambridge university press, 2019.
7. Donoghue, J. F., Golowich, E. and Holstein, B. R., Dynamics of the Standard Model, Oxford University Press, 2014.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет

-Грозин А. Г., Lectures on QED and QCD, <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0508242>, 2005

-Видеолекции по Теории сильных взаимодействий профессора, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Фаина В.С. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x37vo3uSPB2t7gPTLedMr3fa>

-Видеолекции по Теории слабых взаимодействий профессора, д.ф.-м.н., Черняка В.Л. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x371-8Xz5TqRtnnV9R8WRak7>

-Видеосеминары по Теории сильных взаимодействий доцента, к.ф.-м.н. Резниченко А.В. <https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x36tEait-pYyboIZRFgOY0Gm>

- Ресурсы на веб-странице кафедры физики элементарных частиц: <https://www.snd.inp.nsk.su/hepdiv/l16.shtml>

- Веб-страница TreeofKnowledge (автор: профессор РАН, д.ф.-м.н. Ли Р.Н.) <http://www.inp.nsk.su/students/theor/TreeofKnowledge/index.TreeOfKnowledge.html>

- Конспект семинаров в электронном виде (автор конспекта: профессор РАН, д.ф.-м.н. Р.Н. Ли): конспект доступен для студентов кафедры физики элементарных частиц на сайте (под паролем) <https://www.snd.inp.nsk.su/hepdiv/>

- Конспект лекций профессора, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Фаина В.С. в электронном виде. Конспект доступен для студентов кафедры физики элементарных частиц на сайте (под паролем) <https://www.snd.inp.nsk.su/hepdiv/>

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются

7.2 Информационные справочные системы

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими 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 в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем проверки решения задач студентами.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня. Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции

освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать концепции калибровочной симметрии, перенормируемости, асимптотическое поведение зарядов стандартной модели, область применимости стандартной модели; -базовые разделы неабелевой квантовой калибровочной теории: основные понятия, модели, законы; теоретические и методологические основы построения Стандартной модели.	Решение задач, экзамен.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь -самостоятельно решать задачи и проводить оценки для ширин и сечений процессов в стандартной модели; уметь применять знания стандартной модели для анализа и обработки результатов физических экспериментов. Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики элементарных частиц; основными методами научных исследований, навыками использования теоретических основ базовых разделов общей и теоретической физики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области стандартной модели физики элементарных частиц.	Решение задач, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Стандартная модель 2».

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 90% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан развернутый ответ на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена (или средняя оценка за две потоковые контрольные работы) не ниже «хорошо», – точность и корректность применения терминов и понятий; - умение делать выводы и обобщения, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	Отлично

В ответах на вопросы обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.	
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 80% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан правильный ответ на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена (или средняя оценка за две потоковые контрольные работы) не ниже «удовлетворительно», – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. В ответах на вопросы обучающийся мог допустить незначительные ошибки.	<i>Хорошо</i>
<u>Сдача заданий:</u> выполнено и сдано не менее 70% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - дан правильный ответ на один вопрос билета и оценка на письменной части экзамена (или хотя бы одна из двух оценок за потоковые контрольные работы) не ниже «удовлетворительно», – наличие правильных ответов на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	<i>Удовлетворительно</i>
<u>Сдача заданий:</u> сдано менее 60% задач в течение семестра <u>Экзамен:</u> - не даны правильные ответы на вопросы билета и оценка на письменной части экзамена «неудовлетворительно», – не отвечает на дополнительные вопросы, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины.	<i>Неудовлетворительно</i>

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Примеры заданий для самостоятельного решения:

- В однопетлевом приближении вычислить аномальную размерность оператора твиста два: $O^{\mu_1\mu_2\dots\mu_n}_\psi = i^{n-1} S: \psi_{\text{bar}}(x) t_f^a \gamma^{\mu_1} D^{\mu_2} D^{\mu_3} \dots D^{\mu_n} \psi(x);$, где S - оператор симметризации и вычитания следов по индексам $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, t_f^a - генератор группы ароматов в фундаментальном представлении.
- Используя уравнения ДГЛАП, определить поведение моментов партонных распределений при $x \rightarrow 0$.
- Получить дважды логарифмическую асимптотику глюонной функции распределения.
- Вычислить число трехструйных событий в электрон-позитронной аннигиляции в адроны по Jade алгоритму, объяснить его недостатки.
- Вычислить $\langle \alpha_s/\pi \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} F^{\mu\nu} F^{\alpha\beta} \rangle$ в теории с двумя легкими кварками.
- Вычислить массу аксиона Кима-Шифмана-Вайнштейна-Захарова.
- Оценить ширину распада $B^- \rightarrow D^- \pi^0$.
- Оценить ширину распада $B^0\text{-bar} \rightarrow K^+ K^-$.
- Вычислить аномальную размерность юкавской константы связи t кварка.
- Построить график зависимости юкавской константы связи t кварка от масштаба. Объяснить его поведение.
- Оценить масштаб, на котором однопетлевой эффективный потенциал стандартной модели становится неограниченным снизу.
- В теории с тремя поколениями нейтрино показать, что механизм качели (seesaw) приводит к тому, что масса легкого нейтрино обратно пропорциональна майорановской массе, если майорановская масса очень велика.

Билеты на экзамен

Билет 1

1. Написать и решить уравнения Каллана – Симанчика для оператора твиста 2.
2. Оценить вклад сильных и слабых взаимодействий в электрический дипольный момент нейтрона.
3. Вывести эффективный потенциал Коулмена-Вайнберга.
4. Выразить вероятность перехода электронного нейтрино в мюонное через разность квадратов их масс.

Билет 2

1. Написать и решить уравнения Каллана – Симанчика для массового оператора.
2. Объяснить, что такое партонная модель, структурные функции, функции фрагментации, Бьеркеновский скейлинг.
3. Оценить ширину распада $B^0 \rightarrow D^- \pi^+$.
4. Найти аномальную размерность поля Хиггса.
5. Построить уравнение эволюции волновой функции нейтрино в вакууме.

Билет 3

1. Решить уравнения ДГЛАП.
2. Показать, как меняется значение θ члена при диагонализации массовой матрицы фермионов.
3. Объяснить, как зависит эффективный потенциал стандартной модели от температуры.
4. Построить уравнение эволюции волновой функции нейтрино в среде.

Билет 4

1. Получить уравнения ДГЛАП с помощью фоковского разложения волновой функции адрона.
2. Показать, как зависит от времени волновая функция K^0 мезона.
3. Найти бэта функцию константы связи группы $U(1)_Y$.
4. Качественно объяснить явление Михеева-Смирново-Вольфенштейна.

Билет 5

1. Получить уравнения ДГЛАП как уравнения ренормгруппы.
2. Описать CP нарушение при смешивании нейтральных мезонов.
3. Найти бэта функцию константы связи группы $SU(2)_{I_W}$.
4. Продемонстрировать введение массы нейтрино с помощью механизма качели (seesaw) для одного флейвора.

Билет 6

1. Объяснить, что такое быстрота, псевдобыстрота, мягкие, жесткие, полужесткие, дифракционные процессы, центральная, одинарная, двойная дифракция, minimum bias events, underlying event, упругое, неупругое (недифракционное) рассеяние. Написать, каковы характерные величины для различных вкладов в полное сечение на LHC.
2. Оценить ширину распада $B^- \rightarrow D^0 K^-$.
3. Нарисовать графики зависимости трех констант калибровочной теории с группой $SU(3)_{\text{color}} \times SU(2)_{I_W} \times U(1)_Y$ от масштаба.
4. Вычислить разность вероятностей осцилляций нейтрино и антинейтрино при наличии CP нарушающей фазы в матрице смешивания нейтрино.

Билет 7

1. Объяснить правила сумм на примере электрон-позитронной аннигиляции в адроны.
2. Вычислить топологическое число для калибровочного преобразования вида $V = (1 + i(\tau \cdot x)/x^2) / (1 - i(\tau \cdot x)/x^2)$.
3. Оценить долю продольного импульса протона, переносимого глюонами в бьеркеновском пределе.

4. Описать pp-цепь реакций на Солнце, в которых рождаются нейтрино.

Билет 8

1. Написать формулы факторизации для адрон-адронных столкновений, инклюзивного рождения адронов.
2. Вычислить топологическое число для калибровочного преобразования вида $V = \exp[i\pi(\tau \cdot x)/\sqrt{x^2 + a^2}]$.
3. Найти бэта функцию константы λ четыреххиггсового взаимодействия.
4. Продемонстрировать введение массы нейтрино с помощью механизма качели (seesaw) для трех флейворов.

Билет 9

1. Описать k_t , анти- k_t , cone алгоритмы, объяснить, чем отличаются алгоритмы в e^+e^- и p столкновениях.
2. Вывести уравнения Швингера-Дайсона для $\langle \partial_\mu J_\mu^A(y) (\bar{\psi}(x) \gamma^5 \psi(x)) \rangle$, где J_μ^A - оператор аксиального тока.
3. Найти бэта функцию константы m^2 из потенциала Хиггса.
4. Объяснить, как вводится майорановская масса.

Билет 10

1. Вывести импульсное правило сумм для партонных функций распределения.
2. Выразить матричные элементы между вакуумными состояниями в теории с $\theta \neq 0$ через матричные элементы в теории с $\theta = 0$.
3. Построить график зависимости эффективного потенциала стандартной модели от масштаба и объяснить его поведение.
4. Какими условиями должен обладать эффективный гамильтониан взаимодействия нейтральных мезонов, чтобы отсутствовало CP нарушение.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.