

**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:	Феноменология в физике высоких энергий
по направлению:	Прикладная математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики высоких энергий
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Экзамен

8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 90 час.

Подготовка к экзамену: 60 час.

Всего часов: 270, всего зач. ед.: 6

Программу составил: А.М. Зайцев, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высоких энергий 25.05.2020

Аннотация

Курс охватывает широкий спектр вопросов современной экспериментальной физики высоких энергий. Обсуждаются теоретические представления, эксперименты и экспериментальные результаты по широкому спектру проблем – от свойств легких адронов до поиска эффектов за пределами стандартной модели.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Как можно быстрее подвести студентов к освоению стандартной модели фундаментальных взаимодействий, создать надежный базис для самостоятельного изучения избранных вопросов. Важнейшей особенностью курса является тесное взаимодействие теории, феноменологии и эксперимента.

Задачи дисциплины

Дать представление о свойствах элементарных частиц, методах исследований фундаментальных взаимодействий, современных проблемах в этой бурно развивающейся области физики, научить студентов решать типовые задачи.

Курс рассчитан на студентов, специализирующихся в физике высоких энергий. Для усвоения курса студенты должны быть знакомы с основами квантовой электродинамики, квантовомеханической теорией рассеяния, теорией групп и с основными экспериментальными методами регистрации частиц и излучений.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
УК-4 Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(ых) языке(ах)	УК-4.2 Использует современные информационно-коммуникативные средства для коммуникации
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности

ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные результаты и методы исследований в физике высоких энергий

уметь:

Усваивать экспериментальные результаты по ФВЭ, представленные в современных научных публикациях

владеть:

Методами экспериментальных исследований в ФВЭ

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	Уравнение Дирака	2	2		3
2	Непрерывные и дискретные симметрии	2	2		3
3	Электромагнитные свойства адронов	2	2		3
4	Лагранжиан КХД	2	2		3
5	Систематика адронов	2	2		3
6	Универсальность слабого взаимодействия	2	2		3
7	Структура слабых взаимодействий при низких энергиях	2	2		3

8	Распады пиона	2	2		3
9	β -распад нейтрона	2	2		3
10	Распады каонов	2	2		3
11	Нейтральные каоны	2	2		3
12	Распады тяжелых кварков и лептонов	2	2		3
13	Несохранение СР-четности в распадах тяжелых кварков	2	2		3
14	Редкие распады	2	2		3
15	Электрический дипольный момент	2	2		3
16	Нейтринные взаимодействия	2	2		3
17	Осцилляции нейтрино	2	2		3
18	Двойной β -распад	2	2		3
19	Правые нейтрино, стерильные нейтрино	2	2		3
20	Механизмы «качелей». Нейтрино в астрофизике	2	2		3
21	Очень слабо взаимодействующие частицы	2	2		3
22	Механизм Хиггса	2	2		3
23	Лагранжиан стандартной модели	2	2		3
24	Свойства Z, W	2	2		3
25	Свойства H бозонов	2	2		3
26	Экспериментальные исследования свойств H-бозона	2	2		3
27	Прецизионные тесты Стандартной модели	2	2		3
28	Суперсимметрия	2	2		3
29	Большое объединение	2	2		3
30	Темная материя	2	2		3
Итого часов		60	60		90
Подготовка к экзамену		60 час.			
Общая трудоёмкость		270 час., 6 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

1. Уравнение Дирака

Волновая функция частиц со спином $\frac{1}{2}$. Частицы и античастицы. Лагранжиан КЭД. Калибровочная инвариантность. Высшие порядки в КЭД. Лэмбовский сдвиг. Эволюция a_e с q^2 . Вклад адронов в a_e . Аномальный магнитный момент мюона. Измерение аномального магнитного момента мюона

2. Непрерывные и дискретные симметрии

Непрерывные симметрии, теорема Нетер, сохранение E, P, M. Дискретные симметрии, СРТ-теорема, Тождественность частиц. Связь спина и статистики. Комбинированная четность. Изотопическая симметрия, G-четность. Примеры запрещенных и разрешенных реакций.

3. Электромагнитные свойства адронов

Кварковая модель, относительные ширины распадов $V \rightarrow l+l^-$ в кварковой модели. Относительные ширины распадов $V \rightarrow P \gamma$ в кварковой модели. Модель доминантности векторных мезонов. Реакции Примакова. Приближение эквивалентных фотонов

4. Лагранжиан КХД

Локальное преобразование $SU(3)_c$. Восемь безмассовых глюонов. Самодействие глюонов. Неабелевость. Лагранжиан КХД. Эволюция α_s с q^2 . Асимптотическая свобода. Конфайнмент. Кварки, эксперименты по поиску кварков.

5. Систематика адронов

Кварковая модель, $SU(3)$ -симметрия. Мезоны, барионы, тяжелый кварконий. Глюболы, гибриды, многокварковые адроны

6. Универсальность слабого взаимодействия

β -распад. Распады лептонов. Нарушение P -четности. Взаимодействие ток*ток. Фермиевская константа. Лагранжиан слабого взаимодействия. Распад мюона. Распады адронов. Универсальность заряженного тока. Сохранение векторного тока.

7. Структура слабых взаимодействий при низких энергиях

Взаимодействие ток×ток. Фермиевская константа. Левые заряженные токи. Спиральность нейтрино. Нейтральный ток. Распад мюона. Амплитуда распада. Преобразования Фирца. Качественное обсуждение Эксперименты по исследованию распада мюона.

8. Распады пиона

Угол Кабиббо. Матрица СКМ. Сохранение векторного тока. Распад $\pi \rightarrow l \nu$. Распад $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e \nu$. Эксперименты по исследованию распада пиона.

9. β -распад нейтрона

Общий вид векторного и аксиального токов. Векторные формфакторы. Аксиальные формфакторы. Частичное сохранение аксиального тока. Эксперименты по исследованию распада нейтрона.

10. Распады каонов

Правило $\Delta Q = \Delta S$. Правило $|\Delta S| = 1$. Распады K_{l2} , K_{l3} , K_{l4} . Нелептонные распады. $\Delta T = 1/2$, распады гиперонов. Установки и эксперименты.

11. Нейтральные каоны

Переходы $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$. Разность масс K_1 и K_2 . Осцилляции странности. Механизм ГИМ. Регенерация. Распады $K_1 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Феноменология нарушения CP . Эксперименты по исследованию нарушения CP -инвариантности в распадах каонов. Редкие распады каонов. Установки и эксперименты.

12. Распады тяжелых кварков и лептонов

Мезоны с d и b -кварками. Лептонные распады. Нелептонные распады. t -кварк, τ -лептон. Лептонные распады. Полуадронные распады. Установки и эксперименты.

13. Несохранение CP -четности в распадах тяжелых кварков

Измерение констант V_{ij} . Треугольник CKM. Осцилляции $D \leftrightarrow \bar{D}$, $B \leftrightarrow \bar{B}$, $B_s \leftrightarrow \bar{B}_s$. Измерение угла в распаде $B \rightarrow J/\psi K^0$. Пингвинные графики. Установки и эксперименты

14. Редкие распады

FCNC, $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$, $\mu \rightarrow e \gamma$, $\mu \rightarrow 3e$. Модели и эксперименты.

15. Электрический дипольный момент

Нарушение CP-четности в КХД. Электрический дипольный момент нейтрона. Аксион. ЭДМ заряженных частиц.

Семестр: 8 (Весенний)

16. Нейтринные взаимодействия

Нейтрино дираковские и майорановские. Взаимодействие нейтрино с электроном. Взаимодействие нейтрино с нуклонами. Эксперименты по прямому измерению массы нейтрино.

17. Осцилляции нейтрино

Осцилляции для системы из двух нейтрино. Общий вид матрицы смешивания для трех нейтрино. Взаимодействие с веществом. Эффект МСВ. Эксперименты по наблюдению осцилляций. Параметры матрицы смешивания.

18. Двойной β -распад

Феноменология двойного β -распада и безнейтринного двойного β -распада. Эксперименты по двойному β -распаду. Ограничения на массы нейтрино и параметры смешивания.

19. Правые нейтрино, стерильные нейтрино

Экспериментальные указания на возможное существование стерильных нейтрино. Эксперименты по поиску стерильных нейтрино.

20. Механизмы «качелей». Нейтрино в астрофизике

Масса нейтрино – эффект BSM. Три механизма генерации масс нейтрино. Проблема барионной асимметрии Вселенной и «лептогенезис».

21. Очень слабо взаимодействующие частицы

Зачем нужны “feebly interactive particles” (FIP). Модели FIP. Поиски FIP на ускорителях, коллайдерах, в лабораторных экспериментах, в астрофизических наблюдениях.

22. Механизм Хиггса

Проблемы модели Ферми. Калибровочные теории. Локальная абелева симметрия. Голдстоуновский бозон. Локальная SU(2)-симметрия. Спонтанное нарушение локальной SU(2)-симметрии. Хиггсовский бозон.

23. Лагранжиан стандартной модели

Девять членов лагранжиана. Угол Вайнберга. Параметр ρ

24. Свойства Z, W

Массы W и Z – бозонов. Слабые заряды нейтральных токов. Массы лептонов и кварков. Рождение промежуточных бозонов в адронных взаимодействиях. Рождение Z -бозонов в e^+e^- -взаимодействиях. Массы, ширины, вероятности распадов. Эксперименты по измерению параметров W и Z -бозонов. Три поколения.

25. Свойства H бозонов

Ограничения на массу хиггсовского бозона. Роль хиггсовского бозона при высоких энергиях. Взаимодействие H -бозона с кварками. Взаимодействие H -бозона с глюонами и фотонами. Открытие хиггсовского бозона.

26. Экспериментальные исследования свойств H -бозона

Эксперименты на Тэватроне и БАК. Измерение параметров H -бозона: масса, ширина, спин, брэнчинги, константы связи. Поиски тяжелых H -бозонов.

27. Прецизионные тесты Стандартной модели

Параметризация Пескина-Такеучи, глобальный фит, экспериментальные указания на отклонения от СМ.

28. Суперсимметрия

Проблемы Стандартной модели. Суперсимметричные модели. Экспериментальные поиски суперсимметричных частиц.

29. Большое объединение

Проблемы стандартной модели. Большое объединение. Модель $SU(5)$. Распад протона. Осцилляции $n \leftrightarrow \bar{n}$

30. Темная материя

Астрофизические наблюдения темной материи. Ограничения на параметры темной материи. Поиски темной материи в лабораторных экспериментах, на реакторах, ускорителях и коллайдерах.

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

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в физику высоких энергий [Текст] / Д. Перкинс ; пер. с англ. А. В. Беркова ; под ред. Б. А. Долгошеина - М.Энергоатомиздат,1991
2. Кварки и партоны [Текст], введение в теорию /Ф. Клоуз; пер. с англ. П. Б. Вигмана; под ред. Н. Н. Николаева, An introduction to quarks and partons. -М., Мир, 1982
3. Кварки и лептоны. Введение в физику частиц [Текст] = Quarks and leptons: an introductory course in modern partide physics : [учеб. пособие для вузов] / Ф. Хелзен, А. Мартин ; пер. с англ. А. П. Горяки [и др.] ; под ред. А. Ц. Амагуни .— М. : Мир, 1987 .— 455 с.
4. Лептоны и кварки [Текст]/Л. Б. Окунь, -М., ЛКИ, 2013
5. Физика массивных нейтрино [Текст] = Physics of massive neutrinos/Ф. Боум, П. Фогель , -М., Мир, 1990

Дополнительная литература

1. М.И.Высоцкий, Лекции по теории электрослабых взаимодействий
<https://belle.lebedev.ru/mipt/wp-content/uploads/2019/03/preprint2018.pdf>

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

1. P. Kooijman & N. Tuning, Lectures on CP violation,
<https://www.nikhef.nl/~h71/Lectures/2015/ppII-cpviolation-19032018.pdf>
2. О.Ю. Смирнов, Неускорительная нейтринная физика,
http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2012_9-10/06_smir.pdf
3. P.Wells LEP Physics
<https://indico.cern.ch/event/414063/attachments/844859/1175408/a01491s4t2.pdf>
4. М.И.Высоцкий, Лекции по теории электрослабых взаимодействий
<https://belle.lebedev.ru/mipt/wp-content/uploads/2019/03/preprint2018.pdf>

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

Не предусмотрено.

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 напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики высоких энергий
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
7 (осенний) - Экзамен	
8 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	А.М. Зайцев, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
УК-4 Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(ых) языке(ах)	УК-4.2 Использует современные информационно-коммуникативные средства для коммуникации
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Феноменология в физике высоких энергий» обучающийся должен:

знать:

Основные результаты и методы исследований в физике высоких энергий

уметь:

Усваивать экспериментальные результаты по ФВЭ, представленные в современных научных публикациях

владеть:

Методами экспериментальных исследований в ФВЭ

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

1. Высшие порядки в КЭД
2. Электромагнитные свойства адронов
3. Эксперименты по измерению квантовых чисел адронов
4. Эксперименты по проверке С, Р, Т инвариантности
5. Уравнение Дирака
6. Калибровочная инвариантность
7. Лагранжиан КХД
8. Асимптотическая свобода, конфайнмент
9. Модели адронов
10. Экзотические адроны
11. Жесткие процессы
12. Спиновая структура нуклона
13. Струи
14. Множественные процессы
15. Реджистика
16. Кварк-глюонная плазма

8-й семестр. Стандартная модель:

1. Структура слабых взаимодействий при низких энергиях, несохранение четности
2. Распад мюона
3. Распад пиона
4. β -распад нейтрона
5. Распады каонов.
6. Нейтральные каоны
7. Несохранение СР
8. τ -лептон
9. Распады тяжелых кварков
10. Несохранение СР-четности в распадах тяжелых кварков
11. Нейтринные взаимодействия
12. Осцилляции нейтрино
13. Механизм Хиггса
14. Лагранжиан стандартной модели
15. Свойства Z, W
16. Свойства H бозонов

Перечень контрольных вопросов:

1. Каково сечение реакции $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^-$ при $\sqrt{s} = 0.77$ ГэВ ?
(воспользоваться тем, что масса ρ -мезона $m(\rho) = 0.77$ ГэВ, а $BR(\rho \rightarrow \pi^+ \pi^-) \approx 100\%$)
2. Пусть W^- - бозон рождается в протон-протонных взаимодействиях на коллайдере и распадается на мюон и нейтрино. Найти распределение по поперечному импульсу мюона относительно оси столкновения протонов (поперечный импульс W -бозонов считать пренебрежимо малым).
3. Перечислить квантовые числа JPC для $J < 4$, которыми может обладать система кварк-антикварк, и квантовые числа, которыми такая система обладать не может.
4. Найти генератор для группы двумерных вращений $SO(2)$
5. Сравнить сечения реакций
 $p + p \rightarrow W^+ + X$
 $p + p \rightarrow W^- + X$
Какое сечение больше ?
Как будет изменяться отношение сечений с ростом энергии столкновений.

Примеры контрольных заданий:

1. Вычислить формфактор для атома водорода в основном состоянии.
(плотность заряда в атоме водорода в основном состоянии равна
 $n(r) = 1/(\pi a^2) \cdot \exp(-2r/a)$)
2. Найти отношение сечений образования мюонных пар с массой ~ 15 ГэВ в реакциях $\pi^- p \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ / $\pi^+ p \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ при импульсе $p_\pi = 400$ ГэВ
3. Вычислить относительные вероятности распадов τ -лептона и время жизни:
 $\tau \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$
 $\tau \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$
 $\tau \rightarrow \text{адроны} \nu_\tau$
4. Поток мюонных нейтрино с энергией 20 ГэВ падает на железную мишень.
Оценить отношение сечений
 $\nu_\mu e^- \rightarrow \mu^- \nu_e$ / $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- X$
5. e^+e^- коллайдер имеет следующие параметры:
 - энергия пучков $E = MJ/\Psi/2$ ($MJ/\Psi = 3097$ МэВ)
 - разброс энергий электронов/позитронов в пучке $\sigma_E = 2$ МэВ;
 - светимость $L = 1033 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.Найти:
 - количество событий с образованием J/Ψ -частиц за год ($t = 10^7$ с) работы коллайдера.(Брэнчинг $J/\Psi \rightarrow e^+ e^-$ и ширину J/Ψ взять из таблиц PDG (<http://pdg.lbl.gov>))

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Масса W -бозона известна с точностью 20 МэВ. Какая из-за этого получается ошибка в угле Вайнберга? К какой относительной ошибке в сечении реакции $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ это приведет?

2. . Как изменится интенсивность процесса $p p \rightarrow H(\gamma\gamma) + X$ на БАК , если к трем существующим поколениям кварков и лептонов добавить еще одно, с характерной массой около 500 ГэВ

Билет 2.

1. Найти отношение вероятностей распада Z-бозона на $\nu\bar{\nu}$, $\mu^+\mu^-$, $c\bar{c}$, $b\bar{b}$

2. Пусть в эксперименте на e^+e^- коллайдере мы стоим в пике Z-бозона и измеряем зарядовую асимметрию образования различных кварков и лептонов. Найти отношение асимметрий $A(\mu^+\mu^-):A(b\bar{b}):A(c\bar{c})$

Билет 3.

1. Пучок протонов с энергией 1 ГэВ и мощностью 1 МВт падает на массивную мишень, в которой поглощаются (останавливаются) все продукты взаимодействия, кроме нейтрино.

На расстоянии 30 м от мишени расположен детектор массой 100 тонн.

Сколько событий взаимодействия нейтрино с нейтронами ядра с образованием электрона ($\nu e \rightarrow e^- p$) произойдет в этом детекторе за один год?

2. Оценить количество событий и точность измерения угла смешивания θ_{13} в эксперименте со следующими параметрами:

Источник антинейтрино – атомная станция мощностью 10 ГВт

Детектор – сцинтилляционный детектор массой 5 тонн

Расстояние от станции до детектора – 1,7 км

Билет 4.

1. Пусть в эксперименте на LHC зарегистрировано 100 событий H-бозона в канале $H \rightarrow 4$ лептона (e или μ) при пренебрежимо малом фоне. Пусть разрешение по импульсу лептона хорошо известно и составляет 2%. С какой статистической точностью будет измерена в этом эксперименте масса H-бозона и его ширина?

2. Указать основные каналы распада H-бозона для двух значений масс: $M_H=125$ GeV, $M_H=1000$ GeV

Оценить относительные вероятности распада по основным каналам ($M_H=125$ GeV, $M_H=1000$ GeV)

Оценить полную ширину для $M_H=125$ GeV, $M_H=1000$ GeV

Билет 5.

1. В водном черенковском детекторе СуперКамиоканде массой 22 килотонны солнечные нейтрино регистрируются по упругому рассеянию на электронах.

Вопросы:

- оценить зависимость эффективности регистрации нейтринных взаимодействий от энергии нейтрино;
- найти (оценить) угловое распределение электронов;
- оценить поток солнечных нейтрино на поверхности земли ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) с энергией выше пороговой, если за 1500 суток в детекторе зарегистрировано 22 000 событий.

2. Каково сечение реакции $e^+ e^- \rightarrow$ адроны при $\sqrt{s} = 30$ ГэВ

Найти относительные вероятности реакций

$e^+ e^- \rightarrow$ легкие ($u, d; \bar{u}, \bar{d}$) кварки

$e^+ e^- \rightarrow$ странные ($s; \bar{s}$) кварки

$e^+ e^- \rightarrow$ чармованные ($c; \bar{c}$) кварки

$e^+ e^- \rightarrow$ прелестные ($b; \bar{b}$) кварки

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

Прием экзамена проводится по билетам. В каждом билете представлено два задания. Обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.