

**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**

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

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Ю.Г. Куденко, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
28.03.2025

Аннотация

Курс лекций «Физика нейтрино» включает в себя следующие основные разделы.

Предсказание и открытие нейтрино. Обнаружение мюонного нейтрино, измерение спиральности нейтрино, открытие нарушения пространственной четности в слабых взаимодействиях. Будет рассмотрена физика слабых взаимодействий, V-A теория, фундаментальные дискретные симметрии C, P, T, CP и CPT. Обсуждается теория Вайнберга-Салама (объединение электромагнитных и слабых взаимодействий) и свойства нейтрино в рамках Стандартной Модели. Рассматривается открытие нейтральных токов и промежуточных бозонов.

Значительное внимание уделено осцилляциям нейтрино. Изложена идея Б.М. Понтекорво и экспериментальное открытие нейтринных осцилляций в экспериментах с солнечными и атмосферными нейтрино. Детально рассмотрены ускорительные и реакторные осцилляционные эксперименты, измерение угла смешивания θ_{13} и поиск CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Представлена феноменология нейтринных осцилляций в вакууме и в веществе. Излагаются дальнейшие перспективы осцилляционных экспериментов следующего поколения.

Рассмотрены эксперименты по прямому измерению массы нейтрино в бета распаде трития. Представлены ограничения на суммарную массу нейтрино из космологических данных. Обсуждается природа нейтрино: Майорановские или Дираковские частицы. Рассмотрены эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета распада и представлены результаты по исследованию свойств нейтрино.

Также рассмотрены нейтринные аномалии: указания на существования стерильных нейтрино, полученные в ускорительных, реакторных радиохимических экспериментах. Обсуждаются последние экспериментальные результаты по поиску легких и тяжелых стерильных нейтрино. Рассматривается нейтринная астрофизика высоких энергий, астрофизические источники нейтрино, космогенные нейтрино, аннигиляция темной материи. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE и ANTARES.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Курс лекций знакомит студента с основными теоретическими положениями, методами, экспериментальными установками и результатами в области нейтринной физики. Он создает необходимую базу для понимания и дальнейшего более глубокого изучения этой области науки и возможности научной работы в нейтринной физике.

Задачи дисциплины

- формирование знаний по современной физике нейтрино и экспериментам в этой области;
- формирование знаний по постановке нейтринных экспериментов на реакторах, ускорителях и космических источниках.
- формирование знаний по основным результатам, полученным в нейтринных экспериментах и проблемам, требующим решения.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- содержание курса «Физика нейтрино»
- слабые взаимодействия, свойства нейтрино, нарушение фундаментальных симметрий
- нейтринные детекторы и методы регистрации нейтрино
- естественные и искусственные источники нейтрино
- феноменологию осцилляций нейтрино
- постановку современных экспериментов в области нейтринной физики;
- планируемые эксперименты в нейтринной физике и методику анализа данных в этих экспериментах, получение результатов;
- основные экспериментальные результаты, полученные в области нейтринной физики.

уметь:

- проводить моделирование и оценку чувствительности осцилляционных экспериментов
- интерпретировать экспериментальные результаты в области физики нейтрино
- получать параметры нейтринных осцилляций с использованием методов статистического анализа

владеть:

- методикой анализа данных, получаемых в нейтринных экспериментах
- различными методами детектирования нейтрино в широком диапазоне энергий

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение Р-четности	2	2		3
2	Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных нейтрино. Спиральность нейтрино	2	2		3
3	V-A теория. Промежуточные бозоны. Нейтральные токи	2	2		3
4	Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино	2	2		3
5	Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино	2	2		3
6	Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе	2	2		3
7	Ускорительные эксперименты с длинной базой	2	2		3
8	Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах	2	2		3
9	Измерение угла смешивания θ_{13}	2	2		3
10	Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях	2	2		3
11	Прямое измерение массы нейтрино. Модель качелей	2	2		3
12	Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада	2	2		3
13	Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино	2	2		3
14	Нейтринная астрофизика	2	2		3
15	Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение	2	2		3
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	135 час., 3 зач.ед.
--------------------	---------------------

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение. Слабые взаимодействия. Гипотеза нейтрино. Фундаментальные симметрии. Нарушение Р-четности

Введение в курс нейтринной физики. Краткое изложение физики слабых взаимодействий. Изложение Гипотезы В.Паули о существовании нейтрино. Изложение фундаментальных дискретных С,Р,Т, СР, СРТ симметрий. Гипотеза о нарушении пространственной четности и экспериментальное обнаружение в эксперименте Ву.

2. Открытие нейтрино в реакторном эксперименте. Открытие мюонных нейтрино. Спиральность нейтрино

Регистрация нейтрино в реакторном эксперименте Рейнеса и Коуэна. Открытие мюонных нейтрино в ускорительном эксперименте в БНЛ. Понятие спиральности нейтрино и экспериментальное измерение спиральности в эксперименте Гольдхабер.

3. V-A теория. Промежуточные бозоны. Нейтральные токи

V-A теория слабого взаимодействия. Гипотеза промежуточных векторных бозонов, объединение электромагнитного и слабого взаимодействия. Экспериментальное обнаружение нейтральных токов. Открытие W и Z бозонов в экспериментах в ЦЕРН.

4. Стандартная солнечная модель. Детектирование солнечных нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино

Описание Стандартной Солнечной модели. Поток солнечных нейтрино на Земле. Обнаружение дефицита солнечных нейтрино в эксперименте Дэвиса, в галлиевых экспериментах и эксперименте Камиоканде. Гипотеза Б.М.Понтекорво об осцилляциях нейтрино. Открытие осцилляций солнечных нейтрино в эксперименте SNO.

5. Атмосферные нейтрино. Детектор СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино

Регистрация атмосферных нейтрино в подземных экспериментах. «Атмосферная аномалия». Водные черенковские детекторы Камиоканде и СуперКамиоканде. Открытие осцилляций атмосферных нейтрино в эксперименте СуперКамиоканде.

6. Феноменология нейтринных осцилляций. Осцилляций нейтрино в вакууме и в веществе

Феноменология нейтринных осцилляций. Рассмотрение осцилляций двух типов нейтрино. Получение выражений для вероятности осцилляций. Матрица смешивания Понтекорво-Маки-Накагава-Саката для трех типов нейтрино. Параметры нейтринных осцилляций.

7. Ускорительные эксперименты с длинной базой

Исследование осцилляций нейтрино в ускорительных экспериментах с длинной базой. Эксперименты K2K, MINOS, OPERA. Смещенные от оси пучки нейтрино. Эксперименты с длинной базой второго поколения T2K и NOvA. Открытие осцилляцию мюонных нейтрино в электронные.

8. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах

Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах. Метод детектирования реакторных антинейтрино. Эксперимент с длинной базой КамЛанд. Измерение осцилляционных параметров в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz.

9. Измерение угла смешивания θ_{13}

Измерение угла смешивания θ_{13} в ускорительных и реакторных экспериментах. Перспективы для измерения иерархии масс нейтрино и поиска CP нарушения в лептонном секторе Стандартной Модели. Структура PMNS матрицы смешивания.

10. Поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях

Поиск нарушения CP симметрии в нейтринных осцилляциях. Методика поиска CP нечетной асимметрии при измерении осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино в эксперименте T2K. Использование реакторных данных для повышения чувствительности эксперимента. Первое указание на CP нарушение в эксперименте T2K. Результаты эксперимента NOvA.

11. Прямое измерение массы нейтрино. Модель качелей

Прямое измерение массы электронного нейтрино в бета распаде трития. Эксперименты Троицк-масс и Майнц. Метод магнитной адиабатической коллимации. Эксперимент КАТРИН. Ограничение на эффективную массу электронного нейтрино.

12. Природа нейтрино. Поиск безнейтринного двойного бета распада

Нейтрино Майорановская или Дираковская частица. Физика безнейтринного двойного бета распада. Ядерные матричные элементы. Экспериментальные методы поиска безнейтринного двойного бета распада в германиевых, ксеноновых и криогенных детекторах. Экспериментальные ограничения на эффективную массу нейтрино, полученные в экспериментах КамЛанд-Zen, GERDA. Ближайшие перспективы.

13. Нейтрино и космология. Реликтовые нейтрино. Стерильные нейтрино

Нейтрино и космология. Ограничения на сумму масс нейтрино из космологических данных. Реликтовые нейтрино. Нейтрино от взрывов сверхновых. Стерильные нейтрино. Аномалия LSND, реакторная и галлиевая аномалия. Ограничения на параметры легких стерильных нейтрино из реакторных, ускорительных и астрофизических экспериментов.

14. Нейтринная астрофизика

Нейтринная астрофизика высоких энергий. Байкальский подводный нейтринный телескоп, эксперименты ICECUBE, ANTARES. Астрофизические источники нейтрино.

15. Планируемые нейтринные эксперименты. Заключение

Рассматриваются нейтринные эксперименты следующего поколения ГиперКамиоканде и DUNE. Основными целями этих экспериментов являются поиск CP нарушения в нейтринных осцилляциях, определение иерархии масс нейтрино, поиск распада протона, регистрация реликтовых нейтрино от сверхновых. Будет рассмотрена экспериментальная методика и чувствительность этих экспериментов к различным физическим процессам. В заключении будут изложены основные итоги курса и проанализированы основные фундаментальные результаты, полученные в нейтринной физике.

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

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лептоны и кварки [Текст] / Л. Б. Окунь. — 7-е изд. — [Научное изд.] — М. : ЛЕНАНД, 2015. — 352 с.
2. Слабые взаимодействия лептонов и кварков [Текст]/Ю. Комминс, Ф. Буксбаум, пер. с англ. А. В. Беркова, -М., Энергоатомиздат, 1987
3. Физика массивных нейтрино [Текст] = Physics of massive neutrinos/Ф. Боум, П. Фогель, -М., Мир, 1990
4. K.Winter. Neutrino physics. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. 2008.
5. С.М.Биленький. Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов, Москва, Энергоиздат, 1981.

Дополнительная литература

1. Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Шмидт А., "Неускорительная физика элементарных частиц", Пер. с нем., Москва, Наука, Физматлит, 1997.
2. Дж.Бакал "Нейтринная астрофизика", "Мир", Москва, 1993.
3. М.Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики. Успехи физических наук, т.174 (2004) с.418-426.
4. K.Zuber. Neutrino physics, CRC Press, 2012.
5. C.Giunti and C.W.Kim. Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
6. Герштейн С.С., Кузнецов Е.П., Рябов В.А. Природа массы нейтрино и нейтринные осцилляции. Успехи физических наук, т.167 (1997) с.811.
7. Биленький С.М. Массы нейтрино, смешивание и осцилляции нейтрино. Успехи физических наук, т.173 (2003) с.1137.
8. Куденко Ю.Г. Исследование нейтринных осцилляций в экспериментах с длинной базой. Успехи физических наук, т.181 (2011) с.569-594.

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

<https://www.hep.anl.gov/ndk/hypertext/> - информация по теории, экспериментам, проектам в области нейтринной физики
<http://www.nu.to.infn.it/> - информация о публикациях о нейтринной физике
<https://neutrino-history.in2p3.fr/> - информации о конференции по истории нейтринной физики
<https://arxiv.org/> - сайт электронных препринтов, включая основные публикации по нейтринной физике
<https://inspirehep.net/> - сайт-поисковик в области физики высоких энергий
<http://pdg.lbl.gov/> The Review of Particle Physics

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

Программы GEANT4, ROOT. Видеоконференции ZOOM, SKYPE

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 практическим занятиям, коллоквиумам, 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:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных взаимодействий и физики элементарных частиц
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	Ю.Г. Куденко, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-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-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика нейтрино» обучающийся должен:

знать:

- содержание курса «Физика нейтрино»
- слабые взаимодействия, свойства нейтрино, нарушение фундаментальных симметрий
- нейтринные детекторы и методы регистрации нейтрино
- естественные и искусственные источники нейтрино
- феноменологию осцилляций нейтрино
- постановку современных экспериментов в области нейтринной физики;
- планируемые эксперименты в нейтринной физике и методику анализа данных в этих экспериментах, получение результатов;
- основные экспериментальные результаты, полученные в области нейтринной физики.

уметь:

- проводить моделирование и оценку чувствительности осцилляционных экспериментов
- интерпретировать экспериментальные результаты в области физики нейтрино
- получать параметры нейтринных осцилляций с использованием методов статистического анализа

владеть:

- методикой анализа данных, получаемых в нейтринных экспериментах
- различными методами детектирования нейтрино в широком диапазоне энергий

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

Не предусмотрено.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Определить кинетическую энергию реликтовых нейтрино.
2. Возможны ли осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \text{anti-}\nu_\mu$?
3. Определить вероятность (branching ratio) распада $\pi^+ \rightarrow (e, \nu)$ decay. Сравнить с распадом $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$.
4. Показать, возможен или невозможен распад нейтрального пиона на нейтрино и антинейтрино, если масса нейтрино равна нулю.
5. Определить длину детектора нейтрино из железа, в котором вероятность взаимодействия нейтрино с энергией 1 ГэВ равна 10-8. Сечение взаимодействия нейтрино = 10^{-38} см².
6. Определить в лабораторной системе порог реакции $\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$.
7. Получить выражение для осцилляции двух типов нейтрино
8. В водных черенковских детекторах при регистрации электронных нейтрино с энергией около 1 ГэВ одним из основных источников фона являются нейтральные пионы, рожденные мюонными нейтрино через нейтральные токи. Получить кинематику распада нейтрального пиона на 2 фотона. Получить массу пиона из измерения двух фотонов. Показать, в каких случаях распад 0 может имитировать сигнал от одиночного электрона.
9. Получить выражение для осцилляций трех типов нейтрино в вакууме
10. Получить выражение для вероятности распада (branching ratio) $\pi^+ \rightarrow (e, \nu)$. Сравнить с вероятностью распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$.
11. Черенковский водный детектор используется для поиска распада протона. Основная мода $p \rightarrow e^+ + \pi^0$. Какие процессы с участием атмосферных нейтрино имитируют этот распад? Какие способы/методы используются для подавления фона атмосферных нейтрино?

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Измерение осцилляционных параметров в ускорительных экспериментах K2K и MINOS.

2. Получить выражение для CP нечетной асимметрии $A_{CP} = [P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)] / [P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e)]$ в вакууме, используя полное выражение для осцилляций трех типов нейтрино. Получить численное значение асимметрии для энергии мюонных нейтрино 600 МВ и базы 300 км. Осцилляционные параметры: $\theta_{12} = 34$ град, $\theta_{23} = 45$ град, $\theta_{13} = 9$ град, $\Delta m^2_{12} = 7.5 \times 10^{-5}$ эВ², $\Delta m^2_{23} = 2.4 \times 10^{-3}$ эВ².

Билет 2.

1. Эксперимент СуперКамиоканде. Открытие осцилляции атмосферных нейтрино.
2. В случае распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ получить зависимость энергии нейтрино (лаб система) от угла θ между направлением пиона и нейтрино. Специально рассмотреть случай малого угла θ . Построить графики зависимости энергии нейтрино от энергии пиона для углов 0, 1, 2, 3 градуса в диапазоне энергий пионов от 0 до 20 ГэВ.

Критерии оценивания

- 10 полностью решены все задачи задания, полный ответ на экзаменационный билет и дополнительные вопросы
- 9 решены все задачи задания, возможны затруднения в 1-2 задачах, самостоятельно устраняемые студентом в процессе обсуждения; полный ответ на экзаменационный билет и дополнительные вопросы, возможны затруднения в ответе на дополнительные вопросы, самостоятельно устраняемые студентом
- 8 решены все задачи задания, возможны затруднения в 1-2 задачах, устраняемые студентом в процессе обсуждения после подсказки преподавателя; полный ответ на экзаменационный билет и дополнительные вопросы, возможны затруднения в ответе на дополнительные вопросы
- 7 решены все задачи задания, кроме 1-2; возможны затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые после подсказки преподавателя
- 6 решены все задачи задания, кроме 2-3; возможны затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые после подсказки преподавателя
- 5 решены все задачи задания, кроме 2-3; затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые только с серьезной помощью преподавателя
- 4 решено более 50% задач задания; затруднения в ответе на вопросы экзаменационного билета, устраняемые только с серьезной помощью преподавателя
- 3 решено более 50% задач задания; неспособность ответить на вопросы билета, однако ответ на дополнительные вопросы из списка экзаменационных
- 2 решено менее 50% задач задания либо неспособность ответить на вопросы билета и на дополнительные вопросы из списка экзаменационных
- 1 решено менее 50% задач задания либо неспособность ответить на вопросы билета и на дополнительные вопросы из списка экзаменационных

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 1 час времени на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также любой литературой и вычислительной техникой.