

**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:	Элементы нейтринной физики и астрофизики
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: В.А. Наумов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
25.05.2020

Аннотация

Данный курс содержит основы современной нейтринной физики и астрофизики. В нем рассматриваются основы теории слабых взаимодействий и решения проблемы включения массы нейтрино в Стандартную модель, смешивание поколений, теория нейтринных осцилляций, методы детектирования нейтрино, механизмы образования нейтрино в атмосфере Земли, Солнце и других астрофизических источниках. Курс является углубленным и предназначен для студентов, специализирующихся в области теоретической физики.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области современной нейтринной физики и астрофизики, изучение основ теории слабых взаимодействий и решения проблемы включения массы нейтрино в Стандартную модель, смешивания поколений, теории нейтринных осцилляций, методов детектирования нейтрино, механизмов образования нейтрино в атмосфере Земли, Солнце и других астрофизических источниках, а также приобретение базовых навыков самостоятельной научно-исследовательской работы.

Задачи дисциплины

- ☐ формирование базовых знаний в области теоретической и экспериментальной физики элементарных частиц и астрофизики;
- ☐ обучение студентов современным методам теоретического описания различных процессов слабого взаимодействия;
- ☐ формирование подходов к выполнению студентами исследований в области теоретической физики в рамках выпускных работ на степень магистра.

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 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
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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- ☐ лагранжиан Стандартной Модели (СМ), механизм Хиггса;
- ☐ общую структуру дираковского и майорановского массовых членов в лептонном секторе СМ;
- ☐ алгоритм Мурнагана для параметризации вакуумной матрицы смешивания;
- ☐ качельный механизм генерации масс нейтрино (“see-saw”), классификацию различных типов see-saw (I, II, III, обратный, радиационный, двойной, квадратичный), классификацию текстур массовой матрицы, 2- и 3-максимальное смешивание;
- ☐ квантовомеханическую теорию нейтринных осцилляций, МСВ механизм, влияние эффекта неупругих взаимодействий нейтрино с веществом на вероятности осцилляций, основы квантовополевого описания вакуумных нейтринных осцилляций;
- ☐ вершины взаимодействия нейтрино с лептонами и кварками;
- ☐ основы партонной модели, понятие о партонных функциях распределения;
- ☐ особенности описания процессов взаимодействий нейтрино за счет слабых заряженных и нейтральных токов (форм-факторы нуклона, структурные функции), общую структуру адронных токов;
- ☐ основные ядерные реакции горения водорода в звездах (pp-цепочка, CNO-би-цикл), процессы образования нейтрино в Солнце, основные экспериментальные методы регистрации солнечных нейтрино (радиохимические, черенковские), результаты важнейших экспериментов по регистрации СН (Cl-Ar детектор в Хоумстэйке, Ga-Ge детекторы SAGE, GALLEX, GNO, водно-черенковские детекторы Super-Kamiokande и SNO);
- ☐ основные реакции генерации мюонов и (анти)нейтрино при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли, особенности развития ШАЛ (геомагнитные и метеорологические эффекты, влияние солнечной активности), методы регистрации атмосферных и астрофизических нейтрино (черенковские, акустические, радио), основные параметры современных глубоководных и подледных нейтринных телескопов (БНТ, AMAND, IceCube, NEMO, NESTOR, ANTARES, KM3NET);
- ☐ основные процессы образования антинейтрино в ядерных реакторах и методы регистрации реакторных и геофизических антинейтрино, результаты экспериментов KamLAND, Daya Bay, Reno и др.);
- ☐ основы физики коллапса и энерговыделения на конечной стадии эволюции массивных звезд, основные процессы образования (анти)нейтрино при взрывах сверхновых, pp- pp-механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках (активные галактические ядра, релятивистские струи), механизм образования космогенных (ГЗК) нейтрино;
- ☐ космологические ограничения на массы нейтрино.

уметь:

- ☐ эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики элементарных частиц.

владеть:

- ☐ техникой расчета ширин слабых распадов элементарных частиц и сечений взаимодействия нейтрино с лептонами и нуклонами;
- ☐ методами диагонализации массовой матрицы в лагранжиане СМ;
- ☐ методами решения уравнения Вольфенштейна для описания нейтринных осцилляций в веществе;
- ☐ методом учета неупругих взаимодействий нейтрино в анализе нейтринных осцилляций в поглощающих астрофизических средах;
- ☐ качественными методами оценки потоков (анти)нейтрино от астрофизических источников и космических лучей.

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 (часть I).	2			2

2	Введение (часть II).	2			2
3	Обзорная часть: реликтовые, солнечные нейтрино.	2			2
4	Обзорная часть: геонейтрино, атмосферные и астрофизические нейтрино, нейтрино и космология.	2			2
5	Основные процессы взаимодействия нейтрино с веществом.	2			2
6	Стандартная Модель и проблема массы нейтрино.	2			2
7	Квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций в вакууме.	2			2
8	Квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций в веществе.	2			2
9	Квантовополевая теория нейтринных осцилляций в вакууме.	2			2
10	Солнечные нейтрино.	4			4
11	Эксперименты по регистрации солнечных нейтрино, геонейтрино и антинейтрино от ядерных реакторов.	4			4
12	Атмосферные мюонные нейтрино.	2			2
13	Астрофизические и космогенные нейтрино.	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение (часть I).

Вопросы для разминки. Краткий обзор современных представлений о роли нейтрино в физике элементарных частиц, ядерной физике, астрофизике, космологии и геофизике.

2. Введение (часть II).

Исторические хроники: от проблемы непрерывного спектра бета-распада (1914) и гипотезы нейтрино (1932) до измерения углов смешивания и разностей квадратов масс нейтрино.

3. Обзорная часть: реликтовые, солнечные нейтрино.

Основные теоретические и экспериментальные факты о плотности нейтрино от Большого Взрыва, процессах генерации нейтрино в звездах и потоках солнечных нейтрино.

4. Обзорная часть: геонейтрино, атмосферные и астрофизические нейтрино, нейтрино и космология.

Основные теоретические и экспериментальные факты о процессах образования нейтрино в атмосферах планет, астрофизических источниках (активные галактические ядра, квазары, релятивистские джеты, файерболы и т.д.), обзор основных методов извлечения данных о массе нейтрино из астрофизических и космологических данных.

5. Основные процессы взаимодействия нейтрино с веществом.

Основные понятия партонной модели, форм-факторы и структурные функции структура слабых адронных токов, сечения (квази)упругих, неупругих эксклюзивных и глубоконеупругих взаимодействия (анти)нейтрино с нуклонами и ядрами.

6. Стандартная Модель и проблема массы нейтрино.

Лагранжиан Стандартной Модели, флейворный и массовый базисы, киральные компоненты, дираковская и майорановская массовые матрицы, See -Saw механизм.

7. Квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций в вакууме.

Вывод основной формулы для вероятностей выживания и флейворных переходов. Экспериментальные данные о параметрах смешивания и массах нейтрино. Трудности стандартной теории.

8. Квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций в веществе.

Когерентное взаимодействие нейтрино с веществом, показатель преломления и эффективный потенциал, вывод и методы решения уравнения Вольфенштейна, резонансные условия и МСВ механизм.

9. Квантовополевая теория нейтринных осцилляций в вакууме.

Ковариантная теория волновых пакетов, интегралы перекрытия, макроскопические диаграммы Фейнмана, расчет амплитуды перехода, квадрирование амплитуды и макроскопическое усреднение, анализ off-shell и on -shell режимов, эффекты декогерентности, сравнение со стандартным квантовомеханическим подходом.

10. Солнечные нейтрино.

Физика строения звезд. Ядерные реакции в Солнце, pp -цепочка и CNO -би -цикл, химический состав Солнца, данные гелиосейсмологии, оценки спектров и потоков солнечных нейтрино, трудности теории и перспективы.

11. Эксперименты по регистрации солнечных нейтрино, геонейтрино и антинейтрино от ядерных реакторов.

Радиохимический и черенковский методы регистрации солнечных нейтрино (CH), основные эксперименты по регистрации CH (Cl-Ar детектор в Хоумстэйке, GaGe детекторы SAGE, GALLEX, GNO, водночеренковские детекторы Super-Kamiokande и SNO).

12. Атмосферные мюонные нейтрино.

Сведения о химическом составе и энергетических спектрах первичных и анизотропии галактических космических лучей (КЛ), вторичные КЛ и ШАЛ, основные реакции процессы генерации лептонов в атмосфере, геомагнитные и метеорологические эффекты, влияние солнечной активности, обзор различных моделей и экспериментов по регистрации АН.

13. Астрофизические и космогенные нейтрино.

Физика сверхновых, гипотетические источники и механизмы образования нейтрино, проблема КЛ сверхвысоких энергий, ГЗК эффект, космогенные нейтрино, физика нейтринных телескопов.

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

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Zhi-Zhong Xing and Shun Zhou, Neutrinos in Particle Physics, Astronomy and Cosmology. Advanced Topics in Science and Technology in China (Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011).
2. Samoil-M.~Bilenky, Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos, Lect. Not. Phys 817 (2010).
3. Mats Lindroos and Mauro Mezzetto, Beta Beams. Neutrino Beams (Imperial College Press, London, 2010).
4. Donald H. Perkins, Particle Astrophysics. Second Edition. Oxford Master Series in Particle Physics, Astrophysics, and Cosmology (Oxford University Press, 2009).
5. Carlo Giunti and Chung W. Kim, Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics (Oxford University Press Inc., New York, 2007).
6. Claus Grupen, Astroparticle Physics (Springer, 2005).
7. Kai Zuber, Neutrino Physics. Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation (Taylor & Francis, 2004).
8. Rabindra N. Mohapatra and Palash B. Pal, Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics. Third Edition. World Scientific Lecture Notes in Physics, Vol. 72 (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004).
9. Masataka Fukugita and Tsutomu Yanagida, Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics. Texts and Monographs in Physics (Springer-Verlag, 2003).
10. H. V. Klapdor-Kleingrothaus and K. Zuber, Particle Astrophysics. Revised Edition (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000); Г. В. Клапдор-Клайнротхаус, К. Цюбер, Астрофизика элементарных частиц (М.: Редакция журнала Успехи физических наук, 2000) (перевод первого немецкого издания 1997 года).
11. H. V. Klapdor-Kleingrothaus and A. Staudt, Non-accelerator Particle Physics (Institute of Physics Publishing Ltd., 1995); Г. Клапдор-Клайнротхаус, А. Штаудт, Неускорительная физика элементарных частиц (М.: Наука, 1997).

Дополнительная литература

1. Felix Boehm and Petr Vogel, Physics of Massive Neutrinos. Second Edition (Cambridge University Press, 1992); Феликс Боум, Петр Фогель, Физика массивных нейтрино (М.: Мир, 1990) (Перевод первого английского издания 1987 года).
2. John N. Bahcall, Neutrino Astrophysics (Cambridge University Press, Cambridge, 1989); Дж. Бакал, Нейтринная астрофизика (М.: Мир, 1993).
3. Самоил М. Биленький, Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов (М.: Энергоиздат, 1981).

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

Информационные ресурсы: Доступные через интернет журналы по физике элементарных частиц (Теоретическая и математическая физика, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Physical Review D, Reviews of Modern Physics), а также учебное пособие и сборник задач, разработанные для данного курса.

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

Необходимое программное обеспечение Adobe Acrobat Reader.

Обеспечение самостоятельной работы: доступ к библиотеке и базам данных по журналам Теоретическая и математическая физика, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Physical Review D, Reviews of Modern Physics.

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:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

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

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

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 и прикладных проблем физики микромира
курс:	1
квалификация:	магистр

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

Разработчик: В.А. Наумов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

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
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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Элементы нейтринной физики и астрофизики» обучающийся должен:

знать:

- ☐ лагранжиан Стандартной Модели (СМ), механизм Хиггса;
- ☐ общую структуру дираковского и майорановского массовых членов в лептонном секторе СМ;
- ☐ алгоритм Мурнагана для параметризации вакуумной матрицы смешивания;
- ☐ качельный механизм генерации масс нейтрино (“see-saw”), классификацию различных типов see-saw (I, II, III, обратный, радиационный, двойной, квадратичный), классификацию текстур массовой матрицы, 2- и 3-максимальное смешивание;
- ☐ квантовомеханическую теорию нейтринных осцилляций, МСВ механизм, влияние эффекта неупругих взаимодействий нейтрино с веществом на вероятности осцилляций, основы квантовополевого описания вакуумных нейтринных осцилляций;
- ☐ вершины взаимодействия нейтрино с лептонами и кварками;
- ☐ основы партонной модели, понятие о партонных функциях распределения;
- ☐ особенности описания процессов взаимодействий нейтрино за счет слабых заряженных и нейтральных токов (форм-факторы нуклона, структурные функции), общую структуру адронных токов;
- ☐ основные ядерные реакции горения водорода в звездах (pp-цепочка, CNO-би-цикл), процессы образования нейтрино в Солнце, основные экспериментальные методы регистрации солнечных нейтрино (радиохимические, черенковские), результаты важнейших экспериментов по регистрации СН (Cl-Ar детектор в Хоумстэйке, Ga-Ge детекторы SAGE, GALLEX, GNO, водно-черенковские детекторы Super-Kamiokande и SNO);
- ☐ основные реакции генерации мюонов и (анти)нейтрино при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли, особенности развития ШАЛ (геомагнитные и метеорологические эффекты, влияние солнечной активности), методы регистрации атмосферных и астрофизических нейтрино (черенковские, акустические, радио), основные параметры современных глубоководных и подледных нейтринных телескопов (БНТ, AMAND, IceCube, NEMO, NESTOR, ANTARES, KM3NET);
- ☐ основные процессы образования антинейтрино в ядерных реакторах и методы регистрации реакторных и геофизических антинейтрино, результаты экспериментов KamLAND, Daya Bay, Reno и др.);
- ☐ основы физики коллапса и энерговыделения на конечной стадии эволюции массивных звезд, основные процессы образования (анти)нейтрино при взрывах сверхновых, pp- и p $\bar{\nu}$ -механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках (активные галактические ядра, релятивистские струи), механизм образования космогенных (ГЗК) нейтрино;
- ☐ космологические ограничения на массы нейтрино.

уметь:

- ☐ эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики элементарных частиц.

владеть:

- ☐ техникой расчета ширины слабых распадов элементарных частиц и сечений взаимодействия нейтрино с лептонами и нуклонами;
- ☐ методами диагонализации массовой матрицы в лагранжиане СМ;
- ☐ методами решения уравнения Вольфенштейна для описания нейтринных осцилляций в веществе;
- ☐ методом учета неупругих взаимодействий нейтрино в анализе нейтринных осцилляций в поглощающих астрофизических средах;
- ☐ качественными методами оценки потоков (анти)нейтрино от астрофизических источников и космических лучей.

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

Темы курсовых, по которым студенты готовят доклады:

1. Основные ядерные реакции горения водорода в звездах (pp-цепочка, CNO-би-цикл), процессы образования нейтрино в Солнце, основные экспериментальные методы регистрации солнечных нейтрино (радиохимические, черенковские).
2. Результаты важнейших экспериментов по регистрации СН (Cl-Ar детектор в Хоумстэйке, Ga-Ge детекторы SAGE, GALLEX, GNO, водно-черенковские детекторы Super-Kamiokande и SNO).

3. Основные реакции генерации мюонов и (анти)нейтрино при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли, особенности развития ШАЛ (геомагнитные и метеорологические эффекты, влияние солнечной активности), методы регистрации атмосферных и астрофизических нейтрино (черенковские, акустические, радио), основные параметры современных глубоководных и подледных нейтринных телескопов (БНТ, AMAND, IceCube, NEMO, NESTOR, ANTARES, KM3NET) .
4. Основные процессы образования антинейтрино в ядерных реакторах и методы регистрации реакторных и геофизических антинейтрино, результаты экспериментов KamLAND, Daya Bay, Reno и др.);
5. Физики коллапса массивной звезды, основные процессы образования (анти)нейтрино при взрывах сверхновых, pp- р $\bar{\nu}$ -механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках (активные галактические ядра, релятивистские струи), механизм образования космогенных нейтрино.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи экзамена в 9-ом семестре:

1. Лагранжиан Стандартной Модели (СМ), механизм Хиггса. Структура дираковского и майорановского массовых членов в лептонном секторе СМ. Алгоритм Мурнагана для параметризации вакуумной матрицы смешивания. Дираковская и майорановская массовые матрицы.
2. Качельный механизм генерации масс нейтрино ("see-saw"), классификация текстур массовой матрицы. Основные типы see-saw.
3. Квантовомеханическая теория нейтринных осцилляций, МСВ механизм, влияние эффекта неупругих взаимодействий нейтрино с веществом на вероятности осцилляций, основы квантовополевого описания вакуумных нейтринных осцилляций.
4. Взаимодействия нейтрино с лептонами и кварками. Партоновая модель и партоновые функции распределения. Методы описания процессов взаимодействий нейтрино за счет слабых заряженных и нейтральных токов (форм-факторы нуклона, структурные функции), общая структура слабых адронных токов.
5. Космологические ограничения на массы нейтрино.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Лагранжиан Стандартной Модели (СМ), механизм Хиггса. Структура дираковского и майорановского массовых членов в лептонном секторе СМ. Алгоритм Мурнагана для параметризации вакуумной матрицы смешивания. Дираковская и майорановская массовые матрицы.
2. Космологические ограничения на массы нейтрино.

Билет 2.

1. Качельный механизм генерации масс нейтрино ("see-saw"), классификация текстур массовой матрицы. Основные типы see-saw.
2. Физики коллапса массивной звезды, основные процессы образования (анти)нейтрино при взрывах сверхновых, pp- р $\bar{\nu}$ -механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках (активные галактические ядра, релятивистские струи), механизм образования космогенных нейтрино.

Критерии оценивания

Обучающемуся ставится оценка в соответствии с продемонстрированным уровнем подготовки; оценивание производится на усмотрения экзаменатора в соответствии с особенностями дисциплины и следующими критериями:

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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

При проведении оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.