



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «ИГУ»
Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев

«02» апреля 2025 г.



Рабочая программа дисциплины

Наименование дисциплины: Б1.В.08 Нейтринная астрофизика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная физика и физика Космоса

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета
Протокол №49 от «26» марта 2025 г.

Председатель


Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:
Протокол №6
От «24» марта 2025 г.

Зав. кафедрой


С.В. Ловцов

Иркутск 2025 г.

Содержание

I. Цели и задачи дисциплины.....	3
II. Место дисциплины в структуре ОПОП.....	3
III. Требования к результатам освоения дисциплины.....	3
IV. Содержание и структура дисциплины (модуля).....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	4
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.....	4
4.3. Содержание учебного материала.....	5
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	6
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС).....	7
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	8
4.5. Примерная тематика курсовых работ.....	8
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	8
а) список литературы.....	8
б) периодические издания.....	8
в) список авторских методических разработок.....	8
г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.....	8
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	9
VII. Образовательные технологии.....	9
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации.....	9
Приложение: фонд оценочных средств	

I. Цели и задачи дисциплины

Нейтринная астрофизика - сравнительно новый раздел астрофизики высоких энергий, открывающий новое окно в астрономии, расширяющей возможности исследования процессов в Галактике, удаленных галактиках и внегалактических объектах.

Цель курса «Нейтринная астрофизика» - изучение процессов в астрофизических объектах, в которых генерируются нейтрино в широком диапазоне энергий – от долей МэВ до сотен ПэВ, а также методов регистрации и детекторов нейтринного излучения. В результате изучения курса студент приобретает фундаментальные знания о процессах генерации нейтрино в астрофизических объектах, включая Солнце и Землю, познакомится с методами регистрации на Земле потоков космического излучения, приобретает навыки решения конкретных задач.

Задачи курса

Ввести студентов в круг проблем современной нейтринной астрофизики, дать представление о физических процессах в астрофизических источниках излучения высокой энергии, познакомиться с результатами измерений космического излучения, принципами работы крупномасштабных установок для детектирования астрофизических нейтрино, изучить специальные методы решения астрофизических задач. В рамках курса «Нейтринная астрофизика» студенты изучают основы устройства астрофизических объектов – потенциальных источников космических лучей, гамма-квантов и нейтрино, механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения.

II. Место дисциплины в структуре ОПОП

«Нейтринная астрофизика» относится к дисциплинам, формируемым участниками образовательного процесса. Курс «Нейтринная астрофизика» предназначен для подготовки бакалавра по профилю «Фундаментальная физика», способного работать в составе коллектива исследователей, проводящих эксперименты на гигантских установках по регистрации космического излучения. В результате изучения данной дисциплины специалист должен знать современное состояние исследований в области нейтринной астрофизики, знать принципы регистрации нейтрино в широком диапазоне энергий, иметь представление о детекторах астрофизических нейтрино, понимать более широкую постановку астрофизических задач.

Изучение курса предполагает наличие полученных на предыдущем уровне образования основных знаний, умений и компетенций по дисциплинам «Математический анализ», «Дифференциальные уравнения», «Интегральные уравнения и вариационное исчисление», «Методы математической физики», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Ядерная физика», «Слабые взаимодействия», «Астрофизика высоких энергий».

III. Требования к результатам освоения дисциплины

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Компетенция	ПК-1: Способен использовать специализированные знания в области физики и астрофизики для освоения профильных физических дисциплин.
Индикаторы компетенции	ИДК _{ПК 1.1} Способен проводить анализ научных данных, результатов экспериментов и наблюдений, используя специализированные знания в области физики и астрофизики. ИДК _{ПК1.2} Способен проводить анализ новых направлений исследований и опытно-конструкторских разработок в соответствующей области знаний.
Результаты обучения	Знает: основные закономерности процессов, происходящих в звездах главной последовательности, и вне ее, характер процессов генерации космического излучения высокой и сверхвысокой энергии; принципы его детектирования, основные методы решения задач

	нейтринной астрофизики, иметь представление о пакетах программ моделирования отклика детектора на излучение. Умеет: получать простые модельные оценки характеристик космического нейтринного излучения, и предполагаемой статистики событий в детекторе. Владеет: математическим аппаратом описания генерации излучения в источнике и прохождения излучения через вещество.
--	--

IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа, в том числе 35 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов через ЭИОС факультета. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку не отводится часов.

Форма промежуточной аттестации: зачет.

4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов

№ п/п	Раз- дел дис- ци- пли- ны/ темы	С е м е с т р	Вс е г о ча со в	Из них прак- тиче- ская под- го- товка обу- чаю- щих- ся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся , практиче- скую подготовку и трудоемкость (в часах)			Самостоя- тельная работа	Формы теку- щего контроля успеваемости; Форма проме- жуточной ат- тестации (по семе- страм)
					Контактная работа преподавателя с обучающи- мися				
					Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия	Консультации		
1	1-15	8	72	-	24	-	1	37	Практиче- ское зада- ние; вопро- сы к экзаме- ну
Итого:			72	-	24	-	1	37	

4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
8	Тема 1-15	Задание в виде задачи	После пройденных тем	37	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по

						теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.
--	--	--	--	--	--	--

4.3. Содержание учебного материала

Содержание разделов и тем дисциплины

Тема 1. Свойства нейтрино. Ограничения на массу, время жизни, заряд и магнитный момент. Нейтрино в Стандартной Модели. Понятие о дираковской и майорановской массе. Лептонные числа и гипотеза нейтринных осцилляций.

Тема 2. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. Структурные функции нуклона. Рассеяние нейтрино на кварках. Сечение νN -рассеяния в кварк-партонной модели. Поведение сечений с ростом энергии нейтрино, оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние.

Тема 3. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца. Результаты экспериментов Homestake, Kamiokande, Super-Kamiokande, SAGE, GALLEX, GNO, SNO, Borexino, MiniBooNE, T2K, J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), NOvA.

Тема 4. Нейтринные осцилляции в веществе, эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна. Конверсия нейтрино как решение проблемы солнечных нейтрино. Параметры смешивания солнечных нейтрино. Эксперименты с реакторными нейтрино.

Тема 5. Классификация вспышек сверхновых, общие представления о физических процессах, предшествующих вспышке сверхновой и сопровождающих вспышку СН.

Тема 6. Сверхновые типа II, динамика коллапса ядра массивной звезды. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.

Тема 7. Сверхновая СН 1987А. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987А, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса. Детекторы нейтрино от сверхновых: АСД, БПСТ, KamLand, LVD, S-K, SNO.

Тема 8. Нейтрино в астрофизике и космологии. Космологические ограничения на массу и число сортов нейтрино. Механизмы генерации нейтрино в сценарии “снизу-вверх”. Космогенные нейтрино: $\nu\gamma$ - и $\nu\nu$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с реликтовыми фотонами, с веществом и радиационными полями межзвездной среды.

Тема 9. Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий.

Тема 10. Дискретные источники космических лучей, гамма-квантов и нейтрино высоких энергий: Активные ядра галактик как источники нейтрино: модели и оценки потоков.

Тема 11. Источники космологических гамма-всплесков – гипотетические источники космических лучей, гамма-квантов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Модельно-независимые оценки потоков нейтрино от гамма-барстеров.

Тема 12. Генерация нейтрино в ядерно-каскадном процессе. Атмосферные нейтрино (от распадов π - и K -мезонов, мюонов, τ -лептонов, очарованных частиц) как фон для астрофизических

нейтрино и калибровка нейтринных телескопов. Атмосферные нейтрино, потоки прямых нейтрино.

Тема 13. Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество. Уравнение переноса нейтрино, поглощение и регенерация нейтрино. Эффект регенерации ν_μ за счет рождения и распада мюонов. Эффект регенерации ν_τ за счет рождения и распада τ -лептонов. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.

Тема 14. Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников: а) черенковские детекторы, б) радиодетектирование, в) акустические детекторы.

Тема 15. Нейтринные телескопы: HT200+, IceCube, ANTARES, Km3NeT, NEMO и др. Измерение спектров атмосферных нейтрино в экспериментах AMANDA, ANTARES и IceCube. Регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.

4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

Практических занятий не предусмотрено учебным планом.

4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Свойства нейтрино в Стандартной Модели	Внеаудиторная, решение задач	Свойства нейтрино, дираковская и майорановская масса, гипотеза нейтринных осцилляций	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; образовательные ресурсы Научной библиотекой ИГУ, сайта физического факультета ИГУ. база данных по физике inspirehep.net	3
2	Взаимодействие нейтрино с веществом		Вычисление сечений рассеяния нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партонной модели. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.		3
3	Нейтринное излучение Солнца		Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Вычисление энергетического спектра солнечных нейтрино		3
4	Нейтринное излучение сверхновых		Расчет спектров нейтрино от вспышки сверхновой		3
5	Нейтринные события в детекторе		Оценка числа событий в детекторах нейтрино от вспышек сверхновых		3
6	Свойства нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Ограничения на свойства нейтрино на основе детектирования нейтринного импульса от SN 1987A		3
7	Образование нейтронной звезды		Оценить радиуса нейтриносферы протонейтронной звезды R_ν . Каково соотношение между R_{ν_e} , R_{ν_μ} и R_{ν_τ} ?		3
8	Процесс переноса нейтрино в протонейтронной звезде		При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?		3
9	Механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом УВ в коллапсирующей звезде		Оценить передачу энергии от нейтрино за фронтом УВ, достаточную для сброса звездной оболочки		3

10	Космогенные p^+ - и $p\bar{p}$ -нейтрино		Космогенные нейтрино: p^+ - и $p\bar{p}$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с реликтовыми фотонами, с веществом и радиационными полями межзвездной среды		3
11	Галактические и внегалактические источники нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Получить оценку диффузных потоков нейтрино на Земле, используя данные об интенсивности космического гамма-излучения		4
12	Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино		Расчет углового усиления потоков атмосферных мюонных нейтрино		3

4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 4.3.2 студентам для более углубленного изучения дисциплины предлагаются задачи и упражнения по изучаемым разделам. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительный материал из рекомендованной литературы (п. 5) и решит предложенные задачи. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде домашних контрольных работ и опросов на практических занятиях.

4.5. Примерная тематика курсовых работ

Учебным планом написание курсовых работ не предусмотрено.

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) список литературы

Основная литература:

1. Синеговский, С.И. Космические нейтрино высоких энергий: учеб. пособие / С. И. Синеговский. - Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. - 61 с. (11)

Дополнительная литература:

1. Мурзин, В. С.. Астрофизика космических лучей: учеб. пособие для вузов / В. С. Мурзин. - Москва : Логос, 2007. - 487 с. - Режим доступа: ЭБС "Рукопт". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-98704-171-6

Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы:

1. <http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;
2. <http://inspirehep.net/>, <http://arxiv.org/> - Базы данных журнальных статей, материалов конференций и электронных препринтов по физике и астрофизике высоких энергий.

б) периодические издания

- нет

в) список авторских методических разработок

- Синеговский, С.И. Космические нейтрино высоких энергий: учеб. пособие / С. И. Синеговский. - Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. - 61 с. (11)

г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

<http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;

Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ:

- <https://isu.bibliotech.ru/> - ЭЧЗ «БиблиоТех»;
- <http://e.lanbook.com> - ЭБС «Издательство «Лань»;
- <http://rucont.ru> - ЭБС «Руконт» - межатраслевая научная библиотека, содержащая оцифрованные книги, периодические издания и отдельные статьи по всем отраслям знаний, а также аудио-, видео-, мультимедиа софт и многое другое;
- <http://ibooks.ru/> - ЭБС «Айбукс» - интернет ресурсы в свободном доступе.

VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Учебная аудитория с доской и мелом для проведения лекционных и практических занятий. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук.

Материалы курса (частично) доступны на сайте

http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/homepage/sinegovsky.html.

VII. Образовательные технологии

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

- **лекции**, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении задач;
- **практические занятия**, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения задач;
- **консультации** – еженедельно для всех желающих студентов;
- **самостоятельная внеаудиторная работа** направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине;
- **текущий контроль** работы студентов осуществляется через практические задания

VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

8.1. Оценочные средства для входного контроля

Для изучения данного курса студент должен владеть основами физики и теоретической физики, уметь пользоваться стандартными поисковыми сервисами сети Интернет. Входной контроль умений и знаний не проводится.

8.2. Оценочные средства текущего контроля — вопросы и задания на практических занятиях.

Примеры заданий

1. Вычислить сечение рассеяния нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партонной модели.
2. Рассчитать спектр нейтрино от вспышки сверхновой.
3. Оценить радиус нейтриносферы протонейтронной звезды R_ν . Каково соотношение между

R_{ν_e} , R_{ν_μ} и R_{ν_τ} ?

4. При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?
5. Оценить передачу энергии от нейтрино за фронтом УВ, достаточную для сброса звездной оболочки.

Примерный список устных вопросов для собеседования

1. Дираковская и майорановская масса нейтрино.
2. Лептонные числа и гипотеза нейтринных осцилляций.
2. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.
3. Основные термоядерные реакции на Солнце, в которых рождаются нейтрино.
4. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд.
5. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
6. Детектирование нейтринного всплеска от сверхновой SN 1987A – факты и гипотезы.
6. $\nu\gamma$ - и $\nu\nu$ -нейтрино в астрофизических источниках.
7. Активные ядра галактик и микроквазары как источники нейтрино.
8. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино.
9. Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество. Эффекты регенерации нейтрино.
10. Резонанс Глэшоу

8.3 Оценочные средства промежуточного контроля

Форма проведения промежуточной аттестации — зачет.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Свойства нейтрино, гипотеза нейтринных осцилляций.
2. Процессы рассеяния нейтрино с заряженными и нейтральными токами, оценки пробега нейтрино до взаимодействия.
3. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца
4. Общие представления о физических процессах, предшествующих вспышке сверхновой.
5. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд.
6. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
7. Детектирование нейтринного всплеска от сверхновой SN 1987A – факты и гипотезы.
8. $\nu\gamma$ - и $\nu\nu$ -нейтрино в астрофизических источниках.
9. Активные ядра галактик и микроквазары как источники нейтрино.
10. Генерация нейтрино в широком атмосферном ливне, расчеты и данные эксперимента.
11. Принципы и методы регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий от астрофизических источников.
12. Нейтринные телескопы, регистрация астрофизических нейтрино.

Пример тестовых заданий для проверки сформированности компетенций, указанных выше п.3:

1. Какой тип нейтрино обладает самой минимальной энергией:
 - а). геонейтрино
 - б). солнечные нейтрино
 - в). реликтовые нейтрино
2. Какой тип нейтрино или антинейтрино в большинстве случаев рождается в результате распада заряженного пи-мезона:
 - а). электронное

- б). мюонное
- в). тау-нейтрино

3. В каких взаимодействиях могут участвовать нейтрино:

- а). только в сильных
- б). в сильных и слабых
- в). в слабых

4. Матрица Понтекорво—Маки—Накагавы—Сакаты описывает:

- а). процесс смешивания кварков в Стандартной Модели
- б). процесс смешивания типов нейтрино
- в). такой матрицы не существует

5. Спиральностью частицы называется:

- а). способность частицы участвовать в осцилляциях
- б). число зарядовых состояний адрона
- в). проекция спина частицы на направление движения

Разработчики:



доцент кафедры теоретической физики

И.А. Перевалова

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики

«24» марта 2025 г.

Протокол №6

Зав. кафедрой



С.В. Ловцов

Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.