



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФГБОУ ВО «ИГУ»

Кафедра общей и космической физики



УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета

факультет

/ Н.М. Буднев

«14» апреля 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Наименование дисциплины (модуля): Б1.В.ДВ.02.01 Нейтринная астрофизика

Направление подготовки: 03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Астрофизика высоких энергий

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очная

Согласовано с УМК:

физического факультета

Протокол № 49 от «26» марта 2025

г.

Рекомендовано кафедрой:

общей и космической физики

Протокол № 8

от «24» марта 2025 г.

Зав.кафедрой д.ф.-м.н., профессор

 Паперный В.Л.

Председатель: д.ф.-м.н., профессор

 Н.М. Буднев

Иркутск 2025 г.

Содержание

I. Цели и задачи дисциплины (модуля)	3
II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО	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	5
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	5
4.3. Содержание учебного материала	6
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ	7
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)	8
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов	9
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)	9
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)	10
а) <i>перечень литературы</i>	10
б) <i>периодические издания</i>	10
в) <i>список авторских методических разработок</i>	10
г) <i>базы данных, информационно-справочные и поисковые системы</i>	10
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)	11
6.1. Учебно-лабораторное оборудование:	11
6.2. Программное обеспечение:	11
6.3. Технические и электронные средства:	11
VII. Образовательные технологии	11
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации	11

I. Цели и задачи дисциплины (модуля)

Нейтринная астрофизика - разделы астрофизики высоких энергий, открывающие новое окно в астрономии, расширяющие исследования высокоэнергетических процессов в Галактике и во внегалактических объектах.

Цель курса «Нейтринная астрофизика» : 1) изучение процессов в астрофизических объектах – вероятных источников нейтрино в широком диапазоне энергий (МэВ - ПэВ); 2) изучение методов регистрации нейтринного излучения высокой энергии и существующих детекторов космических нейтрино.

В результате изучения курса студент приобретает фундаментальные знания о процессах генерации нейтрино в астрофизических объектах (включая Солнце и Землю), знакомится с принципами и методами регистрации нейтринного излучения высоких и сверхвысоких энергий и работой современных крупномасштабных установок (нейтринных телескопов).

Задачи курса

Ввести студентов в круг проблем современной нейтринной астрофизики, дать представление о физических процессах в астрофизических источниках излучения высокой энергии, познакомить 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, и механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения.

II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Курс «Нейтринная астрофизика» предназначен для подготовки магистра по направлению 03.04.02 «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, принципы регистрации нейтрино в широком диапазоне энергий, иметь представление о детекторах астрофизических нейтрино, понимать широкую постановку астрофизических задач.

Изучение курса предполагает наличие полученных на предыдущем уровне образования основных знаний, умений и компетенций по дисциплинам «Дифференциальные уравнения», «Методы математической физики», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Ядерная физика», «Теория электрослабых взаимодействий», «Астрофизика высоких энергий».

III. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1: Способен использовать астрофизические методы в научных исследованиях.

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

Компетенция	Индикаторы компетенций	Результаты обучения
ПК-1	ИДК ПК.1.1 Способен использовать астрофизические методы для описания процессов в астрофизических исследова-	Знать: 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 астро-

	ниях	<p>физики, иметь представление о пакетах программ моделирования отклика детектора на излучение</p> <p>Уметь: получать простые модельные оценки характеристик космического нейтринного излучения, и предполагаемой статистики событий в детекторе.</p> <p>Владеть: математическим аппаратом описания генерации излучения в источнике и прохождения излучения через вещество</p>
--	------	--

IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов,

в том числе 58 часов контактной работы.

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

На практическую подготовку отводится 10 аудиторных часов (во время практических занятий).

Форма промежуточной аттестации: Экзамен.

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

№ п/п	Раздел дисциплины/тема	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися			Самостоятельная работа	
					Лекции	Семинарские/практические/лабораторные занятия	Консультации		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Темы 1-10	2	103	10	20	20	2	65	Практическое задание, опрос
	КОНТРОЛЬ		8						
	КСР		6						
	Экзамен		17						Вопросы к экзамену
Итого часов			108		20	20	2	33	

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.)		
2	Все темы	Решение задач	В течение семестра	22	Готовое решение задачи в письменном виде	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.
2	Подготовка к экзамену	Работа с учебной литературой	В течение семестра	11	Устный ответ	
Общий объем самостоятельной работы по дисциплине (час)				33		

4.3. Содержание учебного материала

Тема 1. Свойства нейтрино. Ограничения на массу, время жизни, заряд и магнитный момент. Нейтрино в Стандартной Модели, дираковские и майорановские нейтрино, гипотезы происхождения массы нейтрино. Лептонные числа и гипотеза нейтринных осцилляций.

Тема 2. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах, процессы с заряженными и нейтральными токами. Сечения νe и νN -рассеяния, оценка пробега нейтрино до взаимодействия. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние на ядрах.

Тема 3. Нейтринное излучение Солнца. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Результаты экспериментов с солнечными нейтрино.

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

Тема 5. Эволюция звезд, диаграмма Герцшпрунга-Ресселла. Классификация сверхновых. Сверхновые типа II, динамика коллапса ядра массивной звезды. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд. Нейтринное излучение от сверхновых.

Тема 6. Сверхновая SN 1987A. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса. Детекторы нейтрино от сверхновых: АСД, БПСТ, IMB, LVD, S-K, SNO.

Тема 7. Космологические ограничения на массу и число сортов нейтрино. Космогенные нейтрино: $\nu\mu$ - и $\nu\tau$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с реликтовыми фотонами, с веществом и радиационными полями межзвездной среды.

Тема 8. Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий. Ограничения на потоки из измерений космических лучей и гамма-излучения высокой энергии.

Тема 9. Активные галактические ядра (AGN) как источники нейтрино высоких энергий. Возможные механизмы генерация нейтрино в источниках космологических гамма-всплесков (GRB).

Тема 10. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино и калибровка нейтринных телескопов. Спектры и зенитно-угловые распределения атмосферных нейтрино.

Тема 11. Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество. Уравнение переноса нейтрино, поглощение и регенерация нейтрино. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.

Тема 12. Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников: а) радиохимические детекторы, б) сцинтиляционные детекторы, в) черенковские детекторы, г) радиодетектирование, в) акустические детекторы. Измерения спектров солнечных и атмосферных нейтрино.

Тема 13. Крупномасштабные подводные и подледные черенковские детекторы (нейтринные телескопы) – Baikal-GVD, ANTARES, IceCube, KM3NeT. Регистрация диффузного потока астрофизических нейтрино высоких энергий и нейтрино от локальных источников.

Тема 13. Методы обработки: трековые и ливневые события, HESE veto (contained events); отбор трековых событий в направлении снизу-вверх (through-going events). Восстановление спектра нейтрино из зарегистрированных событий, угловое распределение, оценки флейворного состава потока астрофизических нейтрино.

Тема 13. Проекты нейтринных телескопов следующего поколения, ожидаемая регистрация ГЗК-нейтрино и другие перспективы нейтринной астрофизики.

Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий

№ п/п	Наименование темы	Виды занятий в часах			
		Л	ПЗ	СРС	Всего
1	Нейтрино в Стандартной Модели	2	2	4	8
2	Нейтрино в Стандартной Модели. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах и ядрах	2	4	5	11
3	Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце.	2	2	4	8
4	Нейтринные осцилляции	2	2	4	8
5	Нейтринное излучение при вспышках сверхновых	2	2	4	8
6	Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A	2	2	2	6
7	Диффузные потоки нейтрино высоких энергий	2	2	2	6
8	Атмосферные нейтрино	2	2	2	6
9	Прохождение нейтрино высоких энергий через вещество	2	2	4	8
10	Нейтринные телескопы	2	-	2	4

4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1	Тема 1, 2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
2	Тема 3	Генерация нейтрино в термоядерных реакциях на Солнце. Результаты экспериментов по регистрации солнечных нейтрино	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
3	Тема 4	Нейтринные осцилляции в веществе, конверсия нейтрино, параметры смешивания солнечных нейтрино	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
4	Тема 5, 6	Гравитационный коллапс массивных звезд, вспышки	2	Задание на семинаре в	ПК-1

		сверхновых, нейтринное излучение, нейтринный импульс от SN 1987A		виде задачи	
5	Тема 7	Диффузные потоки нейтрино высоких энергий	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
6	Тема 8	Атмосферные нейтрино	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
7	Тема 9	Прохождение нейтрино высоких энергий через вещество	2	Контрольная работа	ПК-1

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	2
2	Взаимодействие нейтрино с веществом		Вычисление сечений рассеяния нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партоновой модели. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.		2
3	Нейтринное излучение Солнца		Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Вычисление энергетического спектра солнечных нейтрино		2
4	Нейтринное излучение сверхновых		Расчет спектров нейтрино от вспышки сверхновой		2
5	Нейтринные события в детекторе		Оценка числа событий в детекторах нейтрино от вспышек сверхновых		4
6	Свойства нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Ограничения на свойства нейтрино на основе детектирования нейтринного импульса от SN 1987A		2
7	Образование нейтронной звезды		Оценить радиуса нейтриносферы протонейтронной звезды R_ν . Каково соотношение между R_{ν_e} , R_{ν_μ} и R_{ν_τ} ?		2
8	Процесс переноса нейтрино в протонейтронной звезде		При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?		2
9	Механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом УВ в коллапсирующей звезде		Оценить передачу энергии от нейтрино за фронтом УВ, достаточную для сброса звездной оболочки		4

10	Космогенные $p\bar{p}$ - и pp -нейтрино		Космогенные нейтрино: $p\bar{p}$ - и pp -нейтрино от взаимодействия космических лучей с реликтовыми фотонами, с веществом и радиационными полями межзвездной среды		2
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 3.4.2 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 (проектов) (при наличии)

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ (проектов)

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) перечень литературы

основная литература

1. **Рэндалл, Лиза**. Достучаться до небес: научный взгляд на устройство Вселенной [Текст] : пер. с англ. / Л. Рэндалл. - М. : Альпина нон-фикшн, 2014. - 516 с. (2)
2. **Джаявардхана, Рэй**. Охотники за нейтрино. Захватывающая погоня за призрачной элементарной частицей [Текст] = Neutrino hunters. The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe : пер. с англ. / Р. Джаявардхана. - М. : Альпина нон-фикшн, 2015. - 253 с. (1)
3. **Зельдович, Яков Борисович** Избранные труды [Текст] : в 2 кн. / Я. Б. Зельдович ; Рос. акад. наук. - 2-е изд., репринт. - М. : Наука, 2014. - . - 24 см. - ISBN 978-5-02-039072-0. **Кн. 2** : Частицы, ядра, Вселенная. - 2014. - 463 с. (1)

дополнительная литература

1. **Горбунов, Д.С.** Введение в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория [Текст] : / Д. С. Горбунов, В. А. **Рубаков** ; Рос. акад. наук, Ин-т ядерных исслед. - М. : Красанд, 2010. - 555 с. (2)
2. **Синеговский, Сергей Иванович**. Космические нейтрино высоких энергий [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. И. **Синеговский**. - ЭВК. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. Доступ.
3. **Бисноватый-Коган, Геннадий Семенович**. Релятивистская астрофизика и физическая космология [Текст] : научное издание / Г. С. Бисноватый-Коган. - М. : Красанд, 2011. - 363 с. (2)

б) периодические издания

1. **А.А. Кочанов** и др. Характеристики потока нейтрино высоких энергий в атмосфере Земли // Солнечно-земная физика, 2015. -Т.1. -№ 4. - С.3.
2. **Sinegovskaya, T.S.** et al. High-energy neutrino fluxes and flavor ratio in the Earth's atmosphere // Phys. Rev. D, 2015. -V. 91. - 063011.

в) список авторских методических разработок

1. В системе образовательного портала ИГУ (<http://educa.isu.ru/>) размещены методические материалы и задания по данному курсу.

г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

- 1) [www.ni.com\russia](http://www.ni.com/russia)
- 2) <http://www.labview.ru/>
- 3) <http://library.isu.ru/ru>
- 4) ЭЧЗ «Библиотех» <https://isu.bibliotech.ru/>
- 5) ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com/>
- 6) ЭБС «Рукопт» <http://rucont.ru>
- 7) ЭБС «Айбукс» <http://ibooks.ru>
- 8) <http://inspirehep.net/>, <http://arxiv.org/>

VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

6.1. Учебно-лабораторное оборудование:

Учебная аудитория для проведения лекционных и практических занятий. При чтении курса используются компьютер и мультимедийное оборудование. Лекции, материалы курса доступны на сайте http://www.pd.isu.ru/sost/teor_phi/homepage/sinegovsky.html.

6.2. Программное обеспечение:

Стандартные сервисы глобальной сети Интернет, стандартные средства просмотра презентаций и научных публикаций в электронном виде.

6.3. Технические и электронные средства:

Во время лекционных занятий студентам демонстрируются на экране материалы курса в виде презентаций.

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 контрольные задания

VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации

8.1.1. 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.

8.1.2. Оценочные средства текущего контроля

Пример практического задания

ЗАДАНИЕ 1 Нейтринный всплеск при гравитационном коллапсе звезды

УСТНО:

1. Понятие радиуса нейтриносферы протонейтронной звезды R_ν . Каково соотношение между R_{ν_e} , R_{ν_μ} и R_{ν_τ} .
2. При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?
3. Принципиальный механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом ударной волны в коллапсирующей звезде.

ПИСЬМЕННО:

1. Оцените энергию, уносимую нейтрино в гравитационном коллапсе звезды, если в масса железного ядра (до коллапса) порядка солнечной массы, радиус

- ядра 3000 км, а радиус образующейся нейтронной звезды – 10 км.
2. Получите оценку пороговой энергии (в лаб. системе) для реакции рождения заряженного пиона протоном космических лучей на инфракрасном излучении. Какова максимальная энергия нейтрино от распада такого пиона?
 3. Оцените зенитно-угловое усиление потоков атмосферных нейтрино от распадов пи- и К-мезонов, считая атмосферу Земли сферической изотермической.

8.1.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Примерный список вопросов к экзамену:

1. Свойства нейтрино: тип, масса, лептонные числа, осцилляции.
2. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. Сечение νN -рассеяния в кварк-партонной модели. Оценки свободного пробега нейтрино.
3. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца.
4. Общие представления о физических процессах, предшествующих вспышке сверхновой и сопровождающих ее.
5. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
6. Сверхновая SN 1987A. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A.
7. Механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках и в МЗС.
8. Активные ядра галактик и микроквазары как источники нейтрино: модели и оценки потоков.
9. Космологические гамма-всплески – гипотетические источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, модели и оценки потоков нейтрино.
10. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино, потоки прямых нейтрино.
11. Уравнение переноса нейтрино в веществе, поглощение и регенерация нейтрино. Эффект регенерации за счет рождения и распада мюонов. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.
12. Принципы регистрации нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. Нейтринные телескопы: HT200+, IceCube, ANTARES.

Разработчики:

профессор, д.ф.-м.н.

С.И. Синеговский
(инициалы, фамилия)

доцент, к.ф.-м.н.
(занимаемая должность)

И.А., Перевалова
(инициалы, фамилия)

Программа рассмотрена на заседании кафедры общей и космической физики ИГУ
« 24 » марта 2025 г.

Протокол № 8, зав. кафедрой  В.Л. Паперный

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