



**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ФГБОУ ВО «ИГУ»  
**Кафедра теоретической физики**

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев

«22» апреля 2020 г.



**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.04.02 Нейтринная астрофизика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Тип образовательной программы: Академический бакалавриат

Направленность (профиль) подготовки: Солнечно-земная физика

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета

Протокол №25 от «21» апреля 2020 г.

Председатель

Н.М. Буднев

Рекомендовано кафедрой:

Протокол №8

От «14» апреля 2020 г.

И.о. зав. кафедрой

С.В. Ловцов

Иркутск 2020 г.

## Содержание

1. Цели и задачи дисциплины: .....	3
2. Место дисциплины в структуре ОПОП: .....	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля): .....	3
4. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	4
5. Содержание дисциплины (модуля) .....	4
6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	6
7. Примерная тематика курсовых работ (проектов) .....	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля): .....	8
10. Образовательные технологии: .....	9
11. Оценочные средства (ОС): .....	9
Приложение: фонд оценочных средств	

## 1. 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, 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, механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП:

«Нейтринная астрофизика» является дисциплиной по выбору в вариативной части общенаучного цикла ОПОП. 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», «Методы математической физики», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Ядерная физика», «Теория электрослабых взаимодействий», «Астрофизика высоких энергий».

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля):

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:  
- способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей (ОПК-2);  
- способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1)

В результате изучения дисциплины студент должен:

**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 астрофизики, иметь представление о пакетах программ моделирования отклика детектора на излучение.

**Владеть:** математическим аппаратом описания генерации излучения в источнике и прохождения излучения через вещество.

**Уметь:** получать простые модельные оценки характеристик космического нейтринного излучения, и предполагаемой статистики событий в детекторе.

#### 4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Семестры	
		7	
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	36 / 1,0	36	
В том числе:			
Лекции			
Практические занятия (ПЗ)	32 / 1	32	
КСР	4/0,1	4	
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	36 / 1,0	36	
Вид промежуточной аттестации (экзамен)	36/1	36	
<b>Контактная работа (всего)</b>	40/1,1	40	
Общая трудоемкость	часы	108	
	зачетные единицы	3	3

#### 5. Содержание дисциплины (модуля)

##### 5.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля)

**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  $\nu N$ -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:  $\nu\mu$ - и  $\nu\tau$ -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  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, мюонов,  $\tau$ -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  $\nu_\mu$  за счет рождения и распада мюонов. Эффект регенерации  $\nu_\tau$  за счет рождения и распада  $\tau$ -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, Km<sup>3</sup>NeT, NEMO и др. Изменение спектров атмосферных нейтрино в экспериментах AMANDA, ANTARES и IceCube. Регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.

## 5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми (последующими) дисциплинами

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин	№ № разделов и тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин
1	Слабые взаимодействия	1,2,4,10

## 5.3. Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятий

№	Наименование темы	Виды занятий в часах			
		Лекции	Практ. зан.	СРС	Всего
1	Тема 1,2		2	4	6
2	Тема 3		2	4	6
3	Тема 4		4	2	6
4	Тема 5, 6		-	4	4
5	Тема 7		4	2	6
6	Тема 8		-	4	4
7	Тема 9		4	2	6
8	Тема 10		4	2	6
9	Тема 11		4	2	6
10	Тема 12		4	2	6
11	Тема 13		-	3	3

12	Тема 14		4	2	6
13	Тема 15		-	3	3

### 6. 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	Нейтрино в Стандартной Модели. Гипотеза нейтринных осцилляций	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
2.	Тема 2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
3.	Тема 3	Генерация нейтрино в термоядерных реакциях на Солнце. Результаты экспериментов по регистрации солнечных нейтрино	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
4	Тема 4	Нейтринные осцилляции в веществе, конверсия нейтрино, параметры смешивания солнечных нейтрино	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
5.	Тема 5,6	Гравитационный коллапс массивных звезд, вспышки сверхновых, нейтринное излучение	-	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
7.	Тема 7	Нейтринный импульс от SN 1987A, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
8	Тема 8	$\bar{\nu}\nu$ - и $\nu\nu$ -нейтрино от взаимодействия космических лучей с веществом и радиационными полями	-	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
9.	Тема 9	Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий	4	Контрольная работа	ОПК-2, ПК-1
10.	Тема 10,11	Гамма-всплески как источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий	8	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
11	Тема 12	Генерация нейтрино космическими лучами в атмосфере Земли	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
12.	Тема 13	Уравнение переноса нейтрино через плотное вещество, поглощение и регенерация нейтрино	-	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
13.	Тема 14	Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
14.	Тема 15	Измерение спектров атмосферных нейтрино на нейтринных телескопах, регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.	-	Контрольная работа	ОПК-2, ПК-1

## 6.1. План самостоятельной работы студентов

№ 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	4
2	Взаимодействие нейтрино с веществом		Вычисление сечений рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партоновой модели. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.		4
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		2
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 нейтросферы протонейтронной звезды $R_\nu$ . Каково соотношение между $R_{\nu_e}$ , $R_{\nu_\mu}$ и $R_{\nu_\tau}$ ?		4
8	Процесс переноса нейтрино в протонейтронной звезде		При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?		4
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 $p\bar{p}$ - и $p\nu$ -нейтрино		Космогенные нейтрино: $p\bar{p}$ - и $p\nu$ -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		3
12	Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино		Расчет углового усиления потоков атмосферных мюонных нейтрино		3

## 6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 6.1. студентам для более углубленного изучения дисциплины предлагаются задачи и упражнения по изучаемым разделам. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительный материал из рекомендованной литературы (п. 8) и решит предложенные в п. 6.1 задачи. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде домашних контрольных работ и опросов на практических занятиях.

## 7. Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Учебным планом написание курсовых работ (проектов) не предусмотрено.

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля):

### 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)

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.

## 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля):

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

## 10. 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

## 11. Оценочные средства (ОС):

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

### 11.1. 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.

### 11.2. 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  $R_\nu$ . Каково соотношение между  $R_{\nu_e}$ ,  $R_{\nu_\mu}$  и  $R_{\nu_\tau}$ ?
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.  $\mu$ - и  $\tau$ -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

11.3 Оценочные средства промежуточного контроля  
Форма проведения промежуточной аттестации — экзамен.

### 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 микроквезары 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 в п. III: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

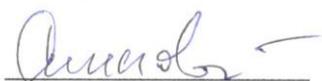
4. Матрица Понтекорво—Маки—Накагавы—Сакаты описывает:

- 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:**



профессор кафедры теоретической физики

С.И. Синеговский

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

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики «14» апреля 2020 г.

Протокол №8 И.о. зав. кафедрой



С.В. Ловцов

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