



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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  
«20» \_\_\_\_\_ 2017 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.4.2 Нейтринная астрофизика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Тип образовательной программы: академический бакалавриат

Направленность (профиль): Солнечно-земная физика

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

Форма обучения: очная

Согласовано с УМК:  
физического факультета  
Протокол № 8 от «19» июня 2017 г.

Зам. председателя к.ф.-м.н., доцент  
Чумак В.В Чумак

Рекомендовано кафедрой:  
теоретической физики  
Протокол № 8  
от «31» мая 2017 г.  
Зав.кафедрой к.ф.-м.н., доцент  
Ловцов С.В. Ловцов

Иркутск 2017 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 (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения) .....	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
12. Приложение: ФОС...../.....	10

## 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 (модуля) и виды учебной работы (разделяется по формам обучения)

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Семестры		
		7		
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	40 / 1,1	40		
В том числе:	-	-		
Лекции		-		
Практические занятия (ПЗ)	36 / 1	36		
КСР	4/0,1	4		
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	32 / 0,9	32		
Вид промежуточной аттестации (экзамен)	36/1	36		
<b>Контактная работа (всего)</b>	43/1,2	43		
Общая трудоемкость	часы	108	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 SN 1987A. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A, 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. Измерение 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

№ п/п	Наименование темы	Виды занятий в часах					Всего
		Лекции	Практ. зан.	Семина.	Лаб. занятия	СРС	
1	Нейтрино в Стандартной Модели. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах		4	-	-	4	8
2	Тема 3		4	-	-	2	6
3	Тема 4		4	-	-	2	6
4	Тема 5, 6		4	-	-	2	6
5	Тема 7		-	-	-	2	2
6	Тема 8		4	-	-	2	6
7	Тема 9		-	-	-	2	2
8	Тема 10		4	-	-	4	8
9	Тема 11		4	-	-	4	8
10	Тема 12		4	-	-	2	6

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

### 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	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
2.	Тема 2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	4	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	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, ПК-1
4	Тема 4	Нейтринные осцилляции в веществе, конверсия нейтрино, параметры смешивания солнечных нейтрино	4	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	ОПК-2, ПК-1
8	Тема 8	$\bar{\nu}_\mu$ - и $\nu_\mu$ -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	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-2, 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	Внеаудиторная, решение задач	Вычисление сечений рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партонной модели. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.		2
3	Нейтринное излучение Солнца	Внеаудиторная, решение задач	Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Вычисление энергетического спектра солнечных нейтрино		2
4	Нейтринное излучение сверхновых	Внеаудиторная, решение задач	Расчет спектров нейтрино от вспышки сверхновой		2
5	Нейтринные события в детекторе	Внеаудиторная, решение задач	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	Внеаудиторная, решение задач	Оценить радиуса нейтриносферы 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	Внеаудиторная, решение задач	При каких условиях происходит захват нейтрино в мантии протонейтронной звезды?		4
9	Механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом УВ в коллапсирующей звезде	Внеаудиторная, решение задач	Оценить передачу энергии от нейтрино за фронтом УВ, достаточную для сброса звездной оболочки		2
10	Космогенные $\bar{\nu}$ - и $\nu$ -нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Космогенные нейтрино: $\bar{\nu}$ - и $\nu$ -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		2

12	Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Расчет углового усиления потоков атмосферных мюонных нейтрино		2
----	---	------------------------------	---	--	---

## 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. Синеговский, С.И. Космические нейтрино высоких энергий: учеб. пособие / С. И. Синеговский. - Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. - 60 с. (11)

*сверено с ГИБ ИГУ*

### Дополнительная литература:

1. Клапдор-Клайнротхаус, Г. В. Астрофизика элементарных частиц / Г.В. Клапдор-Клайнротхаус, Кау Цюбер; Пер.с нем.,Под ред.А.А.Беднякова. - М.: Ред. журн."Успехи физич.наук", 2000. - 496 с. - ISBN 5855040127 (нф А567499)

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.

Лекции и материалы курса 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.

### Разработчики:

\_\_\_\_\_ профессор кафедры теоретической физики С.И. Синеговский

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики

«31» мая 2017 г.

Протокол № 8 Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.В. Ловцов

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