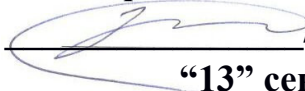




**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Иркутский государственный университет»**  
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)  
**Физический факультет**

**УТВЕРЖДАЮ**  
**Декан физического факультета**  
 / Буднев Н.М.  
“13” сентября 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

Наименование дисциплины (модуля) **Нейтринная физика и астрофизика**

Научная специальность: **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**

Форма обучения очная

Согласовано с УМК физического факультета  
протокол №35 от «13» сентября 2022 г.

Председатель УМК  / Буднев Н.М./

Программа рассмотрена на заседании  
кафедры теоретической физики  
«13» сентября 2022 г. Протокол №2

И.о. зав.кафедрой  /Ловцов С.В./

**Иркутск 2022 г.**

## Содержание

1. Цели и задачи дисциплины.....	3
2. Требования к результатам освоения дисциплины.....	3
3. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	3
4. Содержание дисциплины.....	4
4.1. Содержание разделов и тем дисциплины.....	4
4.2. Разделы и темы дисциплин и виды занятий.....	5
4.3. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	6
5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии).....	6
6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	6
7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	7
8. Образовательные технологии.....	7
9. Фонды оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.....	7

## 1. Цели и задачи дисциплины

**Цель программы** - подготовка специалистов в области физики процессов генерации нейтрино в астрофизических объектах в широком диапазоне энергий, методов регистрации космического нейтринного излучения, принципов обработки данных, полученных на детекторах.

**Задачи курса** – формирование представлений о физических процессах в астрофизических источниках излучения высокой энергии, изучение принципов работы крупномасштабных установок для детектирования астрофизических нейтрино и специальных методов решения астрофизических задач, ввести аспирантов в круг проблем современной нейтринной астрофизики.

## 2. Требования к результатам освоения дисциплины

В результате изучения курса «Нейтринная физика и астрофизика» аспирант должен **знать:**

- типы и свойства нейтрино, характеристики взаимодействия нейтрино с нуклонами, электронами и ядрами
- модели устройства ярких астрофизических объектов – активных галактических ядер, микроквazarов, сверхновых, гамма-барстеров;
- основные процессы генерации нейтрино в астрофизических объектах, межзвездной среде;
- детали процессов генерации нейтрино на Солнце;
- процессы с участием нейтрино в гравитационном коллапсе звезд;

**уметь:**

- рассчитывать потоки атмосферных нейтрино;
- оценивать потоки солнечных нейтрино;
- оценивать число нейтринных событий в детекторе;
- объяснить генерацию нейтринных всплесков при коллапсе звезды;

**иметь представление:**

- о механизмах ускорения частиц в астрофизических источниках и методах их решения;
- об основных процессах сопровождающих перенос нейтрино высоких энергий через вещество;
- о возможных источниках астрофизических нейтрино высоких энергий зарегистрированных в эксперименте IceCube.

## 3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего академических часов	Курсы			
			2		
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	<b>16</b>		<b>16</b>		
В том числе:					
Лекции			8		
Практические занятия (ПЗ)			8		
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	<b>18</b>		18		

В том числе:					
Реферат (при наличии)					
Контактная работа					
Подготовка к зачету	18		18		
<b>Промежуточная аттестация (всего)</b>	<b>2</b>		<b>2</b>		
В том числе:					
Контактная работа во время промежуточной аттестации	2		2		
Форма промежуточной аттестации (зачет, экзамен)	зачет		зачет		
Общая трудоемкость	часы	36	36		
	зачетные единицы	1	1		

#### 4. Содержание дисциплины

##### 4.1. Содержание разделов и тем дисциплины

**Тема 1.** Свойства нейтрино. Ограничения на массу, время жизни, заряд и магнитный момент. Ограничения на число типов нейтрино. Дираковская и майорановская масса. Гипотеза нейтринных осцилляций.

**Тема 2.** Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. 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.** Нейтринное излучение Солнца. Результаты экспериментов по регистрации нейтрино от Солнца (Homestake, SAGE, GALLEX, GNO, SNO и др.).

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

**Тема 6.** Сверхновая 1987А. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987А, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса. Детекторы нейтрино от сверхновых.

**Тема 7.** 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.

**Тема 9.** Дискретные источники космических лучей, гамма-квантов и нейтрино высоких энергий: Активные ядра галактик как источники нейтрино: модели и оценки потоков. Космологические гамма-всплески – гипотетические источники космических лучей, гамма-

квантов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий. Модельно-независимые оценки потоков нейтрино от гамма-барстеров.

**Тема 10.** 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.

**Тема 11.** 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 12.** Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников: а) черенковские детекторы, б) радиодетектирование, в) акустические детекторы. Нейтринные телескопы: NT200+, 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.

#### 4.2. Разделы и темы дисциплин и виды занятий

№ п/п	Наименование темы	Виды занятий в часах			
		Лекции	Практ. зан.	СРС	Всего
1	Нейтрино в Стандартной Модели. Гипотеза нейтринных осцилляций	0,5	-	2	2,5
2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	0,5	1	1	2,5
3	Генерация нейтрино в термоядерных реакциях на Солнце. Результаты экспериментов с солнечных нейтрино	0,5	1	1	2,5
4	Нейтринные осцилляции в веществе, МСВ-эффект. Параметры смешивания солнечных нейтрино	0,5	-	2	2,5
5	Гравитационный коллапс массивных звезд, вспышки сверхновых, нейтринное излучение	0,5	0,5	1	2
6	Сверхновая SN 1987A. Детекторы нейтрино от сверхновых	0,5	1	2	3,5
7	Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий	0,5	0,5	1	2
8	Атмосферные нейтрино	0,5	1	2	2,5
9	Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество	1	1	1	3
10	Принципы регистрации нейтрино высоких энергий от астрофизических источников, нейтринные телескопы	1	1	1	3
11	Уравнение переноса нейтрино, поглощение и регенерация нейтрино	1	1	2	4
12	Принципы регистрации нейтрино, нейтринные телескопы. Измерение спектров атмосферных нейтрино, регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.	1	-	2	3

### 4.3. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства
1	2	3	4	5
1	Тема 1	Амплитуда рассеяния частиц при высоких энергиях, кинематика двухчастичной реакции, кроссинг-симметрия, связь между амплитудой рассеяния и сечениями	3	Задание на семинаре в виде задачи
2	Тема 2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	1	Задание на семинаре
3	Тема 3	Генерация нейтрино в термоядерных реакциях на Солнце	1	Задание на семинаре
4	Тема 5	Диффузия нейтрино, нейтриносфера	0,5	Задание на семинаре
5	Тема 6	Сверхновая SN 1987A. Детекторы нейтрино от сверхновых	1	Задание на семинаре
6	Тема 7	Фоторождение пионов на реликтовом излучении	0,5	Контрольная работа
7	Тема 8	Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий	1	Задание на семинаре
8	Тема 9	Гамма-всплески – источники космических лучей, гамма-квантов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий	1	Задание на семинаре
9	Тема 10	Потоки атмосферных нейтрино	1	Контрольная работа
10	Тема 11	Прохождение нейтрино высоких энергий через плотное вещество, поглощение и регенерация нейтрино	1	Задание на семинаре

### 5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Курсовые работы не планируются.

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература

1. Высоцкий, М.И. Лекции по теории электрослабых взаимодействий. [Электронный ресурс]: учебное пособие. — Электрон. дан. — М.: Физматлит, 2011. — 151 с. — Режим доступа: ЭБС «Лань». ISBN: 978-5-9221-1263-5

б) дополнительная литература\

1. Окунь, Л. Б. Лептоны и кварки. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1990. 345 с

2. Березинский В.С. и др. Астрофизика космических лучей. М.: "Наука", 1990. – 523 с. ISBN 5020142069 (2)

3. Синеговский, С. И. Космические нейтрино высоких энергий [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. И. Синеговский. - ЭВК. - Иркутск: Изд-во ИГУ, 2009. - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотека". - Неогранич. доступ.

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

5. В.А. Бедняков, Д.В. Наумов, О.Ю. Смирнов. Физика нейтрино и ОИЯИ. УФН. 2016. Т. 186, № 3. С. 233-263.

6. Ядерная астрофизика. Под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрамма. М.: Мир, 1986. 519 с.

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

При чтении курса используются компьютерные технологии, лекции в специализированных аудиториях. Часть материалов 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). Свежие материалы по темам курса (статьи, обзоры) доступны на www-ресурсах: <http://inspirehep.net/>, <http://arxiv.org/>.

## 8. Образовательные технологии

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

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

## 9. Фонды оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Входной контроль умений и знаний не проводится.

9.1. Оценочные средства текущего контроля: *(текущий контроль не планируется)*

9.2. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Зачет считается сданным, если студент дает правильный ответ на теоретический вопрос и успешно справляется с решением задачи (упражнения).

### Примерный перечень вопросов к зачёту

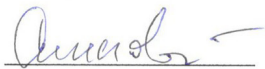
1. Свойства нейтрино: тип, масса, лептонные числа, нейтринные осцилляции.
2. Взаимодействия нейтрино с участием заряженных и нейтральных токов. Когерентное рассеяние нейтрино на ядрах.
3. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца и его детектирование.
5. Общие представления о физических процессах, предшествующих вспышке сверхновой и сопровождающих ее.
6. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
7. Детектирование нейтринного всплеска от сверхновой SN 1987A – факты и гипотезы.
8. Механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках и межзвездной среде.
9. Активные ядра галактик, и космологические гамма-всплески как источники нейтрино: модели и оценки потоков.
10. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино, потоки прямых нейтрино.
11. Уравнение переноса нейтрино в веществе, поглощение и регенерация нейтрино. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.

12. Принципы регистрации нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. Нейтринные телескопы: Baikal GVD, ANTARES, IceCube. Регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.

Примеры задач и упражнений:

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 пионов и каонов, считая атмосферу Земли сферической изотермической.
4. Какие факторы способствуют захвату (удержанию) нейтрино в коллапсирующей звезде. Каково соотношение между радиусами нейтриносфер протонейтронной звезды  $R_\nu$ ,  $R_{\nu p}$  и  $R_{\nu n}$ ?
5. Каков принципиальный механизм нейтринного нагрева веществ за фронтом ударной волны в коллапсирующей звезде?

**Разработчик:**



профессор, д.ф.-м.н. С.И. Синеговский



**Лист согласования, дополнений и изменений  
на 2024/2025 учебный год**

К рабочей программе дисциплины «Нейтринная физика и астрофизика» по научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

1. В рабочую программу дисциплины вносятся следующие дополнения:  
Нет дополнений

2. В рабочую программу дисциплины вносятся следующие изменения:  
Нет изменений

Изменения одобрены УМК физического факультета,  
протокол №42 от 15 апреля 2024 г.

И.о. зав. кафедрой \_\_\_\_\_ /  / Ловцов С.В./