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
«31» августа 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.02.01 Нейтринная астрофизика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная физика

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета
Протокол №30 от «31» августа 2021 г.

Председатель _____
Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:
Протокол №1
От «30» августа 2021 г.

И.о. зав. кафедрой _____
С.В. Ловцов

Иркутск 2021 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, 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.

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», «Методы математической физики», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Ядерная физика», «Теория электрослабых взимодействий», «Астрофизика высоких энергий».

III. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:
- Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1).

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

Компетенция	ПК-1
Индикаторы компетенции	ИДК $_{\text{пк 1.1}}$ знает основные принципы, понятия нейтринной астрофизики.
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 кос-

	мического 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 4 зачетных еденицы, 144 часа, в том числе 79 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 отводится 44 часа.

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/ темы	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	1-15	8	144	44	22	44	1	39	Практическое задание; вопросы к экзамену
Итого:			144	44	22	44	1	39	

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	39	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы,

						до-ступные по логину и паро-лю, предостав-ляемым Науч-ной библиоте-кой 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 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: p - и pp-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 [illegible]- и K-мезонов, мюонов, -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 [illegible] за счет рождения и распада мюонов. Эффект регенерации [illegible] за счет рождения и распада -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

№ 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	ПК-1
2.	Тема 2	Рассеяние нейтрино на лептонах, нуклонах и ядрах	4	Задание на семинаре в виде задачи	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	ПК-1
4	Тема 4	Нейтринные осцилляции в веществе, конверсия нейтрино , параметры смешивания солнечных нейтрино	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
5.	Тема 5,6	Гравитационный колапс массивных звезд, вспышки сверхновых, нейтринное излучение	-	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
7.	Тема 7	Нейтринный импульса 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	p - и pp-нейтрино от взаимодействия космических лучей с веществом и радиационными полями	-	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
9.	Тема 9	Галактические и внегалактические источники нейтрино, диффузные потоки нейтрино высоких энергий	4	Контрольная работа	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	ПК-1
12.	Тема 13	Уравнение переноса нейтрино через плотное вещество, поглощение и регенерация нейтрино	-	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
13.	Тема 14	Принципы регистрации нейтрино от астрофизических источников	8	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
14.	Тема 15	Измерение спектров атмосферных нейтрино на нейтринных телескопах, регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.	-	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	3
2	Взимодействие нейтрино с веществом		Вычисление сечений рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партонной модели. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.		3 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 pp-нейтрино		Космогенные нейтрино: p - и pp-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-излучени		3
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

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. - 60 с. (11)

Дополнительная литература:

1. Клапдор-Клайнгротхаус, Г. В. Астрофизика элементарных частиц / Г.В. Клапдор-Клайнгротхаус, 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.

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. - 60 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» - межотраслевая 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 студентт 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.

<u>Примеры заданий</u>

1. Вычислить сечение рассеяния нейтрино на электронах и нуклонах в кварк-партонной модели.
2. Расчитать 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.

<u>Примерный список устных вопросов для собеседования</u>

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. p - и pp-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 — 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. p - и pp-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 нетйрино.

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
«30» августа 2021 г.
Протокол № 1 И.о. зав. кафедрой _____ С.В. Ловцов

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