



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «ИГУ»
физический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
Буднев Н.М.
«25» 03 2019 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Код дисциплины Б1.В.ДВ.2.1

Наименование дисциплины (модуля) Нейтринная астрофизика

Направление подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

03.06.01 – Физика и астрономия

Направленность (научная специальность) Теоретическая физика

Форма обучения очная

Согласовано с УМК физического факультета
Протокол №20 от «17» апреля 2019 г.
Председатель УМК _____/Буднев Н.М./

Программа рассмотрена на заседании
кафедры теоретической физики
«20» марта 2019 г. Протокол № 8
И.о. зав. кафедрой _____/С.В. Ловцов/

Иркутск 2019 г.

Содержание

1. Цели и задачи дисциплины (модуля).....	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля).....	3
4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы.....	4
5. Содержание дисциплины (модуля).....	5
6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	7
7. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии).....	7
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля).....	7
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля).....	7
10. Образовательные технологии.....	8
11. Оценочные средства (ОС).....	8

1. Цели и задачи дисциплины (модуля)

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. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Нейтринная астрофизика» относится к вариативной части математического и естественнонаучного цикла дисциплин и предназначена для подготовки специалиста-астрофизика, способного работать в составе коллектива исследователей, проводящих эксперименты на гигантских установках по регистрации космического излучения. В рамках этого курса аспиранты изучают основы устройства астрофизических объектов - потенциальных источников космических лучей, гамма-квантов и нейтрино, механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения. В результате изучения курса аспирант 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, получит представление о современном состоянии исследований в области нейтринной астрофизики, научится понимать более широкую постановку астрофизических задач, формулировать и планировать собственные задачи в рамках этого направления.

Изучение курса предполагает наличие полученных на предыдущих уровнях образования знаний, умений и компетенций по дисциплинам «Математический анализ», «Дифференциальные уравнения», «Интегральные уравнения», «Методы математической физики», «Теоретическая механика», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Физика фундаментальных взаимодействий», «Теория электрослабых взаимодействий», «Астрофизика высоких энергий».

Программа курса ориентирована на тематику научных исследований базового института кафедры – Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) СО РАН и на тематику НИИПФ ИГУ.

3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)

Согласно ФГОС аспирант по направлению «Физика» должен обладать рядом общекультурных и профессиональных компетенций (ОПК, ПК и УК). Дисциплине «Нейтринная астрофизика» соответствуют следующие из них:

- Способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-1);
- владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (ПК-2);
- владение новыми методами и методологическими подходами необходимыми для участия в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности (ПК-3).

В результате изучения курса «Нейтринная астрофизика» аспиранты должны

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;
- диффузию нейтрино в протонейтронных звездах;

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 структуре наблюдаемой части вселенной и энергетическом балансе всех форм материи
- о механизмах ускорения частиц в астрофизических источниках и методах их решения;
- об основных процессах сопровождающих перенос нейтрино высоких энергий через вещество;
- о ярких объектах в нашей и других галактиках видах дрейфового движения частиц в плазме.

4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов /зачетных единиц	Курсы				
		1	2	3	4	
Аудиторные занятия (всего)	36/1		36			
В том числе:				-	-	
Лекции	18/0.5		18			
Практические занятия (ПЗ)	18/0.5		18			
Семинары (С)						
Лабораторные работы (ЛР)						
КСР						
Самостоятельная работа (всего)	72/2		72			
В том числе:				-	-	
Курсовой проект (работа)				-	-	
Расчетно-графические работы						
Реферат (при наличии)						
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>						
Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен)						
Общая трудоемкость	108		108			
часы						
зачетные	3		3			
единицы						

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. Ограничения на число типов нейтрино. Дираковская и майорановская масса. Гипотеза нейтринных осцилляций.

Тема 2. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. 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. 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 π - и K -мезонов, μ оонов, τ -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 ν_μ за счет рождения и распада μ оонов. Эффект регенерации ν_τ за счет рождения и распада τ -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: 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.

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

«Нейтринная астрофизика» является заключительным курсом образовательного цикла по кафедре теоретической физики.

5.3. Разделы и темы дисциплин (модулей) и виды занятия

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

6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

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

7. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Курсовые работы не планируются.

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

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

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

3. 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 (1)

4. **Ядерная астрофизика** [Текст] : сб.науч.тр. / ФТИ им.Иоффе ; Под ред.Г.Е.Кочарова. - СПб. : [б. и.], 1991. - 207 с. (1)

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

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. Свежие материалы по темам курса (статьи, обзоры) доступны на www-ресурсах: <http://inspirehep.net/>, <http://arxiv.org/>.

10. 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;
- **текущий контроль** работы аспирантов осуществляется через выполнение контрольных заданий.

11. Оценочные средства (ОС)

11.1. Оценочные средства для входного контроля

Для изучения данного курса аспирант 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

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. Каков 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 птонов икаоров, считая атмосферу Земли сферической изотермической.

Примерный список устных вопросов:

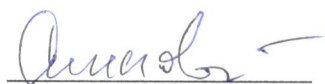
1. Дираковская и майорановская масса нейтрино.
2. Лептонные числа и гипотеза нейтринных осцилляций.
2. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.
3. Основные термоядерные реакции на Солнце, в которых рождаются нейтрино.
4. Роль нейтрино в гравитационном коллапсе звезд.
5. Нейтринное излучение при вспышках сверхновых.
6. Детектирование нейтринного всплеска от сверхновой SN 1987A – факты и гипотезы.
6. $\nu\mu$ - и $\nu\tau$ -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 для промежуточной аттестации

Примерный список вопросов к зачету:

1. Свойства нейтрино: тип, масса, лептонные числа, нейтринные осцилляции.
2. Рассеяние нейтрино на электронах и нуклонах. Сечение νN -рассеяния в кварк-партонной модели.
3. Оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами.
4. Генерация нейтрино в цепочках термоядерных реакций на Солнце. Нейтринное излучение Солнца.
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. Сверхновая SN 1987A. Регистрация нейтринного импульса от SN 1987A, ограничения на свойства нейтрино, полученные на основе детектирования нейтринного импульса.
8. Механизмы генерации нейтрино в астрофизических источниках и межзвездной среде.
9. Реликтовые нейтрино.
10. Активные ядра галактик и микроквазары как источники нейтрино: модели и оценки потоков.
11. Космологические гамма-всплески – гипотетические источники нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, модели и оценки потоков нейтрино.
12. Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино, потоки прямых нейтрино.
13. Уравнение переноса нейтрино в веществе, поглощение и регенерация нейтрино. Эффект регенерации ν_μ за счет рождения и распада мюонов. Специфика переноса электронных антинейтрино. Резонанс Глэшоу.
14. Принципы регистрации нейтрино высоких энергий от астрофизических источников. Нейтринные телескопы: HT200+, IceCube, ANTARES. Регистрация событий от астрофизических нейтрино высоких энергий в эксперименте IceCube.

Разработчики:



профессор, д.ф.-м.н.

С.И. Синеговский

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики ИГУ
«20» марта 2019 г. протокол №8

И.о. зав. кафедрой



С.В. Ловцов