



**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 факультета

/Буднев Н.М./

“20” мая 2019 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Код дисциплины: **ФТД.2**

Наименование дисциплины (модуля) **Астрофизика высоких энергий**

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.

Программа рассмотрена на заседании ка-
федры теоретической физики
«20 марта» 2019 г. Протокол № 8

Председатель УМК

/Чумак В.В./

И.о. зав. кафедрой

/Ловцов С.В./

Иркутск 2019 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) (при наличии).....	6
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля).....	7
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля).....	7
10. Образовательные технологии	7
11. Оценочные средства (ОС)	8
12. Приложение: ФОС.....	10

1. Цели и задачи дисциплины

Цель программы - подготовка специалистов в области физики процессов ускорения заряженных частиц высокой энергии и генерации космических лучей, гамма-квантов и нейтрино в астрофизических объектах различной природы.

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.

Ввести аспирантов в круг проблем современной астрофизики высоких энергий, дать детальную картину физических процессов в астрофизических источниках излучения высокой энергии, познакомить с результатами измерений космического излучения, принципами работы крупномасштабных установок для детектирования космических лучей и гамма-квантов, представить примеры решения астрофизических задач методами теоретической физики. В рамках курса «Астрофизика высоких энергий» аспиранты изучают принципиальные основы устройства астрофизических объектов - потенциальных источников космических лучей, гамма-квантов и нейтрино, механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Астрофизика высоких энергий» относится к вариативной части математического и естественнонаучного цикла дисциплин и предназначена для подготовки специалиста-физика, способного работать в составе коллектива исследователей, проводящих эксперименты на гигантских установках по регистрации космического излучения и выполняющих обработку результатов измерений. В рамках этого курса аспиранты изучают основы устройства астрофизических объектов – потенциальных источников космических лучей и гамма-квантов, механизмы генерации высокоэнергетического космического излучения. В результате изучения курса аспирант приобретает фундаментальные знания о процессах генерации частиц высокой энергии в астрофизических объектах, включая Солнце и атмосферу Земли, приобретает навыки решения конкретных задач, получает представление о современном состоянии исследований в области астрофизики высоких энергий, учится 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», «Стандартная модель».

Программа курса ориентирована на тематику научных исследований, проводимых в НИИПФ ИГУ, на кафедре теоретической физики, в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) .

3. Требования к результатам освоения дисциплины

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 «Астрофизика высоких энергий» аспиранты должны

знать:

- основы космологии, модели инфляции и основные этапы эволюции горячей вселенной
- наблюдаемые характеристики реликтового электромагнитного излучения и их интерпретацию
- модели устройства ярких астрофизических объектов – активных галактических ядер, микроквazarов, сверхновых, гамма-барстеров
- фундаментальные процессы генерации гамма-квантов и космических лучей в астрофизических объектах, межзвездной среде
- принципы детектирования космического излучения высокой энергии
- методы решения задач астрофизики высоких энергий, пакеты программ моделирования прохождения частиц высоких энергий через вещество

уметь:

- рассчитывать пробеги гамма-квантов высоких энергий в межзвездной и межгалактической среде;
- приближенно решать уравнение диффузии космических лучей;
- оценивать пороги реакций, приводящих к потерям энергии заряженных частиц и гамма-квантов;
- получать модельные оценки характеристики космического излучения и предполагаемой статистики событий в детекторе
- использовать математический аппарат описания процессов излучения в источнике и прохождения излучения через вещество

иметь представление:

- о структуре наблюдаемой части вселенной и энергетическом балансе всех форм материи
- о ярких объектах в нашей и других галактиках
- об основных механизмах ускорения частиц в астрофизических источниках
- о процессах генерации гравитационных волн в результате коллапса или слияния компактных звезд

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Курсы			
		1	2	3	4
Аудиторные занятия (всего)	24		24		
В том числе:				-	-
Лекции	12		12		
Практические занятия (ПЗ)	12		12		
Семинары (С)					
Лабораторные работы (ЛР)					
КСР					
Самостоятельная работа (всего)	48		48		
В том числе:				-	-
Курсовой проект (работа)				-	-

каскад. Точно решаемая модель нуклонного каскада и ее расширение на случай зависящих от энергии свободных пробегов частицы. Крупномасштабные установки для регистрации ШАЛ и результаты восстановления спектра и элементного состава КЛ высоких энергий.

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	Нейтринная астрофизика	Темы 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9,10

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

№ п/п	Наименование темы	Виды занятий в часах			
		Л	ПЗ	СРС	Всего
1	Объекты и задачи астрофизики высоких энергий. Галактики, скопления галактик, активные ядра галактик как источники излучения высокой энергии	1		4	5
2	Эволюция Вселенной. Компоненты и структуры Вселенной. Закон Хаббла, ускоренное расширение Вселенной, темная энергия	1		4	5
3	Распределение массы в галактиках, вращательные кривые спиральных галактик, темная материя	1	1	4	6
4	Модель активного галактического ядра, светимость AD, преобразование гравитационной энергии в излучение	1	1	4	6
5	Оценка мощности источников КЛ, спектр и состав	1	2	6	9
6	Механизм ГЗК, данные о КЛ при энергиях выше порога ГЗК	1	2	6	9
7	Ударные волны в астрофизических источниках. Диффузионный механизм ускорения частиц.	1	2	6	9
8	Взаимодействие КЛ с атмосферой Земли, ШАЛ, ядерный каскад, ЭФЛ. Модель ядерного каскада в атмосфере, решение уравнений каскада	1	2	4	7
9	Генерация мюонов в адронном каскаде, спектр и зенитно-угловое распределение, данные экспериментов	2	2	6	10
10	Принципы регистрации КЛ высоких и сверхвысоких энергий. Крупномасштабные установки для регистрации ШАЛ и результаты восстановления спектра и элементного состава КЛ высоких энергий	2		4	6

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 3	Распределение массы в галактиках, вращательные кривые спиральных галактик, темная материя	1	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1,2,3
2	Тема 4	Модель активного галактического ядра, светимость аккреционных дисков, преобразование гравитационной энергии в излучение	1	Задание на семинаре в виде задачи	
3.	Тема 5	Оценка мощности источников КЛ, спектр и элементный состав	2	Задание на семинаре в виде задачи	
4	Тема 6	Механизмы потерь энергии космическими лучами в межзвездном пространстве	2	Задание на семинаре в виде задачи	
5	Тема 7	Диффузионный механизм ускорения частиц	2	Задание на семинаре в виде задачи	
6	Тема 8	Космические лучи сверхвысоких энергий	2	Задание на семинаре в виде задачи	
7	Тема 9	Модели ядерного каскада в атмосфере, решение уравнений каскада	2	Задание на семинаре в виде задачи	

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

Курсовые работы не предусмотрены.

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

Основная литература

1. Бисноватый-Коган Г. С.. Релятивистская астрофизика и физическая. М. Красанд, 2011. 363 с.
2. Березинский В.С. и др. Астрофизика космических лучей. М.: "Наука", 1990. – 523 с.
3. Stanev T. High Energy Cosmic Rays. Praxis Publishing Ltd, Chichester, 2010.

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. Засов А. В., Постнов К. А.. Общая астрофизика ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Физ. фак., Гос. астроном. ин-т им. П. К. Штернберга. - Фрязино : Век 2, 2006. - 493 с.
3. Синеговский С. И. Космические нейтрино высоких энергий [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. И. Синеговский. - ЭВК. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. - Режим доступа: ЭЧЗ "Библио"

лиотех". - Неогранич. Доступ.

4. Клапдор-Клайнротхаус Г. В., Цюбер К. *Астрофизика элементарных частиц*. Пер.с нем., Под ред. А.А.Беднякова. - М. : Ред.журн. "Успехи физ. наук", 2000. - 496 с.

5. Mészáros P. *High Energy Universe. Ultra-High Energy Events in Astrophysics and Cosmology*. Cambridge University Press Cambridge University Press, New York, 2010.

Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

Научная библиотека ИГУ <http://library.isu.ru/>, поисковая система INSPIRE журнальных статей и материалов конференций <http://inspirehep.net/>, базы данных и электронных препринтов по физике и астрофизике высоких энергий <http://arxiv.org/>.

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебная аудитория для проведения лекционных и практических занятий. При чтении курса используются компьютер и мультимедийное оборудование. Лекции, материалы курса доступны на сайте 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 практических задач;
- **практические занятия**, направленные на активизацию познавательной деятельности аспирантов и приобретения ими навыков решения практических и проблемных задач;
- **консультации** – еженедельные;
- **самостоятельная внеаудиторная работа** направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине;

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: задание на семинаре в виде задачи по каждой теме дисциплины.

11.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Примерный список вопросов к зачету

1. Астрофизические источники излучения высокой энергии. Основная модель активного галактического ядра, светимость аккреционных дисков, эффективность преобразования гравитационной энергии АДЧД в излучение.
2. Энергетический спектр и состав первичного космического излучения, регистрируемого на Земле. Распространенность ядер в КЛ и в среднем во вселенной. Оценка мощности источников КЛ. Проблема происхождения КЛ.
3. Космические лучи сверхвысоких энергий. Механизм Грейзена-Зацепина-Кузьмина обрезания спектра КЛ, другие потери энергии КЛ. Экспериментальные данные о КЛ при энергиях выше порога ГЗК.
4. Ударные волны в астрофизических источниках, основные уравнения для ударных волн.

5. Степенной спектр КЛ как результат стохастического процесса. Механизм Ферми 2-го порядка ускорения заряженных частиц.
6. Диффузионный механизм ускорения заряженных частиц в астрофизических источниках (механизм Ферми 1-го порядка). Показатель спектра КЛ и оценка максимально достижимой энергии при ускорении частиц на фронтах ударных волн, генерируемых во вспышках сверхновых.
7. Задачи гамма-астрофизики. Основные механизмы генерации γ -излучения высокой энергии. Источники диффузного излучения галактики и внегалактических астрофизических объектов.
8. Синхротронное излучение, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект, фотрождение пионов как основные составляющие механизма генерации γ -излучения высокой энергии.
9. Принципы и методы регистрации космических лучей и гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий.
10. Развитие широкого атмосферного ливня, характеристики ШАЛ, уравнения электрон-фотонного ливня и их решения для упрощенных моделей
11. Модель адронного каскада в атмосфере, методы приближенного решения уравнений каскада. Условия расщепления системы, нуклонный каскад. Точно решаемая модель нуклонного каскада и ее расширение на случай зависящих от энергии свободных пробегов частицы.
12. Крупномасштабные действующие установки для регистрации ШАЛ и результаты восстановления спектра и элементного состава космических лучей высоких энергий.

Примерный список задач к зачету

Задача 1. Используя закон сохранения энергии-импульса для реакции $p + \gamma \rightarrow \pi^+ + n$, получите выражение для пороговой энергии протона.

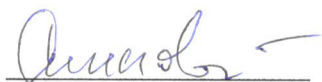
Задача 2. Найдите пороговую энергию протона (в л.с.) для процесса на реликтовых фотонах $p + \gamma \rightarrow e^+ + e^- + p$.

Задача 3. Найти приближенное выражение для спектра π^\pm -мезонов на малой глубине атмосферы ($h \square \beta_\pi \lambda_\pi^0$), предполагая: 1) степенной спектр КЛ; 2) сечения неупругих адрон-ядерных соударений не зависят от энергии; 3) источниками пионов являются только нуклоны и пионы; 4) пион не распадается.

Задача 4. Исследовать поведение сечения для случая рассеяния фотонов на ультрарелятивистских электронах (обратный комптон-эффект).

Задача 5. Оценить потери энергии космических γ -квантов высокой энергии на процессах рождения e^+e^- - пар при взаимодействии с фотонами реликтового излучения (СМВ):
 $\gamma + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow e^+ + e^-$

Разработчик:



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

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