



**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

«20» апреля 2024 г.



**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.02.02 Астрофизика высоких энергий

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Солнечно-земная физика

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета  
Протокол №42 от «15» апреля 2024 г.

Председатель

Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:

Протокол №7

От « 15 » марта 2024 г.

И.о. зав. кафедрой

С.В. Ловцов

Иркутск 2024 г.

## Содержание

1. Цели и задачи дисциплины: .....	3
2. Место дисциплины в структуре ОПОП: .....	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины .....	3
4. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	4
5. Содержание дисциплины .....	4
6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	6
7. Примерная тематика курсовых работ .....	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	9
10. Образовательные технологии .....	10
11. Оценочные средства (ОС) .....	10
Приложение: фонд оценочных средств	

## I. Цели и задачи дисциплины:

Астрофизика высоких энергий - раздел астрофизики, центральное место в котором занимают высокоэнергетические процессы, сопровождающие формирование структур и их эволюцию в Галактике и за ее пределами.

Цель курса «Астрофизика высоких энергий» - изучение процессов в астрофизических объектах, в которых генерируются космические лучи и гамма-квантов высоких энергий  $10^2 - 10^{12}$  ГэВ, а также методов регистрации и детекторов космического излучения. В результате изучения курса студент приобретает фундаментальные знания о механизмах ускорения заряженных частиц и процессах рождения гамма-квантов в астрофизических объектах, знакомится с методами регистрации на Земле потоков космического излучения, приобретает навыки решения конкретных задач.

### Задачи курса

Ввести студентов в круг проблем современной астрофизики высоких энергий, дать представление о физических процессах в астрофизических источниках излучения высокой энергии, познакомить с результатами измерений космического излучения, принципами работы крупномасштабных установок для детектирования космических лучей, изучить специальные методы решения астрофизических задач. В рамках курса «Астрофизика высоких энергий» 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

«Астрофизика высоких энергий» входит в часть, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1 и является дисциплиной по выбору (ДВ). Курс «Астрофизика высоких энергий» 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 астрофизики высоких энергий, знать принципы регистрации космического излучения в широком диапазоне энергий, иметь представление о детекторах частиц высоких энергий, 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», «Теоретическая механика», «Квантовая теория», «Термодинамика и статистическая физика», «Ядерная физика».

## 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 <sub>пк 1.1</sub> знает основополагающие принципы, понятия интегральных уравнений и вариационного исчисления.
Результаты обучения	<i>Знает:</i> основные закономерности процессов, происходящих в звездах, квазизвездных объектах и межзвездной среде, механизмы генерации космического излучения высокой и сверхвысокой энергии; принципы детектирования космического излучения, основные ме-

тоды решения задач астрофизики высоких энергий, иметь представление о пакетах программ моделирования прохождения частиц высоких энергий через вещество.

**Умеет:** получать простые модельные оценки характеристик космического излучения и предполагаемой статистики событий в детекторе.

**Владеет:** математическим аппаратом описания процессов излучения в источнике и прохождения излучения через вещество.

#### IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа, в том числе 96 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов через ЭЛИОС факультета. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 74 часов.

Форма промежуточной аттестации: зачет.

#### 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)			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися				
					Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия	Консультации		
1	1-16	7	144	34		68	2	50	Практическое задание; вопросы и задачи к зачету
Итого:			144	34		68	2	50	

#### 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.)		
7	Тема 1-16	Задание в виде задачи	После пройденных тем	50	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы

						ной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.
--	--	--	--	--	--	--

### 4.3. Содержание учебного материала Содержание разделов и тем дисциплины

**Тема 1.** Объекты и задачи астрофизики высоких энергий. Галактики, скопления галактик, активные ядра галактик (радиогалактики, квазары, блазары и др.) как источники излучения высокой энергии.

**Тема 2.** Методы определения расстояний ("лестница" расстояний): угловой размер звезды, годичный параллакс, стандартные свечи (цефеиды, сверхновые). Светимость объектов, звездные величины.

**Тема 3.** Эволюция Вселенной. Космология Фридмана-Леметра. Наблюдаемые структуры и компоненты Вселенной. Закон Хаббла, реликтовое излучения, анизотропия РИ (Реликт, COBE), ускоренное расширение Вселенной по данным наблюдений SN Ia, РИ БАО; эксперименты WMAP, Planck и др. Цифровой обзор неба (Sloan Digital Sky Survey). Темная энергия, космический конкорданс.

**Тема 4.** Распределение массы в галактиках и вращательные кривые спиральных галактик, гипотеза темной материи.

**Тема 5.** Основная модель активного галактического ядра, светимость аккреционных дисков, эффективность преобразования гравитационной энергии АДЧД в излучение.

**Тема 6.** Энергетический спектр и состав первичного космического излучения, регистрируемого на Земле. Распространенность ядер в космических лучах и в среднем во вселенной. Оценка мощности источников КЛ. Проблема происхождения КЛ.

**Тема 7.** Космические лучи сверхвысоких энергиях. Механизм Грейзена-Зацепина-Кузьмина обрезания спектра КЛ, другие потери энергии КЛ. Экспериментальные данные о КЛ при энергиях выше порога ГЗК. Уравнения переноса КЛ, диффузионная модель. Эффект Комптона-Геттинга, анизотропия КЛ.

**Тема 8.** Ударные волны в астрофизических источниках, основные уравнения (законы сохранения) для ударных волн, ударная адиабата (Гюгонио).

**Тема 9.** Диффузионный механизм ускорения заряженных частиц в астрофизических источниках. Степенной спектр КЛ как результат стохастического процесса. Механизм Ферми 2-го порядка и 1-го порядка. Показатель спектра КЛ и оценка максимально достижимой энергии при ускорении частиц на фронтах ударных волн, генерируемых во вспышках сверхновых.

**Тема 10.** Релятивистские ударные волны, конверсионный механизм ускорения частиц. Другие возможные механизмы генерации КЛ сверхвысоких энергий.

**Тема 11.** Взаимодействие космических лучей с атмосферой Земли. Широкие атмосферные ливни, ядерный каскад, электронно-фотонные ливни.

**Тема 12.** Модель ядерного 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 пробега частицы.

**Тема 13.** Мезонный каскад, атмосферные  $\pi$ - и  $K$ -мезоны высоких энергий.

**Тема 14.** Генерация мюонов в адронном каскаде, расчет спектра и зенитно-углового распределения, данные экспериментов.

**Тема 15.** Генерация нейтрино в ядерно-каскадном процессе. Атмосферные нейтрино от распадов  $\pi$ - и  $K$ -мезонов, мюонов,  $\tau$ -лептонов и очарованных частиц как фон для астрофизических нейтрино и калибровка нейтринных телескопов. Характеристики потока прямых атмосферных нейтрино.

**Тема 16.** Принципы регистрации КЛ и гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий от астрофизических источников: а) черенковские детекторы, б) флуоресцентные телескопы, в) гибридные детекторы.

**Тема 16.** Крупномасштабные установки для регистрации ШАЛ (Обсерватория им. П. Оже, Якутская установка ШАЛ, KASCADE-Grande, Тунка, Telescope Array и др.) и результаты восстановления спектра и элементного состава КЛ высоких энергий.

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

№	№ раздела и темы дисциплины	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1	Тема 2	Звездные величины, методы определения расстояний	8	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
2	Тема 3	Эволюция Вселенной. Компоненты и структуры Вселенной, темная энергия	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
3.	Тема 4	Вращательные кривые спиральных галактик, темная материя	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
4	Тема 5	Черные дыры, светимость аккреционных дисков, преобразование гравитационной энергии в излучение	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
5	Тема 6	Оценка мощности источников космических лучей, спектр и состав первичного космического излучения	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
6	Тема 7	Механизм ГЗК обрезания спектра КЛ, другие потери энергии КЛ. Экспериментальные данные о КЛ при энергиях выше порога ГЗК. Уравнения переноса КЛ, диффузионная модель	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
7	Тема 8	Ударные волны в астрофизических источниках, законы сохранения и разрывы на фронте УВ, ударная адиабата	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
8	Тема 9	Механизмы Ферми 1-го порядка и 2-го порядка	4	Контрольная работа	ПК-1
9	Тема 11	Прохождение КЛ через атмосферу Земли, образование ШАЛ	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
10	Тема 12	Модель ядерного каскада в атмосфере, решение уравнений каскада	6	Задание на семинаре в	ПК-1

				виде задачи	
11	Тема 13	Мезонный каскад, атмосферные $\pi$ - и $K$ -мезоны высоких энергий	6	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
12	Тема 14	Генерация мюонов в адронном каскаде, спектр и зенитно-угловое распределение, данные экспериментов	6	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	Звездные величины, методы определения расстояний	Внеаудиторная, решение задач		Источники из основной и дополнительной литературы	2
2	Компоненты и структуры Вселенной. Закон Хаббла, ускоренное расширение Вселенной, темная энергия	Внеаудиторная, решение задач	Вычисление	литературы по теме практических занятий; образовательные ресурсы Научной библиотекой ИГУ, сайта физического факультета ИГУ. база данных по физике inspirehep.net	4
3	Распределение массы в галактиках и вращательные кривые спиральных галактик, темная материя	Внеаудиторная, анализ моделей	Гипотетические составляющие темной материи, методы детектирования		4
4	Устройство и механизм действия центральной области активного галактического ядра	Внеаудиторная, решение задач	Гипотетические составляющие темной материи, методы детектирования		4
4	Оценка мощности галактических источников космических лучей, спектр и элементный состав КЛ	Внеаудиторная, решение задач	Оценка мощности источников космических лучей для дисковой модели Галактики и модели с гало		4
5	Космические лучи сверхвысоких энергий	Внеаудиторная, решение задач	Энергетические потери КЛ в МЗС, расчет пороговой энергии протона КЛ для рождения пиона на инфракрасном и реликвовом излучениях		4

6	Ударные волны в астрофизических источниках	Внеаудиторная, решение задач	Возникновение УВ, процессы вблизи фронта УВ, законы сохранения и разрывы, ударная адиабата	4
7	Прохождение КЛ через вещество, ШАЛ, ядерный каскад, ЭФЛ	Внеаудиторная, решение задач	Решение уравнений ядерного каскада в атмосфере Земли для степенного спектра КЛ и фейнмановского скейлинга сечений инклюзивных адронных реакций. Решение простой модели генерации атмосферных мюонов	4
8	Процесс переноса	Внеаудиторная, решение задач	При каких условиях происходит ?	4
9	Механизм	Внеаудиторная, решение задач	Оценить передачу энергии	4
10	Потери энергии КЛ сверхвысоких энергий в $p\gamma$ -, $pp$ -взаимодействиях	Внеаудиторная, решение задач	Вычислить поровую энергию : протонов КЛ в ГЗК-механизме	4
11	Галактические и внегалактические источники нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Получить оценку диффузных потоков нейтрино на Земле, используя данные об интенсивности космического гамма-излучения	4
12	Атмосферные нейтрино как фон для астрофизических нейтрино	Внеаудиторная, решение задач	Расчет углового усиления потоков атмосферных мюонных нейтрино	4

#### 4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 4.3.2 студентам для более углубленного изучения дисциплины предлагаются задачи и упражнения. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительный материал из рекомендованной литературы 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 не предусмотрено написание курсовых работ.



## V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) список литературы

#### Основная литература

1. Засов, А.В. Общая астрофизика [Текст] : учеб. пособие / А. В. Засов, К. А. Постнов ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Физ. фак., Гос. астроном. ин-т им. П. К. Штернберга. - 3-е изд., испр. и доп. - Фрязино : Век 2, 2016. - 573 с. ; 22 см. - Библиогр.: с. 565-566. - ISBN 978-5-85099-194-4 – (8 экз.)

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

#### Дополнительная литература

1. Мурзин, В. С. Астрофизика космических лучей [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. С. Мурзин. - Москва : Логос, 2007. - 487 с. ; нет. - (Классический университетский учебник). - Режим доступа: ЭБС "Рукопт". - Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-98704-171-6

### 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.

### г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

<http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;

<http://inspirehep.net/>, <http://arxiv.org/> - Базы данных журнальных статей, материалов конференций и электронных препринтов по физике и астрофизике высоких энергий.

## VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебная аудитория для проведения лекционных и практических занятий. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук.

Лекции, 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).

## 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 са-

- мостоятельного решения задач по дисциплине;
- **текущий контроль** работы а студентов осуществляется через контрольные 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 студент 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.

Оценочные средства текущего контроля - задачи на практических занятиях.

#### Примеры практических заданий

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

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

#### 8.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации.

Форма проведения промежуточной аттестации — зачет.

### Примерный перечень 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. Релятивистские ударные волны, конверсионный механизм ускорения частиц.
8. Развитие широкого атмосферного ливня, характеристики ШАЛ, уравнения электрон-фотонного ливня и их решения для упрощенных моделей
9. 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.
10. Мезонная часть каскада, атмосферные  $\pi$ - и  $K$ -мезоны высоких энергий. Генерация мюонов и нейтрино в адронном каскаде, расчеты и данные эксперимента.
11. Принципы и методы регистрации КЛ, гамма-квантов и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий от астрофизических источников: а) черенковские детекторы, б) сцинтилляционные детекторы; в) флуоресцентные детекторы, г) радиодетектирование, е) акустические детекторы.
12. Крупномасштабные действующие установки для регистрации ШАЛ и результаты восстановления спектра и элементного состава КЛ высоких энергий.

### **Пример тестовых заданий для проверки сформированности компетенций, указанных выше в п. III:**

1. Какой из методов позволяет определить самое большое расстояние между объектами во Вселенной:
  - а). метод параллаксов
  - б). наблюдения за цефеидами
  - в). метод красных смещений
2. Четырехмерное пространство Минковского является пространством с:
  - а). положительной кривизной
  - б). нулевой кривизной
  - в). отрицательной кривизной
3. Введенный Эйнштейном «лямбда-член» в уравнения гравитационного поля позволил:

- а). описать инфляционное расширение Вселенной
- б). получить стационарное решение этих уравнений
- в). Эйнштейн не вводил такого слагаемого

4. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела представляет собой зависимость между:

- а). абсолютной звёздной величиной и спектральным классом для звёзд
- б). скоростью звезды и расстоянием до нее
- в). химическим составом звезды и ее размером

5. Механизм Грейзена-Зацепина-Кузьмина объясняет, почему:

- а). нейтрино слабо взаимодействует со средой
- б). космические лучи в основном состоят из протонов
- в). спектр космических лучей обрывается при сверхвысоких энергиях

**Разработчики:**



доцент кафедры теоретической физики

И.А. Первалова

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики  
«15» марта 2024 г.

Протокол № 7 И.о. зав. кафедрой



С.В. Ловцов

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