

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
МГУ  
\_\_\_\_\_ / Н.Н. Сысоев /  
«\_\_\_» 20 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**  
**АСТРОФИЗИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

---

**Уровень высшего образования:**  
Специалитет

---

**Направление подготовки:**  
03.05.01 Астрономия

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**  
Общая специальность

---

Квалификация «Специалист»

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
Ученым советом физического факультета МГУ

(протокол №\_\_\_\_\_, )

Москва 20\_\_\_

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 Астрономия.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

Д.ф.-м.н., Барков Максим Владимирович, в.н.с. отдела ФЭЗ ИНАСАН

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Астрофизика сверхвысоких энергий»**

Вводный курс в астрофизику сверхвысоких энергий, изучающую процессы излучения нетепловых источников в реальных космических объектах (начиная от фотонов до нейтрино высоких энергий). В первой части курса обзорно рассматриваются наблюдательные методы (такие, как космические комптоновские аппараты, атмосферные Черенковские телескопы, наземные детекторы широких атмосферных ливней, нейтринные телескопы), процессы излучения: синхротронное, комптоновское, тормозное, адронные механизмы. Во второй части обсуждаются методы моделирования физических механизмов в контексте источников сверхвысоких энергий: пульсаров, активных ядер галактик, остатков сверхновых, гамма всплесков.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Астрофизика сверхвысоких энергий» реализуется на 6-ом курсе в 11-м семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

Данный курс входит в число спецкурсов, составляющих теоретическую основу специализации “астрофизика и звёздная астрономия”, а также может служить базой для других астрономических курсов, в которых изучаются космические источники в радио, рентгеновском и гамма-диапазоне электромагнитного спектра.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Курс теоретической физики в объеме, предусмотренном учебный планом. Курс общей астрофизики и теоретической астрофизики.

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-1	<p><b>3-1 Знать:</b> фундаментальные законы взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязь с астрофизическими источниками сверхвысоких энергий</p> <p><b>3-2 Знать:</b> основные экспериментальные методы регистрации жесткого электромагнитного излучения, нейтрино и космических лучей</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> строить теоретические модели астрофизических источников сверхвысоких энергий, используя критически анализ данных</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе астрофизических наблюдений</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> математическим аппаратом, применяемым в астрофизике сверхвысоких энергий</p> <p><b>В-2 Владеть:</b> методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике сверхвысоких энергий</p>
ОПК-1	<p><b>3-1 Знать:</b> основные математические методы и модели, используемые при анализе и интерпретации источников сверхвысоких энергий в астрофизике</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> строить математические модели явлений и процессов излучения в астрофизических источниках сверхвысоких энергий</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> навыками анализа данных наблюдений в области астрофизики сверхвысоких энергий</p>

### 1. Форма обучения: очная.

2. **Язык обучения:** русский.

3. **Содержание дисциплины**

1. Введение в астрофизику сверхвысоких энергий: объекты исследований и методы наблюдений.

2. Релятивистская кинематика. Преобразования Лоренца. Преобразования скоростей. Релятивистская аберрация. Преобразование величин, относящихся к излучению Релятивистские инварианты.

3. Тормозное излучение. Релятивистское обобщение формулы Лармора. Синхротронное излучение одного электрона. Полные потери энергии. Изгибное излучение. Томсоновское рассеяние. Формула Комптона. Обратное комптоновское рассеяние в томсоновском приближении. Потери энергии одного электрона при комптоновском рассеянии.

4. Адронные процессы рождения фотонов и нейтрино (протонный синхротрон, протон-протонное, фотомезонное взаимодействие). Черенковское излучение релятивистских частиц. Потери энергии заряженных частиц при распространении в межгалактической среде. Эффект Грайзена-Зацепина-Кузьмина.

5. Сечения электромагнитных процессов в КЭД. Рождение и аннигиляция пар. Параметр компактности астрофизических источников и его физический смысл. Параметр компактности гамма-всплесков. Горизонт видимости высокоэнергичных фотонов во Вселенной.

6. Методы детектирования гамма излучения сверх высоких энергий: космические аппараты, наземные оптические Черенковские телескопы, наземные детекторы широких атмосферных ливней. Методы детектирования нейтрино сверх высоких энергий.

7. Космические лучи. Ферми ускорение. Пересоединения. Критерий Хиласа. Гамма излучение галактического диска и галактического центра. Пузыри Ферми и eROSITA. Оценка физических параметров.

8. Остатки сверхновых. Ускорение космических лучей и напряженность магнитного поля. Лептонные и адронные модели излучения.

9. Современные представления о потерях энергии вращения нейтронных звёзд в пульсарах. Плерионы. Быстро движущиеся одиночные пульсары и структуры с ними связанные.

10. Гамма яркие двойные звезды. Наблюдения и возможные модели.

11. Механизм Блэнфорда-Знаека и Блэнфорда-Пэйна. Ускорение и коллимация струйных выбросов.

12. Активные ядра галактик и квазаров. Основные наблюдаемые характеристики и феноменологические зависимости. Физические механизмы активности. Природа стационарных источников гамма излучения.

13. Быстрая переменность в активных ядрах галактик, модели, моделирование и критика.

14. Нейтрино сверх высоких энергий, что мы видим на небе. Обсуждение возможных источников.

15. Космические гамма-всплески. Основные феноменологические данные. Методы наблюдений. Проблема компактности и необходимость релятивистского течения. Основные физические модели. Модели излучения гамма всплесков.

16. Послесвечения космических гамма-всплесков. Релятивистские радиационно-доминированные ударные волны. Комптонизация излучения и её наблюдательная проверка. Альтернативные модели излучения. Связь с гравитационными событиями.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоятельная работа студентов	
		Общая трудоемкость	в том числе			Лекций		
			ауд.	занятий	Семинаров			
Астрофизика высоких энергий	2	72	36	36	0	36		

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «Астрофизика сверхвысоких энергий» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; решение типовых задач, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются при проведении промежуточной аттестации в виде коллоквиума, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Введение в астрофизику сверхвысоких энергий	4	2	-	-	2	Собеседование, опрос
2	Релятивистские эффекты	4	2	-	-	2	
3	Синхротронное излучение и Комptonовское рассеяние	4	2	-	-	2	
4	Адронные процессы	4	2	-	-	2	
5	Эффекты Рождения и аннигиляции пар	4	2	-	-	2	
6	Методы наблюдений	4	2	-	-	2	
7	Ускорение космических лучей и излучение Галактики	4	2	-	-	2	
7	Остатки сверхновых, плерионы и гамма двойные	10	6	-	-	4	
8	Активные ядра галактик	10	6	-	-	4	
9	Нейтрино сверх высоких энергий	4	2	-	-	2	
10	Космические гамма-всплески	8	4	-	-	4	
	Промежуточная аттестация	4				4	
<b>ИТОГО:</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>36</b>	Зачет в форме устного доклада работы с последующим собеседованием

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Астрофизика сверхвысоких энергий» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Астрофизика сверхвысоких энергий» проводится в форме зачета. Зачет проводится в форме устного доклада по анализу предложенной оригинальной научной работы с последующим собеседованием по программе спецкурса.

Результаты сдачи зачета оцениваются по шкале «зачет» или «незачет».

## 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

### Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения				
		зачет			
	незачет	3	4	5	
ЗНАТЬ: фундаментальные законы взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязь с астрофизическими источниками	Отсутствие знаний фундаментальных законов взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками	В целом успешные, но не систематически знания фундаментальных законов взаимодействия излучения и	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания фундаментальных законов	Успешные и систематически знания фундаментальных законов взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с	

источниками сверхвысоких энергий УК-1 З-1	сверхвысоких энергий	вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками сверхвысоких энергий	взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками сверхвысоких энергий	астрофизическими источниками сверхвысоких энергий
ЗНАТЬ: основные понятия и методы наблюдений астрофизики сверхвысоких энергий УК-1 З-2	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных понятий и методов наблюдений астрофизики сверхвысоких энергий	В целом успешное, но не систематическое знание основных понятий и методов наблюдений астрофизики сверхвысоких энергий	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы знание основных понятий и методов наблюдений астрофизики сверхвысоких энергий	Успешное и систематическо е знание основных понятий и методов наблюдений астрофизики сверхвысоких энергий
ЗНАТЬ: основные математические методы, используемые при решении задач астрофизики сверхвысоких энергий ОПК-1 З-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, при решении задач астрофизики сверхвысоких энергий	В целом успешное, но не систематическо е применение основных математически х методов, при решении задач астрофизики сверхвысоких энергий	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы знание основных математически х методов, при решении задач астрофизики сверхвысоких энергий	Успешное и систематическо е знание основных математически х методов, при решении задач астрофизики сверхвысоких энергий
УМЕТЬ: строить теоретические модели астрофизических источников, используя критически анализ данных УК-1 У-1	Отсутствие умения строить теоретические модели астрофизических источников, используя критически анализ данных	В целом успешное, но не систематическо е умение строить теоретические модели астрофизических источников, используя критически анализ данных	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение строить теоретические модели астрофизических источников, используя критически анализ данных	Успешное и систематическо е умение строить теоретические модели астрофизических источников, используя критически анализ данных
УМЕТЬ: планировать и проводить	Отсутствие умения планировать и проводить	В целом успешное, но не	В целом успешно е, но	Успешное и систематическо е планировать

экспериментальные исследования в области астрофизики сверхвысоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений УК-1 У-2	экспериментальные исследования в области астрофизики сверхвысоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений	систематическое умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики сверхвысоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений	содержащее отдельные пробелы умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики сверхвысоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений	и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики сверхвысоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений
УМЕТЬ: решать типовые задачи астрофизики сверхвысоких энергий ОПК-1 У-1	Отсутствие умения решать типовые задачи	В целом успешное, но не систематическое умение решать типовые задачи	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение решать типовые задачи	Успешное и систематическое умение решать типовые задачи
УМЕТЬ: строить математические модели явлений и процессов в астрофизических источниках ОПК-1 У-2	Отсутствие умения строить математические модели физических явлений и процессов	В целом успешное, но не систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение строить математические модели физических явлений и процессов	Успешное и систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов
ВЛАДЕТЬ: математическим аппаратом, применяемым в астрофизике сверхвысоких энергий УК-1 В-1	Отсутствие/фрагментарное владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике сверхвысоких	В целом успешное, но не систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом,	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы владение математическим аппаратом,	Успешное и систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизики

	энергий	применяемым в астрофизики сверхвысоких энергий	математическим аппаратом, применяемым в астрофизики сверхвысоких энергий	сверхвысоких энергий
ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике сверхвысоких энергий УК-1 В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике сверхвысоких энергий	В целом успешное, но не систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике сверхвысоких энергий	В целом успешное, но не содержащее отдельные пробелы владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике сверхвысоких энергий	Успешное и систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике сверхвысоких энергий
ВЛАДЕТЬ: навыками проведения астрофизического эксперимента и обработки его результатов ОПК-1 В-1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками проведения астрофизического эксперимента и обработки его результатов	В целом успешное, но не систематическое владение навыками проведения астрофизического эксперимента и обработки его результатов	В целом успешное, но не содержащее отдельные пробелы владение навыками проведения астрофизического эксперимента и обработки его результатов	Успешное и систематическое владение навыками проведения астрофизического эксперимента и обработки его результатов

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

### Примеры типовых вопросов

1. В остатке сверхновой на расстоянии 1 кпк наблюдают в рентгене (1 кэВ) филаменты толщиной 1 угловая секунда. Оцените магнитное поле в источнике, предполагая синхротронный характер излучения и скорость ударной волны 3 000 км/с.
2. Оцените доплер-фактор наблюдаемого блока от квазара по если его наблюдаемая светимость  $10^{46}$  эрг/с, характерное время переменности 5 мин, а плотность излучения в блоке 300 эрг на куб сантиметр.
3. Обоснуйте преимущества и недостатки Черенковских телескопов по сравнению с детекторами на космических аппаратах.

4. Объясните наличие горизонта при наблюдении внегалактических источников 10 ТэВ-ных фотонов во Вселенной.
5. Объясните необходимость релятивистского характера течения в космических гамма-всплесках из условия выхода МэВ-ных фотонов из компактного источника с временной мс переменностью.
6. Объясните наблюдаемую мощность наблюдаемых релятивистских джетов от активных ядер галактик, используя механизм Блэндфорда-Знаека.

### **13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

#### ***Материалы промежуточной аттестации обучающихся***

*Вопросы к зачету соответствуют темам лекций*

#### ***Примеры:***

Формула Лармора и ее релятивистское обобщение.

Релятивистские инварианты в излучении. Преобразование наблюдаемого потока от нетеплового астрофизического источника со степенным спектром.

Излучение плерионов..

Ускорение магнитнодоминированных струйных выбросов. Необходимые факторы.

Механизмы излучения остатков сверхновых.

Критика моделей быстрой переменности гамма излучения в активных ядрах галактик.

Методы наблюдения космических лучей и нейтрино.

Модели послесвечений гамма-всплесков и их наблюдательная проверка.

Механизм Блэндфорда-Знаека извлечения энергии вращения из вращающихся сверх массивных черных дыр

### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

Основная литература.

1. J. Rybicki, A. Lightman “Radiative Processes in Astrophysics”, Whiley and sons, 1979
2. В.В. Соболев «Курс теоретической астрофизики» (Изд. 3е), М.:Наука, 1985
3. А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (3е изд), Фрязино: Век-2, 2015
4. В.С. Бескин «Оссесимметричные стационарные течения в астрофизике» М.: Физматлит, 2006

Дополнительная литература.

**Дополнительные научные статьи, обеспечивающие курс**

1. F. Aharonian «Very High Energy Cosmic Gamma Radiation», World Scientific, 2004
2. Cherenkov Telescope Array Consortium “Science with the Cherenkov Telescope Array” Published by World Scientific Publishing, 2019, <https://arxiv.org/pdf/1709.07997.pdf>
3. Я.Б. Зельдович «Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением» УФН **115** 161–197 (1975)
4. Begelman M.C., Blandford R., Rees M.J. Theory of extragalactic radio sources. Rev. Mod. Phys. 56, 255 (1984).
5. F. Halzen “High-energy neutrino astrophysics”, Nature Physics 13, 3, 232 (2017)

**Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Астрономия».

Курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.