

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Астрофизика сверхвысоких энергий
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: М.В. Барков, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической астрофизики и квантовой теории поля 23.03.2023

## Аннотация

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 подробно обсуждаются наблюдательные свойства объектов и методы моделирования физических механизмов в контексте источников сверхвысоких энергий: пульсаров, активных ядер галактик, остатков сверхновых, гамма всплесков.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Целью освоения курса астрофизики сверхвысоких энергий является ознакомление студентов с основными источниками жесткого гамма-излучения, методами его регистрации и процессами излучения жестких фотонов. Представление наиболее реалистичных моделей источников излучения и критический разбор наиболее популярных из них.

### Задачи дисциплины

Ознакомление студентов с современным состоянием астрофизики сверхвысоких энергий. Усвоение студентами основных физических процессов характерных для АСВЭ. Обучение их решению простых задач, которые позволяют проверить реализуемость обсуждаемых моделей.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов

ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
---	---

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные наблюдательные данные и свойства источников в АСВЭ. Основные каналы излучения энергичных фотонов. Процессы ускорения нетепловых частиц. Методы и инструменты регистрации высокоэнергичных фотонов, нейтрино и космических лучей.

уметь:

Критически оценивать модели, обсуждаемые в АСВЭ и уметь оценивать основные параметры излучающих систем.

владеть:

Современным состоянием развития АСВЭ.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение	2	2		2
2	Элементы гидродинамики	2	2		3
3	Релятивистские инварианты	2	2		3
4	Синхротронное и комптоновское излучение	2	2		3
5	Рождение и аннигиляция пар	2	2		3
6	Адронные процессы	2	2		3
7	Методы детектирования гамма излучения	2	2		3
8	Космические лучи. Ферми ускорение	2	2		3
9	Механизм Блэндфорда-Знаека и джеты	2	2		3
10	Остатки сверхновых	2	2		3
11	Плерионы	2	2		3
12	Гамма яркие двойные звезды	2	2		3
13	Активные ядра галактик и квазаров	1	1		2
14	Быстрая переменность в активных ядрах галактик	1	1		2
15	Космические гамма-всплески	2	2		3
16	Многоволновая астрономия	2	2		3
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

## 1. Введение

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

## 2. Элементы гидродинамики

Введение в гидродинамику. Условия на разрыве. Ударная адиабата, задача о произвольном разрыве. Решение Седова. Решение Блэндфорда-Макки.

## 3. Релятивистские инварианты

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

## 4. Синхротронное и комптоновское излучение

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.

## 5. Рождение и аннигиляция пар

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. Адронные процессы

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

## 7. Методы детектирования гамма излучения

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

## 8. Космические лучи. Ферми ускорение

Космические лучи. Ферми ускорение. Пересоединения. Критерий Хиласа. Гамма-излучение галактического диска и галактического центра.

## 9. Механизм Блэндфорда-Знаека и джеты

Механизм Блэндфорда-Знаека и Блэндфорда-Пэйна. Ускорение и коллимация струйных выбросов. (Приближенный вывод мощности механизма БЗ).

## 10. Остатки сверхновых

Остатки сверхновых. Ускорение космических лучей и напряженность магнитного поля. Лептонные и адронные модели излучения. Пузыри Ферми и eROSITA. Оценка физических параметров.

## 11. Перионы

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

## 12. Гамма яркие двойные звезды

Гамма яркие двойные звезды. Наблюдения и возможные модели.

## 13. Активные ядра галактик и квазаров

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

## 14. Быстрая переменность в активных ядрах галактик

Быстрая переменность в активных ядрах галактик, модели, моделирование и критика. (Размер излучающего источника).

## 15. Космические гамма-всплески

Космические гамма-всплески. Основные феноменологические данные. Методы наблюдений. Проблема компактности и необходимость релятивистского течения. Основные физические модели. Модели излучения гамма всплесков.  
(Оценка оптической толщи ГВ, ограничение на Лоренц фактор)

## 16. Многоволновая астрономия

Многоволновая астрономия, гравитационные волны и нейтрино. Детекторы гравитационных волн. Детекторы нейтрино высоких энергий.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Курс теоретической астрофизики [Текст] : учебное пособие / В. В. Соболев .— / 3-е изд., перераб. — М. : Наука, 1985 .— 503 с.
2. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике [Текст] : учеб. пособие для вузов по направлению 010600 "Физика" и специальностям 010701 "Физика" и 010702 "Астрономия" / В. С. Бескин .— М. : Физматлит, 2005 .— 384 с.
3. J. Rybicki, A. Lightman "Radiative Processes in Astrophysics", Wiley and sons, 1979
4. А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (3е изд), Фрязино: Век-2, 2015

### Дополнительная литература

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)
6. А.С. Позаненко Позаненко, А.; Барков, М.; Минаев, П.; Вольнова, А. «Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели», Письма в Астрономический журнал, том 47, №12, с. 823–865 (2021) doi: 10.31857/S0320010821120032

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Для дистанционных занятий могут быть использованы Яндекс-телемост, wxMaxima.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену и дифференцированному зачету.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	М.В. Барков, д-р физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Астрофизика сверхвысоких энергий» обучающийся должен:

### знать:

Основные наблюдательные данные и свойства источников в АСВЭ. Основные каналы излучения энергичных фотонов. Процессы ускорения нетепловых частиц. Методы и инструменты регистрации высокоэнергичных фотонов, нейтрино и космических лучей.

### уметь:

Критически оценивать модели, обсуждаемые в АСВЭ и уметь оценивать основные параметры излучающих систем.

### владеть:

Современным состоянием развития АСВЭ.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю



С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.

#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов:

1. Формула Лармора и ее релятивистское обобщение.
2. Релятивистские инварианты в излучении. Преобразование наблюдаемого потока от нетеплового астрофизического источника со степенным спектром.
3. Излучение плерионов.
4. Ускорение магнитнодоминированных струйных выбросов. Необходимые факторы.
5. Механизмы излучения остатков сверхновых.
6. Критика моделей быстрой переменности гамма излучения в активных ядрах галактик.
7. Методы наблюдения космических лучей и нейтрино.
8. Модели послесвечений гамма-всплесков и их наблюдательная проверка.
9. Механизм Блэндфорда-Знаека извлечения энергии вращения из вращающихся сверхмассивных черных дыр.

Примеры контрольных заданий:

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 облачка от квазара по если его наблюдаемая светимость 1046 эрг/с, характерное время переменности 5 мин, а плотность излучения в облачке 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.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Механизм Блэндфорда-Знаека извлечения энергии вращения из вращающихся сверхмассивных черных дыр.
2. Принцип работы и характеристики Черенковских телескопов.

Билет 2.

1. Модели послесвечений гамма-всплесков и их наблюдательная проверка.
2. Формула Лармора и ее релятивистское обобщение.

Билет 3.

1. Методы наблюдения космических лучей и нейтрино.
2. Излучение плерионов.

Билет 4.

1. Критика моделей быстрой переменности гамма излучения в активных ядрах галактик.
2. Адронные процессы рождения фотонов и нейтрино.

Билет 5.

1. Механизмы излучения остатков сверхновых

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

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.