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

| <b>УТВЕРЖДАЮ</b> Помом физимосто формул дого       |
|--|
| Декан физического факультета<br>МГУ                |
| / Н.Н. Сысоев /                                    |
| « <u> </u>   |
| РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ                       |
| Наименование дисциплины:                           |
| АСТРОФИЗИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ                   |
| <b>Уровень высшего образования:</b><br>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.

| Гол (  | толы) | приема на обучение        |  |
|--------|-------|---------------------------|--|
| т Од ( | тоды  | iipiiciia iia ooy iciiiic |  |

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

#### 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, протонпротонное, фотомезонное взаимодействие). Черенковское излучение релятивистских частиц. Потери энергии заряженных частиц при распространении в межгалактической среде. Эффект Грйзена-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 Блэндфорда-Знаека и Блэндфорда-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 гравволновыми событиями.

#### 7. Объем дисциплины

|                             | ×                                | 🔀 объем учебной нагрузки в   |                                 |        |           | . часах                             |
|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------|-----------|-------------------------------------|
|                             | кость                            | TЪ                           | в том числе<br>ауд. занятий     |        |           | ная                                 |
| НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ         | Трудоемкость<br>в зачетных едини | зачетных<br>Обща<br>трудоемк | Общая<br>аудиторная<br>нагрузка | Лекций | Семинаров | Самостоятельная<br>работа студентов |
| 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.

| _        |                                    | Виды учебной нагрузки и<br>их трудоемкость, часы | Форма<br>текущего                                |
|----------|------------------------------------|--|--|
| Nº Tembi | Наименование<br>раздела дисциплины |  | контроля успеваемости и промежуточной аттестации |

|        |   | Всего часов | Лекции | Научно-практические<br>занятия | Семинары | Самостоятельная<br>работа |                               |
|--------|---|-------------|--------|--------------------------------|----------|---------------------------|-------------------------------|
| 1      | Введение в астрофизику сверхвысоких энергий       | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 2      | Релятивистские эффекты                            | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 3      | Синхротронное излучение и Комптоновское рассеяние | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 4      | Адронные процессы                                 | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 5      | Эффекты Рождения и<br>аннигиляции пар             | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 6      | Методы наблюдений                                 | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 7      | Ускорение космических лучей и излучение Галактики | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         | Собеседование, опрос          |
| 7      | Остатки сверхновых,<br>плерионы и гамма двойные   | 10          | 6      | -                              | -        | 4                         |                               |
| 8      | Активные ядра галактик                            | 10          | 6      | -                              | -        | 4                         |                               |
| 9      | Нейтрино сверх высоких<br>энергий                 | 4           | 2      | -                              | -        | 2                         |                               |
| 10     | Космические гамма-<br>всплески                    | 8           | 4      | -                              | -        | 4                         |                               |
|        | Промежуточная аттестация                          | 4           |        |                                |          | 4                         |                               |
| итого: | 72  | 72          | 36     | -                              | -        | 36                        |                               |
|        |   |             |        |                                |          |                           | 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              |
|---|---|--|
|   | Оценочные средства текущего контроля  |  |
| 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<br>(в форме беседы,<br>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,<br>изучаемых в<br>рамках<br>дисциплины   |
| Тестирование  | Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.  | Образцы тестов   |
| <u>O</u> 1  | еночные средства промежуточной аттестации   |  |
| 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<br>порядку<br>проведения<br>собеседования |

### 11. Шкала оценивания.

| Планируемые   | Критери           | ии оценивания результатов обучения |               |                |  |  |  |
|---------------|-------------------|------------------------------------|---------------|----------------|--|--|--|
| результаты    |                   | зачет                              |               |                |  |  |  |
| обучения      | незачет           | 3                                  | 3 4           |                |  |  |  |
| ЗНАТЬ:        | Отсутствие знаний | В целом                            | В             | Успешные и     |  |  |  |
| фундаментальн | фундаментальных   | успешные, но                       | целом успешно | систематически |  |  |  |
| ые законы     | законов           | не                                 | е, но         | е знания       |  |  |  |
| взаимодействи | взаимодействия    | систематически                     | содержащее    | фундаментальн  |  |  |  |
| я излучения и | излучения и       | е знания                           | отдельные     | ых законов     |  |  |  |
| вещества и их | вещества и их     | фундаментальн                      | пробелы       | взаимодействи  |  |  |  |
| взаимосвязь с | взаимосвязи с     | ых законов                         | знания        | я излучения и  |  |  |  |
| астрофизическ | астрофизическими  | взаимодействи                      | фундаментальн | вещества и их  |  |  |  |
| ИМИ           | источниками       | я излучения и                      | ых законов    | взаимосвязи с  |  |  |  |

| источниками    | сверхвысоких      | вещества и их  | взаимодействи  | астрофизическ           |
|----------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------------|
| сверхвысоких   | энергий           | взаимосвязи с  | я излучения и  | ими                     |
| энергий        | энергии           | астрофизическ  | вещества и их  | источниками             |
| УК-1 3-1       |                   | ими            | взаимосвязи с  |                         |
| y K-1 3-1      |                   |                |                | сверхвысоких<br>энергий |
|                |                   | источниками    | астрофизическ  | энергии                 |
|                |                   | сверхвысоких   | ИМИ            |                         |
|                |                   | энергий        | источниками    |                         |
|                |                   |                | сверхвысоких   |                         |
| 277 / 527      |                   |                | энергий        | **                      |
| ЗНАТЬ:         | Отсутствие знаний | В целом        | В              | Успешное и              |
| основные       | или фрагментарное | успешное, но   | целом успешно  | систематическо          |
| и киткноп      | знание основных   | не             | е, но          | е знание                |
| методы         | понятий и методов | систематическо | содержащее     | основных                |
| наблюдений     | наблюдений        | е знание       | отдельные      | понятий и               |
| астрофизики    | астрофизики       | основных       | пробелы знание | методов                 |
| сверхвысоких   | сверхвысоких      | понятий и      | основных       | наблюдений              |
| энергий        | энергий           | методов        | понятий и      | астрофизики             |
| УК-1 3-2       |                   | наблюдений     | методов        | сверхвысоких            |
|                |                   | астрофизики    | наблюдений     | энергий                 |
|                |                   | сверхвысоких   | астрофизики    |                         |
|                |                   | энергий        | сверхвысоких   |                         |
|                |                   |                | энергий        |                         |
| ЗНАТЬ:         | Отсутствие знаний | В целом        | В              | Успешное и              |
| основные       | или фрагментарное | успешное, но   | целом успешно  | систематическо          |
| математически  | применение        | не             | е, но          | е знание                |
| е методы,      | основных          | систематическо | содержащее     | основных                |
| используемые   | математических    | е применение   | отдельные      | математически           |
| при решении    | методов, при      | основных       | пробелы знание | х методов, при          |
| задач          | решении задач     | математически  | основных       | решении задач           |
| астрофизики    | астрофизики       | х методов, при | математически  | астрофизики             |
| сверхвысоких   | сверхвысоких      | решении задач  | х методов, при | сверхвысоких            |
| энергий ОПК-1  | энергий           | астрофизики    | решении задач  | энергий                 |
| 3-1            |                   | сверхвысоких   | астрофизики    | 1                       |
|                |                   | энергий        | сверхвысоких   |                         |
|                |                   | · · · · ·      | энергий        |                         |
| УМЕТЬ:         | Отсутствие умения | В целом        | В              | Успешное и              |
| строить        | строить           | успешное, но   | целом успешно  | систематическо          |
| теоретические  | теоретические     | не             | е, но          | е умение                |
| модели         | модели            | систематическо | содержащее     | строить                 |
| астрофизическ  | астрофизических   | е умение       | отдельные      | теоретические           |
| их источников, | источников,       | строить        | пробелы        | модели                  |
| используя      | используя         | теоретические  | умение строить | астрофизическ           |
| критически     | критически анализ | модели         | теоретические  | их источников,          |
| анализ данных  | данных            | астрофизическ  | модели         | используя               |
| УК-1 У-1       | 741111111         | их источников, | астрофизическ  | критически              |
|                |                   | используя      | их источников, | анализ данных           |
|                |                   | критически     | используя      | аншин данных            |
|                |                   | анализ данных  | критически     |                         |
|                |                   | анализ данных  | анализ данных  |                         |
| УМЕТЬ:         | Отсутствие умения | В целом        | В              | Успешное и              |
| планировать и  | планировать и     | успешное, но   | целом успешно  | систематическо          |
| проводить      | проводить         | не             | е, но          |                         |
| проводить      | проводить         | пс             | С, но          | е планировать           |

|                | T                    | T               | T                |                        |
|----------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------------|
| экспериментал  | экспериментальные    | систематическо  | содержащее       | и проводить            |
| ьные           | исследования в       | е умение        | отдельные        | экспериментал          |
| исследования в | области астрофизики  | планировать и   | пробелы          | ьные                   |
| области        | сверхвысоких         | проводить       | умение           | исследования в         |
| астрофизики    | энергий, объяснять и | экспериментал   | планировать и    | области                |
| сверхвысоких   | оценивать в рамках   | ьные            | проводить        | астрофизики            |
| энергий,       | основных             | исследования в  | экспериментал    | сверхвысоких           |
| объяснять и    | физических законов   | области         | ьные             | энергий,               |
| оценивать в    | результаты,          | астрофизики     | исследования в   | объяснять и            |
| рамках         | полученные в         | сверхвысоких    | области          | оценивать в            |
| ОСНОВНЫХ       | процессе             | энергий,        | астрофизики      | рамках                 |
|                | -                    | объяснять и     |                  | <del>*</del>           |
| физических     | наблюдений           |                 | сверхвысоких     | ОСНОВНЫХ               |
| законов        |                      | оценивать в     | энергий,         | физических             |
| результаты,    |                      | рамках          | объяснять и      | законов                |
| полученные в   |                      | основных        | оценивать в      | результаты,            |
| процессе       |                      | физических      | рамках           | полученные в           |
| наблюдений     |                      | законов         | основных         | процессе               |
| УК-1 У-2       |                      | результаты,     | физических       | наблюдений             |
|                |                      | полученные в    | законов          |                        |
|                |                      | процессе        | результаты,      |                        |
|                |                      | наблюдений      | полученные в     |                        |
|                |                      |                 | процессе         |                        |
|                |                      |                 | наблюдений       |                        |
| УМЕТЬ:         | Отсутствие умения    | В целом         | В                | Успешное и             |
| решать         | решать типовые       | успешное, но    | целом успешно    | систематическо         |
| типовые задачи | задачи               | не              | е, но            | е умение               |
| астрофизики    | Sugu III             | систематическо  | содержащее       | решать                 |
| сверхвысоких   |                      | е умение        | отдельные        | типовые задачи         |
| энергий        |                      |                 | пробелы          | типовые задачи         |
| ОПК-1 У-1      |                      | решать          | -                |                        |
| Olik-1 y-1     |                      | типовые задачи  | умение решать    |                        |
| VMETI.         | 0                    | Dynamak         | типовые задачи В | Variation              |
| УМЕТЬ:         | Отсутствие умения    | В целом         |                  | Успешное и             |
| строить        | строить              | успешное, но    | целом успешно    | систематическо         |
| математически  | математические       | не              | е, но            | е умение               |
| е модели       | модели физических    | систематическо  | содержащее       | строить                |
| явлений и      | явлений и процессов  | е умение        | отдельные        | математически          |
| процессов в    |                      | строить         | пробелы          | е модели               |
| астрофизическ  |                      | математически   | умение строить   | физических             |
| их источниках  |                      | е модели        | математически    | явлений и              |
| ОПК-1 У-2      |                      | физических      | е модели         | процессов              |
|                |                      | явлений и       | физических       |                        |
|                |                      | процессов       | явлений и        |                        |
|                |                      | _               | процессов        |                        |
| ВЛАДЕТЬ:       | Отсутствие/фрагмент  | В целом         | В                | Успешное и             |
| математически  | арное владение       | успешное, но    | целом успешно    | систематическо         |
| м аппаратом,   | математическим       | не              | е, но            | е владение             |
| применяемым в  | аппаратом,           | систематическо  | содержащее       | математически          |
| астрофизике    | математическим       | е владение      | отдельные        | м аппаратом,           |
| сверхвысоких   | аппаратом,           | математически   | пробелы          | математически          |
| энергий        | применяемым в        | м аппаратом,    | владение         | м аппаратом,           |
| УК-1 B-1       | астрофизики          | математически   | математически    | применяемым в          |
| 3 K-1 D-1      | сверхвысоких         | м аппаратом,    | м аппаратом,     | астрофизики            |
|                |                      | L M ALLIANATION | г мганнанатом    | - AL LIBERTHA 314 K 14 |

|                | avvanevvii          | принондомини   | MOTOMOTHINOOMI | anany ni taotatiy |
|----------------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|
|                | энергий             | применяемым в  | математически  | сверхвысоких      |
|                |                     | астрофизики    | м аппаратом,   | энергий           |
|                |                     | сверхвысоких   | применяемым в  |                   |
|                |                     | энергий        | астрофизики    |                   |
|                |                     |                | сверхвысоких   |                   |
|                |                     |                | энергий        |                   |
| ВЛАДЕТЬ:       | Отсутствие/фрагмент | В целом        | В              | Успешное и        |
| методами       | арное владение      | успешное, но   | целом успешно  | систематическо    |
| теоретического | методами            | не             | е, но          | е владение        |
| исследования   | теоретического      | систематическо | содержащее     | методами          |
| явлений и      | исследования        | е владение     | отдельные      | теоретического    |
| процессов в    | явлений и процессов | методами       | пробелы        | исследования      |
| астрофизике    | В                   | теоретического | владение       | явлений и         |
| сверхвысоких   | астрофизике         | исследования   | методами       | процессов в       |
| энергий        | сверхвысоких        | явлений и      | теоретического | астрофизике       |
| УК-1 В-2       | энергий             | процессов в    | исследования   | сверхвысоких      |
|                | _                   | астрофизике    | явлений и      | энергий           |
|                |                     | сверхвысоких   | процессов в    |                   |
|                |                     | энергий        | астрофизике    |                   |
|                |                     | 1              | сверхвысоких   |                   |
|                |                     |                | энергий        |                   |
| ВЛАДЕТЬ:       | Отсутствие/фрагмент | В целом        | В              | Успешное и        |
| навыками       | арное владение      | успешное, но   | целом успешно  | систематическо    |
| проведения     | навыками            | не             | е, но          | е владение        |
| астрофизическ  | проведения          | систематическо | содержащее     | навыками          |
| ого            | астрофизического    | е владение     | отдельные      | проведения        |
| эксперимента и | эксперимента и      | навыками       | пробелы        | астрофизическ     |
| обработки его  | обработки его       | проведения     | владение       | ОГО               |
| результатов    | результатов         | астрофизическ  | навыками       | эксперимента и    |
| ОПК-1 В-1      | Pesignatur          | ого            | проведения     | обработки его     |
|                |                     | эксперимента и | астрофизическ  | результатов       |
|                |                     | обработки его  | ого            | Posymbianob       |
|                |                     | результатов    | эксперимента и |                   |
|                |                     | Posymbiatob    | обработки его  |                   |
|                |                     |                | 1              |                   |
|                |                     |                | результатов    |                   |

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

#### Примеры типовых вопросов

- **1.** В остатке сверхновой на растоянии 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 блоба от квазара по если его наблюдаемая светимость  $10^{46}$  эрг/с, характерное время переменности 5 мин, а плотность излучения в блобе 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 гаммавсплесках 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 сверхмассивных 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. 3e), М.: Наука, 1985
- 3. А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (Зе изд), Фрязино: Век-2, 2015
- 4. В.С. Бескин «Осесимметричные 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 «<u>Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением</u>» 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.