

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 ВЫСОКИХ 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., профессор, Постнов Константин Александрович, кафедра астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Постнов Константин Александрович

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Астрофизика высоких энергий»

Вводный курс в астрофизику высоких энергий, изучающую процессы формирования тепловых и нетепловых спектров в высокотемпературной и релятивистской плазме в реальных космических источниках (в горячем газе в скоплениях галактик, вокруг релятивистских объектов – нейтронных звёзд и чёрных дыр в тесных двойных системах, в пульсарах и в ядрах активных галактик и квазарах и т.д.). В первой части курса систематически рассматриваются синхротронное излучение, комптоновское рассеяние, многократное комптоновское рассеяние, ускорение и формирование нетепловых спектров релятивистских заряженных частиц. В второй части обсуждается приложение изученных физических механизмов к пульсарам и ядрам галактик (электродинамика пульсаров, формирование синхрокомптоновских спектров в квазарах, механизмы активности галактических ядер, в т.ч. механизм Блэндрфорда-Знаека, а также космические гамма-всплески).

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 высоких энергий» реализуется на 5-ом курсе в 10-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 учебным 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.Б | <p>З-1 Знать: фундаментальные законы взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязь с астрофизическими источниками высоких энергий</p> <p>З-2 Знать: основные экспериментальные методы регистрации жесткого электромагнитного излучения, нейтрино и космических лучей</p> <p>У-1 Уметь: строить теоретические модели астрофизических источников высоких энергий, используя критически анализ данных</p> <p>У-2 Уметь: объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе астрофизических наблюдений</p> <p>В-1 Владеть: математическим аппаратом, применяемым в астрофизике высоких энергий</p> <p>В-2 Владеть: методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике высоких энергий</p> |
| ОПК-1.Б | <p>З-1 Знать: основные математические методы, используемые при анализе источников высоких энергий в астрофизике</p> <p>У-1 Уметь: строить математические модели явлений и процессов излучения в астрофизических источниках высоких энергий</p> <p>В-1 Владеть: навыками анализа данных наблюдений в области астрофизики высоких энергий</p> |

1. **Форма обучения:** очная.

2. **Язык обучения:** русский.

3. Содержание дисциплины

1. Классическая теория излучения. Излучение ускоренно движущегося заряда. Потенциалы Лиенара-Вихерда. Волновая зона. Формула Лармора для дипольного излучения. Поляризация излучения.
2. Релятивистская кинематика. Преобразования Лоренца. Преобразования скоростей. Релятивистская аберрация. Преобразование величин, относящихся к излучению (мощность в единичный телесный угол, интенсивность, яркостная температура, поток излучения (для степенного спектра), коэффициенты излучения и поглощения). Релятивистские инварианты.
3. Релятивистское обобщение формулы Лармора. Синхротронное излучение одного электрона. Полные потери энергии. Спектр СИ для одного электрона и для степенного распределения электронов по энергиям. Поляризация синхротронного излучения. Квантовые эффекты. Излучение кривизны.
4. Томсоновское рассеяние. Дифференциальное и полное сечения, поляризация. Формула Комптона. Обратное комптоновское рассеяние в томсоновском приближении. Потери энергии одного электрона при комптоновском рассеянии.
5. Синхротронное самопоглощение. Зависимость функции источника от частоты и магнитного поля в рэлей-джинсовском пределе. Формула Слыша. Комптоновская катастрофа и предел яркостной температуры компактных радиоисточников. Оценка Лоренц-фактора джетов в блазарах по яркостной температуре.
6. Адронные процессы. Электромагнитные каскады. Черенковское излучение релятивистских частиц. Потери энергии заряженных частиц при распространении в межгалактической среде. Эффект Грйзена-Зацепина-Кузьмина. Проблема генерации космических лучей сверхвысоких энергий.
7. Формирование спектров астрофизических источников. Уравнение Фоккера-Планка. Примеры формирования стационарных спектров синхротронных источников. Синхротрон-комптоновские спектры оптически тонких источников.
8. Формирование степенных спектров заряженных частиц. Механизм Ферми 1 и 2 рода. Универсальный показатель спектра для случая сильной ударной волны.
9. Многократное комптоновское рассеяние. Параметр комптонизации u и его физический смысл. Формирование степенного спектра в оптически тонких источниках.
10. Уравнение Компанейца, основные идеи вывода из кинетического уравнения Больцмана, границы применимости. Примеры аналитических решений. Ненасыщенная и насыщенная комптонизация.
11. Примеры комптонизации в астрофизической плазме. Модифицированный чернотельный спектр тепловой плазмы с учетом рассеяния. Эффект Сюняева-Зельдовича для реликтового излучения.
12. 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.

13. Электродинамика пульсаров. Основные уравнения и решение для бессиловой магнитосферы. Современные представления о потерях энергии вращения нейтронных звёзд в пульсарах и наблюдательная проверка.

14. Активные ядра галактик и квазаров. Основные наблюдаемые характеристики и феноменологические зависимости. Физические механизмы активности. Механизм Блэндфорда-Знаека. Наблюдательные проверки.

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

16. Послесвечения космических гамма-всплесков. Релятивистские ударные волны. Седовская длина, её релятивистское обобщение. Синхротронная модель послесвечений и её наблюдательная проверка. Астрофизика гамма-всплесков. Связь с эволюцией массивных звёзд. Космологические приложения.

7. Объем дисциплины

| НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ | Трудоемкость в зачетных единицах | объем учебной нагрузки в ак. часах | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|-----------|-------------------------------------|
| | | Общая трудоемкость | в том числе ауд. занятий | | | Самостоятельная работа студентов |
| | | | Общая аудиторная нагрузка | Лекций | Семинаров | |
| Астрофизика высоких энергий | 2 | 72 | 34 | 34 | 0 | 38 |

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

Изучение курса «Астрофизика высоких 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 | Классическая теория излучения | 4 | 2 | - | - | 2 | Собеседование, опрос |
| 2 | Релятивистские эффекты и релятивистская формула Лармора | 4 | 2 | - | - | 2 | |
| 3 | Синхротронное излучение и самопоглощение | 8 | 4 | - | - | 4 | |
| 4 | Комптоновское рассеяние | 8 | 4 | - | - | 4 | |
| 5 | Адронные процессы | 4 | 2 | - | - | 2 | |
| 6 | Формирование спектров астрофизических источников. Ускорение частиц. | 8 | 4 | - | - | 4 | |
| 7 | Многokратное комптоновское рассеяние. Комптонизация | 10 | 6 | - | - | 6 | |
| 8 | Рождение и аннигиляция пар | 4 | 2 | - | - | 2 | |
| 9 | Активные ядра галактик | 4 | 2 | - | - | 2 | |
| 10 | Космические гамма-всплески | 8 | 4 | - | - | 4 | |
| | Промежуточная аттестация | 4 | | | | 4 | |
| ИТОГО: | 72 | 72 | 34 | - | - | 38 | |
| | | | | | | | Зачет в форме устного доклада работы с последующим собеседованием |

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Астрофизика высоких 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 высоких 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 (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 |
| Оценочные 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 порядку проведения собеседования |

11. Шкала оценивания.

| Планируемые результаты обучения | Критерии оценивания результатов обучения | | | |
|---------------------------------|--|-------|---|---|
| | незачет | зачет | | |
| | | 3 | 4 | 5 |
| | | | | |

| | | | | |
|---|--|---|--|--|
| <p>ЗНАТЬ: фундаментальные законы взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязь с астрофизическими источниками высоких энергий УК-1.Б 3-1</p> | <p>Отсутствие знаний фундаментальных законов взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками высоких энергий</p> | <p>В целом успешные, но не систематические знания фундаментальных законов взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками высоких энергий</p> | <p>В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания фундаментальных законов взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками высоких энергий</p> | <p>Успешные и систематические знания фундаментальных законов взаимодействия излучения и вещества и их взаимосвязи с астрофизическими источниками высоких энергий</p> |
| <p>ЗНАТЬ: основные понятия математической обработки астрофизических наблюдений УК-1.Б 3-2</p> | <p>Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных понятий математической обработки астрофизических наблюдений</p> | <p>В целом успешное, но не систематическое знание основных понятий математической обработки астрофизических наблюдений</p> | <p>В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных понятий математической обработки астрофизических наблюдений</p> | <p>Успешное и систематическое знание основных понятий математической обработки астрофизических наблюдений</p> |
| <p>ЗНАТЬ: основные математические методы, используемые при решении задач астрофизики высоких энергий ОПК-1.Б 3-1</p> | <p>Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, при решении задач астрофизики высоких энергий</p> | <p>В целом успешное, но не систематическое применение основных математических методов, при решении задач астрофизики высоких энергий</p> | <p>В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных математических методов, при решении задач астрофизики высоких энергий</p> | <p>Успешное и систематическое знание основных математических методов, при решении задач астрофизики высоких энергий</p> |
| <p>УМЕТЬ: строить теоретические модели астрофизических источников,</p> | <p>Отсутствие умения строить теоретические модели астрофизических источников, используя</p> | <p>В целом успешное, но не систематическое умение строить теоретические</p> | <p>В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение строить</p> | <p>Успешное и систематическое умение строить теоретические модели астрофизических источников,</p> |

| | | | | |
|---|---|--|---|--|
| используя критически анализ данных УК-1.Б У-1 | критически анализ данных | модели астрофизических источников, используя критически анализ данных | теоретические модели астрофизических источников, используя критически анализ данных | используя критически анализ данных |
| УМЕТЬ: планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики высоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений УК-1.Б У-2 | Отсутствие умения планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики высоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений | В целом успешное, но не систематическое умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики высоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений | В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики высоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений | Успешное и систематическое планировать и проводить экспериментальные исследования в области астрофизики высоких энергий, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений |
| УМЕТЬ: решать типовые задачи астрофизики высоких энергий ОПК-1.Б У-1 | Отсутствие умения решать типовые задачи | В целом успешное, но не систематическое умение решать типовые задачи | В целом успешно, 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.Б 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, но содержащее отдельные пробелы умение строить математические модели физических явлений и процессов | Успешное и систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов |

| | | | | |
|--|---|--|---|---|
| | | | процессов | |
| ВЛАДЕТЬ: математическим аппаратом, применяемым в астрофизике высоких энергий УК-1.Б В-1 | Отсутствие/фрагментарное владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике высоких энергий | В целом успешное, но не систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике высоких энергий | В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике высоких энергий | Успешное и систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике высоких энергий |
| ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике высоких энергий УК-1.Б В-2 | Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике высоких энергий | В целом успешное, но не систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике высоких энергий | В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике высоких энергий | Успешное и систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике высоких энергий |
| ВЛАДЕТЬ: навыками проведения астрофизического эксперимента и обработки его результатов ОПК-1.Б 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 успешно, но 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. Нетепловой спектр радиоисточника с угловым размером 0.1 угловая секунда имеет максимум на частоте 1 ГГц. Оцените магнитное поле в источнике, предполагая синхротронный характер самопоглощения.
2. Оцените доплер-фактор наблюдаемого джета от квазара по его яркостной температуре 10^{13} К.
3. Оцените параметр комптонизации в типичном скоплении галактик с размером 3 Мпк и плотностью газа 0.1 частица в см^3 .
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.

Синхротронное самопоглощение. Формула Слыша.

Уравнение Компанейца для тепловой плазмы и его простейшие аналитические решения.

Комптонизация в астрофизической плазме. Модифицированный чернотельный спектр тепловой плазмы с учетом рассеяния.

Эффект Сюняева-Зельдовича для реликтового излучения.

Релятивистские ударные волны. Седовская длина, её релятивистское обобщение.

Синхротронная модель послесвечений гамма-всплесков и её 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. М. Лонгейр «Астрофизика высоких энергий», М.: Мир, 1985
2. J. Rybicki, A. Lightman “Radiative Processes in Astrophysics”, Wiley and sons, 1979
3. В.В. Соболев «Курс теоретической астрофизики» (Изд. 3е), М.:Наука, 1985
4. А.В. Засов, К.А. Постнов «Общая астрофизика» (3е изд), Фрязино: Век-2, 2015
5. В.С. Бескин «Осесимметричные стационарные течения в астрофизике» М.: Физматлит, 2006

Дополнительная литература.

1. «Аккреционные процессы в астрофизике» (под ред. Н.И. Шакуры), М.: Физматлит, 2017
2. «Многоканальная астрономия» *под ред. А.М. Черепашука), Фрязино: Век-2, 2019
3. Bing Zhang. «The physics of gamma-ray bursts” Cambridge Univ. Press, 2019

Дополнительные научные статьи, обеспечивающие курс

1. А.А. Вихлинин, А.В. Кравцов, М.Л. Маркевич, Р.А. Сюняев, Е.М. Чуразов «Скопления галактик» УФН **184** 339–366 (2014)
2. А.М. Черепашук «Чёрные дыры в двойных звёздных системах и ядрах галактик» УФН **184** 387–407 (2014)
3. Я.Б. Зельдович «Взаимодействие свободных электронов с электромагнитным излучением» УФН **115** 161–197 (1975)
4. М.С. Лонгейр, Р.А. Сюняев «Электромагнитное излучение во Вселенной» УФН **105** 41–96 (1971)
5. Е.М. Чуразов, Р.А. Сюняев и др. «Аннигиляционное излучение центральной зоны Галактики: результаты обсерватории ИНТЕГРАЛ» УФН **176** 334–339 (2006)
6. Begelman M.C., Blandford R., Rees M.J. Theory of extragalactic radio sources. Rev. Mod. Phys. 56, 255 (1984).

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.