

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ АСТРОФИЗИКА**

**Методические указания по выполнению практических работ**

Направление подготовки 03.03.02 Физика  
Направленность (профиль)  
«Физика Земли и космоса»

**Ставрополь, 2026**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля).....
2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля).
3. Наименование лабораторных занятий
4. Содержание лабораторных занятий
5. Литература ....

### 1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель: формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки «Физика Земли и космоса».

Задачи: освоение современных и классических методов анализа атмосфер звезд и формирование умения применять их к анализу конкретных звезд.

### 2. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля)

В результате изучения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции (в соответствии с образовательным стандартом):

ПК-1 Способен применять фундаментальные знания в области физики и математики для постановки и решения научно-исследовательских и прикладных задач в своей профессиональной деятельности

ПК-3 Понимает логику проектной деятельности и способен, используя междисциплинарные и фундаментальные знания, осуществлять планирование и разработку этапов проектной деятельности, а также достигать поставленных целей при решении задач в области медицинской физики

ПК-4 Способен проводить целенаправленную систематическую работу в области проектно-технологической деятельности

### 3. Наименование лабораторных занятий

| №                | Наименование разделов и тем дисциплины                 | Использование интерактивных форм | Часы |
|------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------|------|
| <b>8 семестр</b> |                                                        |                                  |      |
| 1                | Тема 1. Наблюдаемые характеристики галактик            | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 2                | Тема 2. Пекулярные галактики                           | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 3                | Тема 3. Определение масс галактик                      | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 4                | Тема 4. Эллиптические галактики                        | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 5                | Тема 5. Скопления и группы галактик                    | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 6                | Тема 6. Гамма-барстеры                                 | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 7                | Тема 7. Математические основы классической космологии. | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 8                | Тема 8. Движение частицы в гравитационном поле.        | Решение проблемных задач         | 1.5  |

|    |                                                       |                          |           |
|----|-------------------------------------------------------|--------------------------|-----------|
|    |                                                       |                          |           |
| 9  | Тема 9. Уравнения гравитационного поля.               | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 10 | Тема 10. Синхронная система отсчета.                  | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 11 | Тема 11. Изотропное пространство.                     | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 12 | Тема 12. Красное смещение                             | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 13 | Тема 13. Космический вакуум.                          | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 14 | Тема 14. Взаимодействие света с гравитационным полем. | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 15 | Тема 15. Основные периоды в эволюции Вселенной.       | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 16 | Тема 16. Лептонная стадия в эволюции Вселенной.       | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 17 | Тема 17. Ядерные реакции в горячей Вселенной.         | Решение проблемных задач | 1.5       |
| 18 | Тема 18. Гравитационные волны.                        | Решение проблемных задач | 1.5       |
|    | <b>Итого за семестр</b>                               |                          | <b>27</b> |
|    | <b>Итого</b>                                          |                          | <b>27</b> |

## СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

### Тема 1 «Наблюдаемые характеристики галактик»

**Цель занятия:** изучить наблюдаемые характеристики галактик  
**Организационная форма занятия:** семинар, решение задач

#### Задачи

1. Вывести формулу красного смещения для больших расстояний.
2. По закону Хаббла определить расстояния и лучевые скорости ряда галактик.

3. Рассчитать расстояние до галактики, в которой вспыхнула сверхновая.

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Кратко перечислите особенности E, S, Ir и SO галактик.
2. Перечислите методы определения расстояний до близких и далеких галактик?
3. Напишите закон Хаббла. Что он отражает?
4. Что называется красным смещением?
5. Что называют группой, скоплением, сверхскоплением галактик?
6. Дайте определение поверхностной яркости галактик.
7. Что называется радиусом Холмберга?
8. Напишите закон Вокулера для E-галактик.
9. Каково распределение яркости по поверхности S-галактик?
10. Дайте определение показателя цвета.
11. В чем причина поляризации излучения галактик?
12. Какие спектры называются интегральными, и какие – синтетическими?
13. Какое звездное население в E, S и Ir галактиках?
14. Каково количество HI в нормальных галактиках и как оно определяется?
15. Сколько HI в нормальных галактиках, как он распределен, как светит?
16. Что такое «корональный газ», где он наблюдается?
17. Назовите типы сверхновых, их наблюдаемые характеристики, физическую природу, встречаемость в галактиках.
18. Какова кинематика звезд в E и S галактиках?
19. Какова форма кривых вращения галактик и почему?
20. Сформулируйте словами соотношения Фабера-Джексона и Тулли-Фишера.

***Литература дополнительная:*** 1, 2.

***Интернет-ресурсы:*** 3, 4.

**Тема 2. «Пекулярные галактики».**

***Цель занятия:*** изучить особенности пекулярных галактик.

***Организационная форма занятия:*** дискуссия, решение задач

**Задачи**

Сделать таблицу типов пекулярных галактик с указанием их основных характеристик и особенностей.

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Назовите наблюдательные особенности компактных галактик.
2. Назовите физические характеристики компактных галактик.
3. Чем вызваны особенности компактных галактик?
4. Назовите наблюдательные особенности карликовых галактик.
5. Назовите физические характеристики карликовых галактик.
6. Что представляют собой красные и голубые карликовые галактики?
7. Чем вызвана стадия активности у карликовых галактик?
8. Что называется ядром галактики?
9. Перечислите признаки активности ядер галактик.
10. Перечислите характеристики галактик Сейферта.
11. Назовите общие особенности ядер сейфертовских галактик.
12. Дайте интерпретацию спектра сейфертовских галактик.
13. Перечислите особенности радиогалактик.
14. Какой спектр у радиогалактик и почему?
15. Какие объекты названы лацертидами?
16. Перечислите основные особенности квазаров.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3.

**Интернет-ресурсы:** 2, 3.

### **Тема 3. «Определение масс галактик».**

**Цель занятия:** изучить методы определения масс галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

#### **Задачи**

1. Вывести формулу оценки суммарной массы пары галактик.
2. Вывести теорему вириала в общем случае.
3. Получить формулу для массы галактики по теореме вириала.

#### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Напишите 3-й закон Кеплера.
2. Дайте определения абсолютным и относительным орбитам.
3. Перепишите 3-й закон Кеплера через наблюдаемые характеристики для двойных галактик.
4. Как рассчитать среднее значение геометрического фактора проекции?
5. Что называется оценкой суммарной массы пары галактик?
6. Как модифицируется формула для определения масс галактик с учетом эллиптичности орбит?
7. Для каких галактик можно определять массу по дисперсии скоростей?

8. Какие упрощения делаются при определении масс галактик по дисперсии скоростей?
9. Напишите формулу для определения массы дисков спиральных галактик по видимому распределению поверхностной яркости.
10. Напишите формулу для определения массы балджей спиральных галактик по видимому распределению поверхностной яркости.
11. Напишите формулу для определения массы гало спиральных галактик по видимому распределению поверхностной яркости.
12. Для каких галактики наиболее корректно определять массу по видимому распределению поверхностной яркости и почему?
13. Для каких галактик можно определять массу по кривым вращения?
14. Напишите формулу для определения распределения плотности в спиральных галактиках по кривой вращения.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3.

**Интернет-ресурсы:** 1, 3, 4.

#### **Тема 4. «Эллиптические галактики»**

**Цель занятия:** изучить физические характеристики эллиптических галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

#### **Задачи**

1. Получить кинетическое уравнение для стационарной системы.
2. Вывести формулу для массы ядра эллиптической галактики.

#### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Почему эллиптические галактики можно рассматривать как системы из безстолкновительного звездного газа?
2. Получите кинетическое уравнение Больцмана.
3. Напишите полную систему уравнений динамики для E галактик.
4. Напишите систему уравнений динамики для стационарных E галактик.
5. Как определяется тензор дисперсии скоростей звезд?
6. Получите кинетическое уравнение Больцмана для стационарной E галактики через тензор дисперсии скоростей.
7. Дайте определение тензора давления.
8. Какие формы могут быть у эллиптических галактик?
9. Введите понятия тензора момента инерции, тензоров кинетической и потенциальной энергии.
10. Напишите теорему вириала в самом общем случае.

11. Как можно определить 3-х мерную форму эллиптических галактик из наблюдений?
12. Введите понятие температуры ядра эллиптической галактики.
13. Как можно определить массу ядра E галактики?

### **Тема 5. «Скопления галактик»**

**Цель занятия:** изучить физические характеристики скоплений галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

#### **Задачи**

1. Сделать таблицу, отражающую классификацию скоплений и групп галактик.
2. Рассчитать вероятность столкновения двух галактик в скоплении.
3. Рассчитать время аккреции галактик на центр скопления.

#### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Назовите признаки классификации скоплений галактик.
2. Назовите типы скоплений и их отличительные особенности.
3. Дайте определение радиуса скопления галактик.
4. Перечислите особенности строения скоплений галактик.
5. Перечислите особенности излучения скоплений галактик.
6. Что такое cD-галактики и каковы особенности скоплений с cD галактиками?
7. Какова вероятность тесных сближений галактик в скоплениях?
8. Напишите формулу для вероятности тесных сближений.
9. К чему приводят тесные сближения галактик?
10. Как оценить время падения галактик на центр скопления?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 3, 5.

**Интернет-ресурсы:** 1, 2, 4.

### **Тема 6. «Гамма-барстеры».**

**Цель занятия:** изучить особенности гамма-барстеров.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

#### **Задачи**



1. По наблюдательным данным рассчитать светимость космологических гамма-барстеров.
2. Рассчитать полное энергосвечение за время вспышки GRB990123.
3. По наблюдательным данным оценить характерную частоту гамма-вспышек в одной галактике.

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Как распределены гамма барстеры на Небесной сфере и что из этого следует?
2. Каковы параметры самого мощного по энергетике гамма всплеска?
3. Какие орбитальные станции внесли наибольший вклад в изучение  $\gamma$  барстеров?
4. Что называется послесвечением и почему оно возникает?
5. В каких галактиках возникают гамма вспышки?
6. Перечислите общие наблюдаемые характеристики гамма барстеров.
7. Что называется файерболом?
8. Каковы характеристики файерболов, следующие из наблюдений?
9. Перечислите основные требования к источникам гамма всплесков.
10. Что называется гиперновой?

***Литература основная:*** 1.

***Литература дополнительная:*** 1, 2, 3, 7.

***Интернет-ресурсы:*** 1, 3,

**Тема 7. «Математические основы классической  
релятивистской космологии»**

***Цель занятия:*** изучить тензорную алгебру и тензорный математический анализ.

***Организационная форма занятия:*** дискуссия, решение задач

**Задачи**

1. Доказать, что символы Кристоффеля симметричны по нижним индексам.
2. Получить выражение для ковариантной производной контравариантного тензора.
3. Доказать, что ковариантная производная метрического тензора равна нулю.
4. Вывести выражение, связывающее символы Кристоффеля с метрическим тензором.
5. Доказать тождество Бианки.
6. Вывести тензор Риччи из тензора Римана.

7. Получить выражение для изменения контравариантного вектора при параллельном переносе вдоль бесконечно малого замкнутого контура.

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Напишите общее выражение для квадрата метрики.
2. Какая метрика называется Римановой?
3. Какая система отсчета называется инерциальной?
4. Какое пространство называется Галилеевым?
5. Напишите выражение для квадрата интервала в Галилеевом пространстве и компоненты метрического тензора.
6. Что называется мировой линией и мировой точкой?
7. Сформулируйте космологический принцип.
8. Сформулируйте постулат Вейля и следствие из него.
9. Сформулируйте принцип эквивалентности и следствие из него.
10. Напишите определения: для контравариантного вектора;  
ковариантного вектора;  
контравариантного тензора;  
ковариантного тензора.
11. Напишите определение символов Кронекера.  
Как он действует на вектор?
12. Как действует на векторы и тензоры метрический тензор?
13. Какой тензор называется симметричным?  
Сколько у него независимых компонент?
14. Какой тензор называется антисимметричным?  
Сколько у него независимых компонент?
15. Напишите выражение для изменения ковариантного вектора при параллельном переносе.
16. Напишите выражение для изменения контравариантного вектора при параллельном переносе.
17. Напишите теорему Стокса для 4-х мерного криволинейного пространства.
18. Напишите теорему Гаусса для 4-х мерного криволинейного пространства.
19. Преобразуйте тензор 2-го ранга в вектор и тензор 3-го ранга в вектор с помощью тензора Леви-Чивитта.
20. Напишите, как изменяется ковариантный вектор при параллельном переносе по бесконечно малому замкнутому контуру.
21. Дайте определение тензору Риччи и скалярной кривизне.

***Литература основная:*** 1.

***Литература дополнительная:*** 1, 4, 7.

***Интернет-ресурсы:*** 3, 4

## Тема 8. «Движение частицы в гравитационном поле».

**Цель занятия:** изучить законы движения частиц в гравитационном поле.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### Задачи

1. Вывести уравнение, связывающее 4-х импульс с градиентом действия.
2. Вывести уравнение Гамильтона-Якоби.
3. Получить выражение для метрики в слабом гравитационном поле.
4. Получить выражение для квадрата расстояния в криволинейном пространстве.

### *Вопросы, выносимые на обсуждение:*

1. Сформулируйте принцип наименьшего действия, запишите его математически.
2. Какая линия называется геодезической?
3. Дайте определение 4-х скорости.
4. Напишите уравнение движения частицы в гравитационном поле.
5. Напишите уравнение геодезической.
6. Дайте определение 4-х импульса.
7. Как связан 4-х импульс с действием?
8. Напишите метрику для слабого гравитационного поля.
9. Дайте определение собственного времени.
10. Как собственное время связано с временной координатой?
11. Напишите выражение для квадрата расстояния.
12. Дайте определение 3-х мерному метрическому тензору.
13. Дайте определение постоянного гравитационного поля и мирового времени.
14. Дайте определение статического гравитационного поля.
15. Сформулируйте закон замедления времени в гравитационном поле.
16. Что называется гравитационным красным смещением?
18. Дайте определение полной энергии частицы.
19. Напишите формулу для энергии в статистическом гравитационном поле.
20. Напишите формулу для энергии в слабом гравитационном поле.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 3, 5.

**Интернет-ресурсы:** 1, 3, 4.

## Тема 9. «Уравнения гравитационного поля»

**Цель занятия:** вывести и проанализировать уравнения Эйнштейна для гравитационного поля.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### Задачи

1. Вычислить вариацию действия для гравитационного поля.
2. Вывести уравнение Пуассона из уравнений Эйнштейна для слабых гравитационных полей.

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Напишите закон сохранения энергии-импульса в плоском пространстве.
2. Напишите выражение для ковариантной дивергенции вектора и тензора.
3. Обобщите закон сохранения энергии-импульса на случай гравитационного поля.
4. Напишите выражение для тензора энергии-импульса тела с ненулевой массой покоя.
5. Получите выражение для смешанного и ковариантного тензора энергии-импульса.
6. Напишите уравнения Эйнштейна в основной форме в ковариантном виде.
7. Преобразуйте уравнения Эйнштейна к смешанному виду.
8. Получите уравнение для скалярной кривизны.
9. Напишите уравнение Эйнштейна для временной компоненты в слабом гравитационном поле.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 4.

**Интернет-ресурсы:** 3, 4.

## Тема 10. «Синхронная система отсчета»

**Цель занятия:** получить уравнения Эйнштейна в синхронной системе отсчета.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### Задачи

1. Вычислить компоненты тензора Риччи.

## 2. Написать уравнения Эйнштейна.

### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Дайте определение синхронной системе отсчета.
2. Перечислите основные свойства синхронной системы.
3. Каков физический смысл синхронной системы отсчета?
4. Какой вывод следует из уравнения Эйнштейна для временной компоненты в синхронной системе отсчета?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3.

**Интернет-ресурсы:** 3, 4.

## **Тема 11. «Изотропное пространство»**

**Цель занятия:** получить компоненты метрического тензора для изотропного пространства.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### **Задачи**

Для случая пространства с постоянной положительной кривизной:

1. Получить выражение для 3-х мерной метрики изотропного пространства.
2. Получить выражение для квадрата расстояния в сферической системе координат.
3. Получить выражение для объема пространства.
4. Сделать те же три задания для пространства с постоянной отрицательной кривизной.

### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Какие свойства 3-х мерной метрики вытекают из космологического принципа?
2. Напишите выражение для метрики 3-х мерного пространства в общем случае.
3. Напишите выражение для 3-х мерного тензора кривизны в однородном изотропном пространстве.
4. Получите выражение для 3-х мерного тензора Риччи и скалярной кривизны в однородном, изотропном пространстве.
5. Напишите выражение для метрики 3-х мерного однородного, изотропного пространства с постоянной, положительной кривизной.
6. Рассчитайте объем пространства с  $\lambda > 0$ .

7. Напишите выражение для метрики 3-х мерного однородного, изотропного пространства с постоянной, отрицательной кривизной.
8. Рассчитайте объем пространства с  $\lambda < 0$ .

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 3, 4.

**Интернет-ресурсы:** 1, 4.

## Тема 12. «Красное смещение»

**Цель занятия:** изучить эффект космологического красного смещения  
**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### Задачи

1. Получить основные уравнения для плоской однородной изотропной Вселенной вблизи сингулярности.
2. Найти решение этих уравнений.

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Как связаны временная и радиальная координаты на мировой линии распространения света?
2. Сформулируйте закон космологического красного смещения.
3. Напишите аналитическое выражение для постоянной Хаббла и закон смещения Хаббла.
4. Выразите закон Хаббла через эффект Доплера.
5. Напишите условие для плотности вещества в закрытой Вселенной.
6. Напишите условие для плотности вещества в открытой Вселенной.
7. Напишите выражение для плотности вещества в плоской Вселенной.
8. Напишите космологическое уравнение Фридмана.
9. Напишите общее выражение для метрики Вселенной с постоянной кривизной.
10. Напишите общее выражение для площади поверхности гиперболы в 4-х мерном пространстве.
11. Дайте определение горизонту событий.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

## Тема 13. «Космический вакуум»

**Цель занятия:** изучить физическую природу космического вакуума

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### **Задачи**

1. Рассчитать величину  $\Lambda$ -члена в соответствии с современными данными наблюдений.

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Что называется вакуумом?
2. Как проявляет себя вакуум в ядерной физике?
3. Сформулируйте основные свойства космического вакуума.
4. Как был обнаружен космический вакуум?
5. Какова плотность космического вакуума сегодня?
6. Каковы вклады разных составляющих материи в полную плотность сегодня?
7. Напишите уравнение Эйнштейна с учетом лямбда члена и с учетом энергии вакуума.
8. Каков физический смысл лямбда члена?
9. Докажите, что плотность энергии вакуума не зависит от времени.
10. Напишите уравнение движения пробной частицы в локальном гравитационном поле с учетом энергии вакуума.
11. Напишите решение для уравнения движения пробной частицы.
12. Для каких объектов был изначально получен закон Хаббла?
13. На каких масштабах проверен закон Хаббла сегодня?
14. Как можно интерпретировать выполнение закона Хаббла на малых расстояниях?
15. Каково минимальное расстояние, на котором антигравитация вакуума превалирует над гравитацией?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

### **Тема 14. «Взаимодействие света с гравитационным полем»**

**Цель занятия:** изучить взаимодействие электромагнитного и гравитационного полей.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### **Задачи**

1. Рассчитать скорость отдачи квантов гравитации при взаимодействии с квантами света с энергией 1 МэВ и время задержки этих квантов света, исходящих от гамма-барстера GRB 990123 с красным смещением  $z = 1.6$ .

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Почему при распространении света в вакууме энергия световых квантов меняется?
2. Получите дисперсионное уравнение распространения света в вакууме.
3. Напишите точную формулу для времени задержки света в стационарной Вселенной.
4. Напишите формулу для времени задержки света в эволюционирующей Вселенной.
5. Напишите уравнение Фридмана с учетом разных составляющих вещества во Вселенной.
6. Напишите уравнение для времени задержки света через красное смещение.
7. Каково решение уравнения для времени задержки света?
8. Как можно проверить космологию с помощью задержки света в вакууме?

***Литература основная:*** 1.

***Литература дополнительная:*** 1, 6.

***Интернет-ресурсы:*** 2, 4.

**Тема 15. «Основные периоды в эволюции Вселенной»**

***Цель занятия:*** изучить основные периоды в эволюции Вселенной

***Организационная форма занятия:*** дискуссия, решение задач

**Задачи**

1. Рассчитать нижнюю температуру рождения протон-антипротонных пар.
2. Рассчитать время аннигиляции протон-антипротонных и электрон-позитронных пар.
3. Вычислить постоянную плотности излучения.

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***



1. Перечислите основные свойства реликтового излучения.
2. Какова плотность реликтового излучения сегодня?
3. Перечислите стадии радиационно-доминирующей эры.
4. Сформулируйте основные черты эволюционных стадий.
5. Когда произошёл отрыв излучения от вещества?
6. Сформулируйте 1-й критерий равновесия излучения и вещества.
7. Как определить космологическое время окончательной аннигиляции частиц?
8. Дайте определение постоянной плотности излучения.
9. Сформулируйте 2-ой критерий термодинамического равновесия излучения и вещества.
10. Как определить характерное время взаимодействия частиц?
11. Напишите условие для эффективного сечения взаимодействия, при котором частицы находятся в равновесии.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

## **Тема 16. «Лептонная стадия в эволюции Вселенной»**

**Цель занятия:** изучить лептонную стадию в эволюции Вселенной

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### **Задачи**

1. Вычислить время отрыва электронного нейтрино от вещества двумя способами.
2. Вычислить время отрыва мюонного нейтрино от вещества.
3. Вычислить температуру реликтового нейтринного излучения.

### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Перечислите все лептоны в порядке убывания их массы.
2. Напишите реакцию рождения электронных нейтрино.
3. Каким критерием надо пользоваться для определения времени отрыва нейтрино и почему?
4. Напишите реакции рождения мюонного нейтрино и тау нейтрино.
5. Напишите закон изменения плотности энергии нейтринного излучения.
6. Дайте определение удельной энергии.
7. Почему сегодняшняя температура реликтового нейтринного излучения меньше температуры реликтового нейтринного излучения?
8. Чему равна температура реликтового нейтринного излучения сегодня?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

## **Тема 17. «Ядерные реакции в ранней Вселенной»**

**Цель занятия:** изучить ядерные реакции в горячей Вселенной.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### **Задачи**

1. Рассчитать относительную концентрацию нейтронов и протонов в равновесии.
2. Определить космологическое время момента заалки нейтронов и протонов.
3. Определить температуру Вселенной в момент заалки нейтронов и протонов.
4. Определить относительную концентрацию нейтронов и протонов в момент заалки.

### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. В какой промежуток времени и при каких температурах во Вселенной идут ядерные реакции?
2. В каком режиме идут ядерные реакции в расширяющейся Вселенной?
3. Запишите реакции слабого взаимодействия.
4. Как определить равновесное содержание нуклонов и когда оно держится?
5. Запишите уравнения Хаяши.
6. Каков смысл уравнений Хаяши?
7. Запишите уравнение для скорости перехода протонов в нейтроны.
8. Как в уравнениях для скоростей реакций учтён закон сохранения энергии?
9. Напишите следствие из уравнения Хаяши для скорости изменения концентрации нуклонов.
10. Напишите решение уравнения изменения концентрации нейтронов.
11. Запишите бинарные реакции, приводящие к образованию ядер  $\text{He}^4$
12. В какое время идут реакции образования  $\text{He}^4$  и почему?
13. Какие изотопы химических элементов синтезируются в реакциях первичного нуклеосинтеза? Напишите соответствующие реакции.
14. Каково содержание химических элементов во Вселенной после окончания первичного нуклосинтеза?
15. Напишите реакции, приводящие к образованию  $\text{He}^4$  в звездах поздних спектральных классов.

16. Почему в ранней Вселенной и в звездах идут разные термоядерные реакции?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

## **Тема 18. «Гравитационные волны»**

**Цель занятия:** изучить физику гравитационного излучения.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

### **Задачи**

1. Найти свойства тензора возмущений.
2. Получить выражение для ковариантного тензора Римана.
3. Вывести уравнение плоской гравитационной волны.

### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Что называется гравитационной волной и почему возможно существование гравитационных волн?
2. Перечислите свойства метрики слабого свободного гравитационного поля в пустоте.
3. Как доказать, что свободное гравитационное поле в пустоте является волной?
4. Напишите уравнение для плоской гравитационной волны.
5. Напишите уравнение для гравитационной волны в криволинейном пространстве.
6. Можно ли зафиксировать гравитационные волны от Солнца? От других звезд? Почему?
7. В каких случаях возможно излучение гравитационных волн двойными системами?
8. Изучение каких объектов позволило косвенно обнаружить гравитационные волны?
9. Какова может быть наблюдаемая мощность гравитационного излучения вследствие ассиметричного гравитационного коллапса?
10. На каком свойстве гравитационных волн основаны их детекторы?
11. Какие вы знаете детекторы гравитационных волн?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

## 5. Литература.

### Основная литература:

1. Засов А.В., Постнов К.А., Общая астрофизика, Век 2, 2018.

### Дополнительная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., Наука, 6-е изд., 1973.
2. Дирак П.А.М. Общая теория относительности. Айнштейн, 1997.
3. Верскер Г.Л., Келлерман К.И. (Ред.) Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. М., Мир, 1976.
4. Кинг А.Р. Введение в классическую звездную динамику. М., УРСС, 2002.
5. Горбацкий В.Г. Введение в физику галактик и скоплений галактик. М., Наука, 1986.
6. Караченцев Д.И. Двойные галактики. М., Наука, 1987.
1. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. М., Наука, 1975.
2. Вейнберг С. Гравитация и космология. М., Мир, 1975; Волгоград, Платон, 2000.

### Интернет-ресурсы:

1. [www.astronet.ru](http://www.astronet.ru)
2. [www.sao.ru](http://www.sao.ru)
3. [http:// biblioclub.ru/](http://biblioclub.ru/) – Университетская библиотека онлайн
4. <http://www.rsl.ru> – Российская государственная библиотека.

### Материально-техническое обеспечение дисциплины

- персональный компьютер;
- лабораторные стенды;
- вторичные источники питания;
- мультимедийные учебно-методические материалы.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ АСТРОФИЗИКА**

**Методические указания по выполнению самостоятельных работ**

Направление подготовки 03.03.02 Физика  
Направленность (профиль)  
«Физика Земли и космоса»

**Ставрополь  
2026**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

**ВВЕДЕНИЕ**

**ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ**

**ЛИТЕРАТУРА**

## ВВЕДЕНИЕ

### 1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

*Цель:* формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки «Физика Земли и космоса».

*Задачи:* освоение современных и классических методов изучения внегалактических объектов и ранней Вселенной и формирование умения применять их к анализу галактик, квазаров и реликтового излучения.

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студента).

Самостоятельная работа студента является важным видом учебной и научной деятельности студента. Федеральным государственным образовательным стандартом предусматривается значительный объем времени из общей трудоемкости дисциплины на самостоятельную работу. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому самостоятельная работа должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования – подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студента предполагает, прежде всего, его научно-исследовательскую и практическую деятельность, поскольку именно эти виды учебной работы в первую очередь готовят к самостоятельному

выполнению профессиональных задач. Конечной целью самостоятельной работы является организация самостоятельной познавательной деятельности, формирование умения самостоятельно анализировать информацию, выделять главное и второстепенное.

Основными формами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Практическая физика» являются:

- подготовка к лабораторной работе;
- самостоятельное изучение литературы;
- подготовка к экзамену.

**Лабораторная работа** – подразумевает изучение определенного физического процесса на практике, используя при этом методы, предварительно изученные на лекциях, выбор наиболее оптимального приема выполнения замеров и исследования, которые обеспечивает наиболее точный результат, определение фактического результата и его сравнение с теоретическими данными, описанными в учебнике согласно выбранной тематике, обнаружение причин полученного несоответствия и грамотное изложение их в отчете лабораторной работы, грамотное оформление выводов согласно требованиям методички.

### ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

| №                | Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                                                                                                                               | Использование интерактивных форм | Часы |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------|
| <b>8 семестр</b> |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                  |      |
| 1                | Тема 1. Наблюдаемые характеристики галактик<br>Вывести формулу красного смещения для больших расстояний.<br>По закону Хаббла определить расстояния и лучевые скорости ряда галактик.<br>Рассчитать расстояние до галактики, в которой вспыхнула сверхновая. | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 2                | Тема 2. Пекулярные галактики<br>Сделать таблицу типов пекулярных галактик с указанием их основных характеристик и особенностей.                                                                                                                             | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 3                | Тема 3. Определение масс галактик<br>Вывести формулу оценки суммарной массы пары галактик.<br>Вывести теорему вириала в общем случае.<br>Получить формулу для массы галактики по теореме вириала.                                                           | Решение проблемных задач         | 1.5  |
| 4                | Тема 4. Эллиптические галактики                                                                                                                                                                                                                             | Решение проблемных               | 1.5  |



|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                          |     |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----|
|   | Получить кинетическое уравнение для стационарной системы.<br>Вывести формулу для массы ядра эллиптической галактики.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | задач                    |     |
| 5 | Тема 5. Скопления и группы галактик<br>Сделать таблицу, отражающую классификацию скоплений и групп галактик.<br>Рассчитать вероятность столкновения двух галактик в скоплении.<br>Рассчитать время аккреции галактик на центр скопления.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Решение проблемных задач | 1.5 |
| 6 | Тема 6. Гамма-барстеры<br>По наблюдательным данным рассчитать светимость космологических гамма-барстеров.<br>Рассчитать полное энергосвечение за время вспышки GRB990123.<br>По наблюдательным данным оценить характерную частоту гамма-вспышек в одной галактике.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Решение проблемных задач | 1.5 |
| 7 | Тема 7. Математические основы классической космологии.<br>Доказать, что символы Кристоффеля симметричны по нижним индексам.<br>Получить выражение для ковариантной производной контравариантного тензора.<br>Доказать, что ковариантная производная метрического тензора равна нулю.<br>Вывести выражение, связывающее символы Кристоффеля с метрическим тензором.<br>Доказать тождество Бианки.<br>Вывести тензор Риччи из тензора Римана.<br>Получить выражение для изменения контравариантного вектора при параллельном переносе вдоль бесконечно малого замкнутого контура. | Решение проблемных задач | 1.5 |
| 8 | Тема 8. Движение частицы в гравитационном поле.<br>Вывести уравнение, связывающее 4-х импульс с градиентом действия.<br>Вывести уравнение Гамильтона-Якоби.<br>Получить выражение для метрики в слабом гравитационном поле.<br>Получить выражение для квадрата расстояния в криволинейном пространстве.                                                                                                                                                                                                                                                                         | Решение проблемных задач | 1.5 |
| 9 | Тема 9. Уравнения гравитационного поля.<br>Вычислить вариацию действия для гравитационного поля.<br>Вывести уравнение Пуассона из уравнений Эйнштейна для слабых гравитационных полей.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Решение проблемных задач | 1.5 |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                |     |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----|
| 10 | Тема 10. Синхронная система отсчета.<br>Вычислить компоненты тензора Риччи.<br>Написать уравнения Эйнштейна.                                                                                                                                                                                                                                                                                | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 11 | Тема 11. Изотропное пространство.<br>Для случая пространства с постоянной положительной кривизной:<br>Получить выражение для 3-х мерной метрики изотропного пространства.<br>Получить выражение для квадрата расстояния в сферической системе координат.<br>Получить выражение для объема пространства.<br>Сделать те же три задания для пространства с постоянной отрицательной кривизной. | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 12 | Тема 12. Красное смещение<br>Получить основные уравнения для плоской однородной изотропной Вселенной вблизи сингулярности.<br>Найти решение этих уравнений.                                                                                                                                                                                                                                 | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 13 | Тема 13. Космический вакуум.<br>Рассчитать величину $\Lambda$ -члена в соответствии с современными данными наблюдений.                                                                                                                                                                                                                                                                      | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 14 | Тема 14. Взаимодействие света с вакуумом.<br>Рассчитать скорость отдачи квантов гравитации при взаимодействии с квантами света с энергией 1 МэВ и время задержки этих квантов света, исходящих от гамма-барстера GRB 990123 с красным смещением $z = 1.6$ .                                                                                                                                 | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 15 | Тема 15. Основные периоды в эволюции Вселенной.<br>Рассчитать нижнюю температуру рождения протон-антипротонных пар.<br>Рассчитать время аннигиляции протон-антипротонных и электрон-позитронных пар.<br>Вычислить постоянную плотности излучения.                                                                                                                                           | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 16 | Тема 16. Лептонная стадия в эволюции Вселенной.<br>Вычислить время отрыва электронного нейтрино от вещества двумя способами.<br>Вычислить время отрыва мюонного нейтрино от вещества.<br>Вычислить температуру реликтового нейтринного излучения.                                                                                                                                           | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |
| 17 | Тема 17. Ядерные реакции в горячей Вселенной.<br>Рассчитать относительную концентрацию нейтронов и протонов в равновесии.                                                                                                                                                                                                                                                                   | Решение<br>проблемных<br>задач | 1.5 |

|    |                                                                                                                                                                                                                                   |                          |           |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------|
|    | Определить космологическое время момента заковки нейтронов и протонов.<br>Определить температуру Вселенной в момент заковки нейтронов и протонов.<br>Определить относительную концентрацию нейтронов и протонов в момент заковки. |                          |           |
| 18 | Тема 18. Гравитационные волны.<br>Найти свойства тензора возмущений.<br>Получить выражение для ковариантного тензора Римана.<br>Вывести уравнение плоской гравитационной волны.                                                   | Решение проблемных задач | 1.5       |
|    | <b>Итого за семестр</b>                                                                                                                                                                                                           |                          | <b>27</b> |
|    | <b>Итого</b>                                                                                                                                                                                                                      |                          | <b>27</b> |

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

### Тема 1 «Наблюдаемые характеристики галактик»

**Цель занятия:** изучить наблюдаемые характеристики галактик  
**Организационная форма занятия:** семинар, решение задач

#### **Вопросы, выносимые на обсуждение:**

21. Кратко перечислите особенности E, S, Ir и SO галактик.
22. Перечислите методы определения расстояний до близких и далеких галактик?
23. Напишите закон Хаббла. Что он отражает?
24. Что называется красным смещением?
25. Что называют группой, скоплением, сверхскоплением галактик?
26. Дайте определение поверхностной яркости галактик.
27. Что называется радиусом Холмберга?
28. Напишите закон Вокулера для E-галактик.
29. Каково распределение яркости по поверхности S-галактик?
30. Дайте определение показателя цвета.
31. В чем причина поляризации излучения галактик?
32. Какие спектры называются интегральными, и какие – синтетическими?
33. Какое звездное население в E, S и Ir галактиках?
34. Каково количество HI в нормальных галактиках и как оно определяется?
35. Сколько HII в нормальных галактиках, как он распределен, как светит?
36. Что такое «корональный газ», где он наблюдается?
37. Назовите типы сверхновых, их наблюдаемые характеристики, физическую природу, встречаемость в галактиках.

38. Какова кинематика звезд в E и S галактиках?
39. Какова форма кривых вращения галактик и почему?
40. Сформулируйте словами соотношения Фабера-Джексона и Туллы-Фишера.

**Литература дополнительная:** 1, 2.

**Интернет-ресурсы:** 3, 4.

## **Тема 2. «Пекулярные галактики».**

**Цель занятия:** изучить особенности пекулярных галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Назовите наблюдательные особенности компактных галактик.
2. Назовите физические характеристики компактных галактик.
3. Чем вызваны особенности компактных галактик?
4. Назовите наблюдательные особенности карликовых галактик.
5. Назовите физические характеристики карликовых галактик.
6. Что представляют собой красные и голубые карликовые галактики?
7. Чем вызвана стадия активности у карликовых галактик?
8. Что называется ядром галактики?
9. Перечислите признаки активности ядер галактик.
10. Перечислите характеристики галактик Сейферта.
11. Назовите общие особенности ядер сейфертовских галактик.
12. Дайте интерпретацию спектра сейфертовских галактик.
13. Перечислите особенности радиогалактик.
14. Какой спектр у радиогалактик и почему?
15. Какие объекты названы лацертидами?
16. Перечислите основные особенности квазаров.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3.

**Интернет-ресурсы:** 2, 3.

## **Тема 3. «Определение масс галактик».**

**Цель занятия:** изучить методы определения масс галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

15. Напишите 3-й закон Кеплера.

16. Дайте определения абсолютным и относительным орбитам.
17. Перепишите 3-й закон Кеплера через наблюдаемые характеристики для двойных галактик.
18. Как рассчитать среднее значение геометрического фактора проекции?
19. Что называется оценкой суммарной массы пары галактик?
20. Как модифицируется формула для определения масс галактик с учетом эллиптичности орбит?
21. Для каких галактик можно определять массу по дисперсии скоростей?
22. Какие упрощения делаются при определении масс галактик по дисперсии скоростей?
23. Напишите формулу для определения массы дисков спиральных галактик по видимому распределению поверхностной яркости.
24. Напишите формулу для определения массы балджей спиральных галактик по видимому распределению поверхностной яркости.
25. Напишите формулу для определения массы гало спиральных галактик по видимому распределению поверхностной яркости.
26. Для каких галактик наиболее корректно определять массу по видимому распределению поверхностной яркости и почему?
27. Для каких галактик можно определять массу по кривым вращения?
28. Напишите формулу для определения распределения плотности в спиральных галактиках по кривой вращения.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3.

**Интернет-ресурсы:** 1, 3, 4.

#### **Тема 4. «Эллиптические галактики»**

**Цель занятия:** изучить физические характеристики эллиптических галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

14. Почему эллиптические галактики можно рассматривать как системы из безстолкновительного звездного газа?
15. Получите кинетическое уравнение Больцмана.
16. Напишите полную систему уравнений динамики для E галактик.
17. Напишите систему уравнений динамики для стационарных E галактик.
18. Как определяется тензор дисперсии скоростей звезд?
19. Получите кинетическое уравнение Больцмана для стационарной E галактики через тензор дисперсии скоростей.
20. Дайте определение тензора давления.
21. Какие формы могут быть у эллиптических галактик?

22. Введите понятия тензора момента инерции, тензоров кинетической и потенциальной энергии.
23. Напишите теорему вириала в самом общем случае.
24. Как можно определить 3-х мерную форму эллиптических галактик из наблюдений?
25. Введите понятие температуры ядра эллиптической галактики.
26. Как можно определить массу ядра  $E$  галактики?

### **Тема 5. «Скопления галактик»**

**Цель занятия:** изучить физические характеристики скоплений галактик.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

11. Назовите признаки классификации скоплений галактик.
12. Назовите типы скоплений и их отличительные особенности.
13. Дайте определение радиуса скопления галактик.
14. Перечислите особенности строения скоплений галактик.
15. Перечислите особенности излучения скоплений галактик.
16. Что такое cD-галактики и каковы особенности скоплений с cD галактиками?
17. Какова вероятность тесных сближений галактик в скоплениях?
18. Напишите формулу для вероятности тесных сближений.
19. К чему приводят тесные сближения галактик?
20. Как оценить время падения галактик на центр скопления?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 3, 5.

**Интернет-ресурсы:** 1, 2, 4.

### **Тема 6. «Гамма-барстеры».**

**Цель занятия:** изучить особенности гамма-барстеров.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

11. Как распределены гамма барстеры на Небесной сфере и что из этого следует?
12. Каковы параметры самого мощного по энергетике гамма всплеска?
13. Какие орбитальные станции внесли наибольший вклад в изучение  $\gamma$  барстеров?

14. Что называется послесвечением и почему оно возникает?
15. В каких галактиках возникают гамма вспышки?
16. Перечислите общие наблюдаемые характеристики гамма барстеров.
17. Что называется файерболом?
18. Каковы характеристики файерболов, следующие из наблюдений?
19. Перечислите основные требования к источникам гамма всплесков.
20. Что называется гиперновой?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3, 7.

**Интернет-ресурсы:** 1, 3,

## Тема 7. «Математические основы классической релятивистской космологии»

**Цель занятия:** изучить тензорную алгебру и тензорный математический анализ.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Напишите общее выражение для квадрата метрики.
2. Какая метрика называется Римановой?
3. Какая система отсчета называется инерциальной?
4. Какое пространство называется Галилеевым?
5. Напишите выражение для квадрата интервала в Галилеевом пространстве и компоненты метрического тензора.
6. Что называется мировой линией и мировой точкой?
7. Сформулируйте космологический принцип.
8. Сформулируйте постулат Вейля и следствие из него.
9. Сформулируйте принцип эквивалентности и следствие из него.
10. Напишите определения: для контравариантного вектора;  
ковариантного вектора;  
контравариантного тензора;  
ковариантного тензора.
11. Напишите определение символов Кронекера.  
Как он действует на вектор?
12. Как действует на векторы и тензоры метрический тензор?
13. Какой тензор называется симметричным?  
Сколько у него независимых компонент?
14. Какой тензор называется антисимметричным?  
Сколько у него независимых компонент?

15. Напишите выражение для изменения ковариантного вектора при параллельном переносе.
16. Напишите выражение для изменения контравариантного вектора при параллельном переносе.
17. Напишите теорему Стокса для 4-х мерного криволинейного пространства.
18. Напишите теорему Гаусса для 4-х мерного криволинейного пространства.
19. Преобразуйте тензор 2-го ранга в вектор и тензор 3-го ранга в вектор с помощью тензора Леви-Чи-Витта.
20. Напишите, как изменяется ковариантный вектор при параллельном переносе по бесконечно малому замкнутому контуру.
21. Дайте определение тензору Риччи и скалярной кривизне.

***Литература основная:*** 1.

***Литература дополнительная:*** 1, 4, 7.

***Интернет-ресурсы:*** 3, 4

### **Тема 8. «Движение частицы в гравитационном поле».**

***Цель занятия:*** изучить законы движения частиц в гравитационном поле.

***Организационная форма занятия:*** дискуссия, решение задач

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Сформулируйте принцип наименьшего действия, запишите его математически.
2. Какая линия называется геодезической?
3. Дайте определение 4-х скорости.
4. Напишите уравнение движения частицы в гравитационном поле.
5. Напишите уравнение геодезической.
6. Дайте определение 4-х импульса.
7. Как связан 4-х импульс с действием?
8. Напишите метрику для слабого гравитационного поля.
9. Дайте определение собственного времени.
10. Как собственное время связано с временной координатой?
11. Напишите выражение для квадрата расстояния.
12. Дайте определение 3-х мерному метрическому тензору.
13. Дайте определение постоянного гравитационного поля и мирового времени.
14. Дайте определение статического гравитационного поля.
15. Сформулируйте закон замедления времени в гравитационном поле.



16. Что называется гравитационным красным смещением?
18. Дайте определение полной энергии частицы.
19. Напишите формулу для энергии в статистическом гравитационном поле.
20. Напишите формулу для энергии в слабом гравитационном поле.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 3, 5.

**Интернет-ресурсы:** 1, 3, 4.

### **Тема 9. «Уравнения гравитационного поля»**

**Цель занятия:** вывести и проанализировать уравнения Эйнштейна для гравитационного поля.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Напишите закон сохранения энергии-импульса в плоском пространстве.
2. Напишите выражение для ковариантной дивергенции вектора и тензора.
3. Обобщите закон сохранения энергии-импульса на случай гравитационного поля.
4. Напишите выражение для тензора энергии-импульса тела с ненулевой массой покоя.
5. Получите выражение для смешанного и ковариантного тензора энергии-импульса.
6. Напишите уравнения Эйнштейна в основной форме в ковариантном виде.
7. Преобразуйте уравнения Эйнштейна к смешанному виду.
8. Получите уравнение для скалярной кривизны.
9. Напишите уравнение Эйнштейна для временной компоненты в слабом гравитационном поле.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 4.

**Интернет-ресурсы:** 3, 4.

### **Тема 10. «Синхронная система отсчета»**

**Цель занятия:** получить уравнения Эйнштейна в синхронной системе отсчета.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Дайте определение синхронной системе отсчета.
2. Перечислите основные свойства синхронной системы.
3. Каков физический смысл синхронной системы отсчета?
4. Какой вывод следует из уравнения Эйнштейна для временной компоненты в синхронной системе отсчета?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 2, 3.

**Интернет-ресурсы:** 3, 4.

### **Тема 11. «Изотропное пространство»**

**Цель занятия:** получить компоненты метрического тензора для изотропного пространства.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Какие свойства 3-х мерной метрики вытекают из космологического принципа?
2. Напишите выражение для метрики 3-х мерного пространства в общем случае.
3. Напишите выражение для 3-х мерного тензора кривизны в однородном изотропном пространстве.
4. Получите выражение для 3-х мерного тензора Риччи и скалярной кривизны в однородном, изотропном пространстве.
5. Напишите выражение для метрики 3-х мерного однородного, изотропного пространства с постоянной, положительной кривизной.
6. Рассчитайте объем пространства с  $\lambda > 0$ .
7. Напишите выражение для метрики 3-х мерного однородного, изотропного пространства с постоянной, отрицательной кривизной.
8. Рассчитайте объем пространства с  $\lambda < 0$ .

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 3, 4.

**Интернет-ресурсы:** 1, 4.

### **Тема 12. «Красное смещение»**

**Цель занятия:** изучить эффект космологического красного смещения

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Как связаны временная и радиальная координаты на мировой линии распространения света?
2. Сформулируйте закон космологического красного смещения.
3. Напишите аналитическое выражение для постоянной Хаббла и закон смещения Хаббла.
4. Выразите закон Хаббла через эффект Доплера.
5. Напишите условие для плотности вещества в закрытой Вселенной.
6. Напишите условие для плотности вещества в открытой Вселенной.
7. Напишите выражение для плотности вещества в плоской Вселенной.
8. Напишите космологическое уравнение Фридмана.
9. Напишите общее выражение для метрики Вселенной с постоянной кривизной.
10. Напишите общее выражение для площади поверхности гиперболы в 4-х мерном пространстве.
11. Дайте определение горизонту событий.

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

### Тема 13. «Космический вакуум»

**Цель занятия:** изучить физическую природу космического вакуума  
**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

10. Что называется вакуумом?
11. Как проявляет себя вакуум в ядерной физике?
12. Сформулируйте основные свойства космического вакуума.
13. Как был обнаружен космический вакуум?
14. Какова плотность космического вакуума сегодня?
15. Каковы вклады разных составляющих материи в полную плотность сегодня?
16. Напишите уравнение Эйнштейна с учетом лямбда члена и с учетом энергии вакуума.
17. Каков физический смысл лямбда члена?
18. Докажите, что плотность энергии вакуума не зависит от времени.
10. Напишите уравнение движения пробной частицы в локальном гравитационном поле с учетом энергии вакуума.
11. Напишите решение для уравнения движения пробной частицы.
16. Для каких объектов был изначально получен закон Хаббла?

17. На каких масштабах проверен закон Хаббла сегодня?
18. Как можно интерпретировать выполнение закона Хаббла на малых расстояниях?
19. Каково минимальное расстояние, на котором антигравитация вакуума превалирует над гравитацией?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

#### **Тема 14. «Взаимодействие света с гравитационным полем»**

**Цель занятия:** изучить взаимодействие электромагнитного и гравитационного полей.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

9. Почему при распространении света в вакууме энергия световых квантов меняется?
10. Получите дисперсионное уравнение распространения света в вакууме.
11. Напишите точную формулу для времени задержки света в стационарной Вселенной.
12. Напишите формулу для времени задержки света в эволюционирующей Вселенной.
13. Напишите уравнение Фридмана с учетом разных составляющих вещества во Вселенной.
14. Напишите уравнение для времени задержки света через красное смещение.
15. Каково решение уравнения для времени задержки света?
16. Как можно проверить космологию с помощью задержки света в вакууме?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

#### **Тема 15. «Основные периоды в эволюции Вселенной»**

**Цель занятия:** изучить основные периоды в эволюции Вселенной

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Перечислите основные свойства реликтового излучения.
2. Какова плотность реликтового излучения сегодня?
3. Перечислите стадии радиационно-доминирующей эры.
4. Сформулируйте основные черты эволюционных стадий.
5. Когда произошёл отрыв излучения от вещества?
6. Сформулируйте 1-й критерий равновесия излучения и вещества.
7. Как определить космологическое время окончательной аннигиляции частиц?
8. Дайте определение постоянной плотности излучения.
9. Сформулируйте 2-ой критерий термодинамического равновесия излучения и вещества.
10. Как определить характерное время взаимодействия частиц?
11. Напишите условие для эффективного сечения взаимодействия, при котором частицы находятся в равновесии.

***Литература основная:*** 1.

***Литература дополнительная:*** 1, 6.

***Интернет-ресурсы:*** 2, 4.

**Тема 16. «Лептонная стадия в эволюции Вселенной»**

***Цель занятия:*** изучить лептонную стадию в эволюции Вселенной  
***Организационная форма занятия:*** дискуссия, решение задач

***Вопросы, выносимые на обсуждение:***

1. Перечислите все лептоны в порядке убывания их массы.
2. Напишите реакцию рождения электронных нейтрино.
3. Каким критерием надо пользоваться для определения времени отрыва нейтрино и почему?
4. Напишите реакции рождения мюонного нейтрино и тау нейтрино.
5. Напишите закон изменения плотности энергии нейтринного излучения.
6. Дайте определение удельной энергии.
7. Почему сегодняшняя температура реликтового нейтринного излучения меньше температуры реликтового нейтринного излучения?
8. Чему равна температура реликтового нейтринного излучения сегодня?

***Литература основная:*** 1.

***Литература дополнительная:*** 1, 6.

***Интернет-ресурсы:*** 2, 4.

## Тема 17. «Ядерные реакции в ранней Вселенной»

**Цель занятия:** изучить ядерные реакции в горячей Вселенной.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. В какой промежуток времени и при каких температурах во Вселенной идут ядерные реакции?
2. В каком режиме идут ядерные реакции в расширяющейся Вселенной?
3. Запишите реакции слабого взаимодействия.
4. Как определить равновесное содержание нуклонов и когда оно держится?
5. Запишите уравнения Хаяши.
6. Каков смысл уравнений Хаяши?
7. Запишите уравнение для скорости перехода протонов в нейтроны.
8. Как в уравнениях для скоростей реакций учтён закон сохранения энергии?
9. Напишите следствие из уравнения Хаяши для скорости изменения концентрации нуклонов.
10. Напишите решение уравнения изменения концентрации нейтронов.
11. Запишите бинарные реакции, приводящие к образованию ядер  $\text{He}^4$
12. В какое время идут реакции образования  $\text{He}^4$  и почему?
13. Какие изотопы химических элементов синтезируются в реакциях первичного нуклеосинтеза? Напишите соответствующие реакции.
14. Каково содержание химических элементов во Вселенной после окончания первичного нуклосинтеза?
15. Напишите реакции, приводящие к образованию  $\text{He}^4$  в звездах поздних спектральных классов.
16. Почему в ранней Вселенной и в звездах идут разные термоядерные реакции?

**Литература основная:** 1.

**Литература дополнительная:** 1, 6.

**Интернет-ресурсы:** 2, 4.

## Тема 18. «Гравитационные волны»

**Цель занятия:** изучить физику гравитационного излучения.

**Организационная форма занятия:** дискуссия, решение задач

**Вопросы, выносимые на обсуждение:**

1. Что называется гравитационной волной и почему возможно существование гравитационных волн?

2. Перечислите свойства метрики слабого свободного гравитационного поля в пустоте.
3. Как доказать, что свободное гравитационное поле в пустоте является волной?
4. Напишите уравнение для плоской гравитационной волны.
5. Напишите уравнение для гравитационной волны в криволинейном пространстве.
6. Можно ли зафиксировать гравитационные волны от Солнца? От других звезд? Почему?
7. В каких случаях возможно излучение гравитационных волн двойными системами?
8. Изучение каких объектов позволило косвенно обнаружить гравитационные волны?
9. Какова может быть наблюдаемая мощность гравитационного излучения вследствие ассиметричного гравитационного коллапса?
10. На каком свойстве гравитационных волн основаны их детекторы?
11. Какие вы знаете детекторы гравитационных волн?

*Литература основная:* 1.

*Литература дополнительная:* 1, 6.

*Интернет-ресурсы:* 2, 4.

## литература

### Основная литература:

1. Засов А.В., Постнов К.А., Общая астрофизика, Век 2, 2018.

### Дополнительная литература:

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., Наука, 6-е изд., 1973.
5. Дирак П.А.М. Общая теория относительности. Айнштейн, 1997.
6. Верскер Г.Л., Келлерман К.И. (Ред.) Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. М., Мир, 1976.
4. Кинг А.Р. Введение в классическую звездную динамику. М., УРСС, 2002.
5. Горбацкий В.Г. Введение в физику галактик и скоплений галактик. М., Наука, 1986.
6. Караченцев Д.И. Двойные галактики. М., Наука, 1987.
3. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. М., Наука, 1975.
4. Вейнберг С. Гравитация и космология. М., Мир, 1975; Волгоград, Платон, 2000.

### Интернет-ресурсы:

1. [www.astronet.ru](http://www.astronet.ru)
2. [www.sao.ru](http://www.sao.ru)

3.[http:// biblioclub.ru/](http://biblioclub.ru/) – Университетская библиотека онлайн

4.<http://www.rsl.ru> – Российская государственная библиотека.

### **Материально-техническое обеспечение дисциплины**

- персональный компьютер;
- лабораторные стенды;
- вторичные источники питания;
- мультимедийные учебно-методические материалы.
-