

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

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ И АТМОСФЕРЫ ЗВЕЗД

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Направление подготовки 03.03.02 Физика

Направленность (профиль)

«Фундаментальная и прикладная физика»

Ставрополь

2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. Предисловие
2. Учебно-тематический план дисциплины.....
3. Методические рекомендации к лабораторным работам.....

1. ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель освоения дисциплины – формирование общенаучных и профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки (профилю) 03.03.02 – Физика.

Задачи:

- освоение современных и классических методов анализа атмосфер звезд и формирование умения применять их к анализу конкретных звезд;
- освоение современных и классических методов анализа внутреннего строения звезд и формирование умения применять их к анализу конкретных звезд.

Дисциплина относится к профессиональному циклу, профильной (вариативной) части. Ее освоение происходит в 7 семестре.

Для изучения данной дисциплины необходимо предварительное изучение дисциплин общего курса физики и курса «Математический анализ».

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

Профессиональные компетенции (ПК):

- Способен применять фундаментальные знания в области физики и математики для постановки и решения научно-исследовательских и прикладных задач в своей профессиональной деятельности (ПК-1).
- Способен проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и зарубежного опыта (ПК-2).
- Способен использовать современные цифровые технологии, специализированное программное обеспечение, методы искусственного интеллекта и машинного обучения в профессиональной деятельности (ПК-5).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать основные ха-

рактеристики излучения атмосфер звезд; модели атмосфер звезд; поглощающие факторы, влияющие на формирование видимого спектра звезд; уметь моделировать атмосферу звезды в приближении Шустера-Шварцшильда; знать основные модели внутреннего строения звезд; проводить численное моделирование физических процессов, происходящих внутри звезд.

Учебно-тематический план лабораторных работ

№	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание
1	Основные уравнения звездных фотосфер. Вводятся основные характеристики излучения: интенсивность, поток, средняя интенсивность, плотность излучения, выводятся соотношения между ними. Выводятся основные уравнения звездных атмосфер: уравнение переноса излучения в общем случае и для тонкой атмосферы и уравнение лучистого равновесия.
2	Серая фотосфера. Дается определение серого приближения, выводятся основные уравнения в этом приближении. Находятся приближенные решения основных уравнений по методу Шварцшильда и точные решения. Рассматривается проверка найденных решений по распределению яркости по диску Солнца.
3	Локальное термодинамическое равновесие. Дается определение, записываются уравнения Кирхгофа, Планка. Выводятся выражения для потока, функции источника, интенсивности и распределение температуры с глубиной в приближении ЛТР.
4	Возбуждение и ионизация в условиях ЛТР. Формулируется математическая постановка задачи. Записывается формула Больцмана (без вывода), обсуждаются проблемы вычисления статистической суммы. Выводится формула Саха.
5	Зависимость коэффициента поглощения от частоты в непрерывном спектре. Рассматриваются механизмы непрерывного поглощения. Выводятся формулы для коэффициенты объемного поглощения водородоподобными атомами и ионами и формула для учета отрицательного поглощения. Рассматриваются поглощение отрицательным ионом водорода и рассеяние излучения на свободных частицах.
6	Гидростатическое равновесие. Выводится основное уравнение гидростатического равновесия. Рассматривается случай чисто газового давления. Выводится формула для давления излучения. Рассматриваются турбулентное и магнитное давление.
7	Модели атмосфер. Дается определение и обсуждаются необходимые исходные данные и основные предположения. Излагается подробный порядок действий, необходимых для построения модели на первой итерации. Записывается условие сходимости итерационного процесса. Изучаются причины возможной расходимости.
8	Коэффициент поглощения в линии. Перечисляются механизмы уширения линии. Подробно рассматриваются механизмы уширения: естественное, доплеровское, за счет взаимодействия. Выводятся формулы для коэффициента поглощения с учетом уширения этими механизмами.

9	Образование линий поглощения при ЛТР. Вводятся характеристики линии поглощения: остаточная интенсивность, глубина, эквивалентная ширина. Рассматриваются механизмы поглощения в линии. Записывается уравнение переноса излучения в линии
10	Линии поглощения при когерентном рассеянии. Вводится понятие обращаемого слоя и делаются другие упрощения, необходимые для аналитического решения уравнения переноса в линии. Находится решение уравнения переноса в предположении Шустера-Шварцшильда. Изучаются изменения профиля линии с увеличением числа поглощающих атомов.
11	Кривая роста. Дается определение. Перечисляются задачи, решаемые методом кривых роста. Выводится основная формула для модели Шустера-Шварцшильда, дается ее графическое представление и анализ.
12	Уравнения равновесия звезды Выводится уравнение механического равновесия. Вычисляются распределения плотности и температуры внутри звезды. Выводятся уравнение энергетического равновесия и уравнение лучистого равновесия. Рассматривается стандартная модель звезды в приближении Эддингтона.
13	Уравнения состояния звездного вещества Записывается уравнение состояния идеального газа. Выводятся уравнения состояния при нерелятивистском вырождении; слабое и сильное вырождение. Выводится уравнение состояния вырожденного релятивистского электронного газа.
14	Конвекция внутри звезд Рассматривается условие устойчивости лучистого равновесия. Выводится критерий Шварцшильда. Находится условие конвективного равновесия. Рассматривается конвекция в химически неоднородных средах – выводится критерий Леду.
15	Поглощение излучения внутри звезд Определение средней молекулярной массы. Рассматриваются разные виды непрозрачности вещества внутри звезд. Выводятся уравнения для коэффициентов поглощения.
16	Тепловое равновесие Формулируется теорема вириала. Вводятся тепловая, гравитационная и термоядерная энергии звезды. Вычисляется кельвиновское и ядерное время жизни звезды. Выводится уравнение теплового равновесия.
17	Термоядерные реакции внутри звезд Выводится формула для определения вероятности термоядерных реакций. Рассматриваются реакции pp-цепочки, реакции CNO-цикла, тройного Альфа-процесса. Вычисляются равновесные содержания элементов, скорость энерговыделения и скорости изменения содержания водорода и гелия. Рассматриваются дополнительные реакции при основных циклах и реакции превращения тяжелых элементов.
18	Модели внутреннего строения звезд Полная система уравнений. Эволюционная сетка моделей. Уравнения для поверхностных слоев. Физические граничные условия. Оболочки звезд в лучистом и конвективном равновесии. Расчет моделей внутреннего строения для быстрых стадий эволюции.
	ИТОГО

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Тема 1 «Основные уравнения звездных фотосфер»

Цель занятия: изучить характеристики излучения и основные уравнения атмосфер звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Вывести соотношения между характеристиками излучения.
2. Вывести основные уравнения звездных атмосфер:
уравнение переноса излучения в общем случае и для тонкой атмосферы
уравнение лучистого равновесия.
3. Для интегрального потока в толстых атмосферах доказать, что

$$H \sim \frac{1}{r^2}$$

4. Для интегрального потока в тонких атмосферах доказать, что
 $H = \text{const}(r)$.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что называется атмосферой звезды?
2. Как определяется верхняя граница атмосферы?
3. Назовите два слоя в атмосфере и их особенности.
4. Какой механизм переноса энергии работает в атмосферах звезд?
5. Перечислите характеристики поля излучения, дайте им определения и напишите их размерности.
6. Напишите уравнение, связывающее плотность излучения и интенсивность.
7. Напишите уравнение, связывающее поток излучения и интенсивность.
8. Напишите уравнение переноса в самом общем виде.
9. Сформулируйте условие лучистого равновесия.
10. Напишите уравнение лучистого равновесия.
11. Напишите уравнение переноса в сферических координатах.
12. Напишите уравнение переноса в сферических координатах для тонких атмосфер.

Тема 2. «Теория звездных фотосфер в сером приближении»

Цель занятия: изучить приближенный метод анализа звездных атмосфер, проанализировать получаемые решения

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Вывести основные уравнения в сером приближении.
2. Найти приближенные решения основных уравнений по методу Шварцшильда
3. Найти точные решения основных уравнений.
4. Проверить найденные решения по распределению яркости по диску Солнца.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что называется серым приближением?
2. Напишите граничные условия для серого приближения.
3. Сформулируйте основные положения метода Шустера-Шварцшильда
4. Напишите решение для функции источника методом Шустера-Шварцшильда.
5. Напишите точное решение уравнения переноса в сером приближении.
6. Напишите уравнение Милана.
7. Напишите точное уравнение для потока.
8. Дайте определение интегрально-показательной функции.
9. Как можно проверить правильность решений, полученных в разных приближениях?

Тема 3. «Локальное Термодинамическое Равновесие»

Цель занятия: изучить основные положения и уравнения ЛТР
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Вывести выражение для потока,
2. Вывести выражение для функции источника,
3. Получить формулу для интенсивности
4. Найти распределение температуры с глубиной в приближении ЛТР.
5. Проинтегрировать функцию Планка по всем частотам и получить закон $H = \sigma T^4$. Вычислить численное значение постоянной Стефана Больцмана.
6. Рассчитать для Солнца температуру на глубинах $\tau = 1$ и $\tau = 0.1$ в предположении Шустера-Шварцшильда.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Получите закон Кирхгоффа-Планка
2. Напишите функцию Планка.
3. Докажите, что тело в полном термодинамическом равновесии не излучает.

4. Вычислите выходящий поток излучения абсолютно черного тела в пустоте.
5. Получите закон Стефана-Больцмана.
6. Что подразумевает приближение ЛТР?
7. Дайте определение эффективной температуре звезды.
8. Найдите зависимость температуры от глубины при ЛТР в приближении Шустера-Шварцшильда.
9. Получите связь интегрального потока излучения с эффективной температурой звезды.
10. Получите формулу распределения выходящего потока по частоте и по диску звезды.

Тема 4. «Возбуждение и ионизация в условиях ЛТР»

Цель занятия: изучить распределение атомов по степеням ионизации и состояниям возбуждения в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Вывести формулу Саха.
2. Получить логарифмическую форму записи формулы Саха.
3. Потенциал ионизации водорода с основного уровня 13.6 эВ. Найдите потенциал ионизации с 1 уровня и потенциал ионизации с 1 уровня, если известна длина волны перехода с основного на 1 уровень, $\lambda = 1216 \text{ \AA}$.
4. Формулу Саха в самом общем виде записать в логарифмической форме.
5. Для Сириуса на глубинах $\tau = 1$ и $\tau = 0.01$ рассчитать степень ионизации железа, $\lg(\text{FeII}/\text{FeI})$ и $\lg(\text{FeIII}/\text{FeII})$.
Известно: $T_{\text{эфф}} = 10000 \text{ K}$,
 $n_e(\tau=1) = 3.9 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $n_e(\tau=0.01) = 1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$,
 $\lg U\text{I} = 1.58$, $\lg U\text{II} = 1.74$, $\lg U\text{III} = 1.40$.
Потенциалы ионизации железа, $\chi_1 = 7.87 \text{ эВ}$, $\chi_2 = 16,16 \text{ эВ}$,
Зависимостью стат. суммы от температуры пренебречь. Температуру на разных глубинах рассчитывать в приближении Чандрасекхара.
Сделать выводы.

Вопросы, выносимые на обсуждение

1. Напишите формулу Больцмана.

2. Что называется статистическим весом?
3. Сформулируйте словами, что выражает формула Больцмана.
4. Что называется потенциалом возбуждения?
5. Как определяется статистическая сумма?
6. Перепишите формулу Больцмана с использованием статистической суммы.
7. Что называется потенциалом ионизации?
8. Напишите формулу Саха.
9. Что выражает формула Саха?

Тема 5. «Поглощение в непрерывном спектре»

Цель занятия: изучить поведение коэффициента поглощения различных агентов в непрерывном спектре

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Вывести формулы для коэффициента объемного поглощения водородоподобными атомами и ионами.
2. Вывести формулу для учета отрицательного поглощения
3. Рассчитать относительную толщину атмосферы звезд по методу Копылова, сделать выводы. Использовать приближение: считать атмосферу чисто водородной.

Для звезд Sp B8, I и V классов светимости, измерено количество атомов водорода на 1 энергетическом уровне в единичном столбе атмосферы, $n_1 h = 5.62 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-1}$. Радиус сверхгиганта $4.9 \cdot 10^{12} \text{ см}$, радиус карлика $1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}$. Средняя по слоям атмосферы, по которым определялось число атомов, температура 11450 К , концентрация свободных электронов $9.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для сверхгиганта, 10^{14} см^{-3} для карлика. Статистический вес 1 уровня водорода 8, статистическая сумма для иона водорода 1. Потенциал ионизации 13.6 эВ , потенциал возбуждения 1 уровня $1.64 \cdot 10^{-11} \text{ эрг}$.

4. Проверьте по размерности формулу, связывающую эйнштейновские вероятности A_{ik} и B_{ik} .
5. Вычислите константу, определяющую эффективное сечение рассеяния на свободных электронах.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Назовите процессы, приводящие к непрерывному поглощению.

2. Когда происходит истинное поглощение, а когда – рассеяние?
3. Дайте определение коэффициенту поглощения на единицу объема, на одну частицу и на единицу массы вещества.
4. Напишите формулу Крамерса для свободно – свободных переходов.
5. Напишите функцию распределения свободных электронов по скоростям.
6. Напишите выражение для коэффициента поглощения на единицу объема вследствие свободно – свободных переходов.
7. Напишите формулу Крамерса для связано – свободных переходов.
8. Напишите выражение для коэффициента поглощения на единицу объема вследствие связано – свободных переходов.
9. Что происходит при отрицательном поглощении?
10. Каков физический смысл Эйнштейновских коэффициентов?
11. Напишите формулы, связывающие Эйнштейновские коэффициенты.
12. Напишите выражение для полного объемного коэффициента поглощения отрицательным ионом водорода.
13. Назовите виды рассеяния в звездных атмосферах.
Напишите объемные коэффициенты поглощения для них.

Тема 6. «Гидростатическое равновесие»

Цель занятия: изучить уравнения, описывающие состояние гидростатического равновесия в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Вывести основное уравнение гидростатического равновесия.
2. Проанализировать случай чисто газового давления.
3. Вывести формулу для давления излучения.
4. Для звезды α^2 CVn рассчитать газовое давление и давление излучения (по приближенной формуле) на оптической глубине $\tau_R = 1$. Параметры звезды: $T_e = 11500$ К, $\mu \approx 1$. Плотность вещества на указанной глубине $1.25 \cdot 10^{-9}$ г/см³.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что выражает уравнение гидростатического равновесия?
2. Напишите уравнение гидростатического равновесия.
3. Из чего складывается полное давление?
4. В чем причина давления излучения?
5. Напишите уравнение для давления излучения.
6. Выразите давление излучения через локальную температуру.
7. Что называется микротурбулентным движением?

Тема 7. «Модели атмосфер звезд»

Цель занятия: изучить алгоритм расчета моделей атмосфер звезд.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Найти зависимость давления излучения от температуры для случая ЛТР и распределения температуры по глубине, полученного в сером приближении по Эддингтону.
2. Получить рабочую формулу для предельной светимости Эддингтона, выразив массу в солнечных единицах и вычислив численный коэффициент
3. Для α^2 CVn рассчитать давление газовое, давление излучения и давления микротурбулентии на $\tau = 1$. Температуру найти по формуле для серого приближения по Шустеру-Шварцшильду. Характеристики α^2 CVn: $T_{\text{эфф}} = 11500$ К, $\lg g = 4.0$, $V_{\text{mt}} = 2$ км/с. Взять $\mu = 1$, плотность вещества на $\tau = 1$, $\rho = 1.25 \cdot 10^{-9}$ г/см³.
4. Рассчитать логарифм ускорения силы тяжести на поверхности звезды, масса которой 3.2 массы Солнца и радиус 2.5 радиусов Солнца.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Перечислите исходные параметры, необходимые для построения модели атмосферы звезды.
2. Сформулируйте физические предположения, принимаемые для упрощения задачи.
3. Перечислите физические предположения на первой итерации
4. Перечислите последовательность действий на первой итерации.
5. Как выполняется коррекция распределения температуры с глубиной?
6. Перечислите причины возможной расходимости итерационного процесса.
7. Напишите выражение для предельной светимости звезды (светимость Эддингтона).

Тема 8. «Коэффициент поглощения в линии»

Цель занятия: изучить механизмы уширения линий в спектрах звезд
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Рассчитать уширение линии FeII 4923.93Å с фактором Ланде 1.69 в магнитном поле с напряженностью 10 КГс.

2. Рассчитать доплеровскую ширину линии HeI 4387 Å в звезде с $T=20000$ К, на глубине $\tau=0.1$.
3. Рассчитать доплеровскую ширину линии FeI 4271.76 Å в звезде с $T=6000$ К, на глубине $\tau=0.1$.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Перечислите механизмы уширения линий.
2. Почему возникает естественное уширение?
3. Напишите формулу для изменения населенности уровня вследствие спонтанных переходов.
4. Какие линии называются резонансными и субординатными?
5. Напишите выражение для коэффициента поглощения вследствие естественного уширения.
6. В чем причина доплеровского уширения линий?
7. Напишите выражение для коэффициента поглощения в линии вследствие 2-х механизмов уширения: естественного и доплеровского.
8. Чем определяется профиль линии в ядре и в крыльях?
9. Напишите функцию Фойгта и ее аппроксимацию для ядра и крыльев.
10. Назовите механизмы уширения вследствие взаимодействия.
11. Взаимодействие каких частиц приводит к линейному эффекту Штарка, квадратичному эффекту Штарка и к эффекту Ван-дер-Ваальса?

Тема 9. “Образование линий поглощения при ЛТР”

Цель занятия: изучить механизмы формирования линий поглощения в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

Вывести уравнение переноса излучения в линии

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Дайте определение остаточной интенсивности линии.
2. Дайте определение эквивалентной ширины линии.
3. За счет каких процессов возникают линии поглощения?
4. Какие линии видны, а какие не видны на краю диска Солнца и почему?
5. В каких звездах эффективен механизм истинного поглощения, а в каких – рассеяния?
6. Напишите уравнение переноса в линии.
7. Почему возникает некогерентное рассеяние?
8. Что называется флюоресценцией?

Тема 10. «Линии поглощения при когерентном рассеянии»

Цель занятия: изучить методы анализа линий поглощения в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Вывести основную формулу для модели Шустера-Шварцшильда.
2. Нарисовать график зависимости эквивалентной ширины линии от числа поглощающих атомов, провести его анализ.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Перечислите упрощающие предположения, необходимые для получения аналитической формулы для функции источника в линии, напишите эту формулу.
2. Для каких случаев применима модель с обращаемым слоем?
3. Сформулируйте граничные условия для модели с обращаемым слоем.
4. Напишите формулу для остаточной интенсивности в линии.
5. Объясните, как ведут себя линии с увеличением числа поглощающих частиц.

Тема 11. «Кривая роста»

Цель занятия: изучить метод «кривых роста».

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи:

1. Для атмосферы Сириуса рассчитать на сколько неучет микротурбулентной скорости изменит температуру звезды на глубине 0.01τ , если определять ее по линиям железа. Микротурбулентная скорость равна 2.2 км./с , $T(\tau=0.01) = 8000 \text{ К}$.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что называют кривой роста?
2. От каких параметров зависит эквивалентная ширина линии?
3. Что можно определить методом кривой роста?
4. Напишите формулу для слабых линий.
5. Напишите формулу для насыщенных линий без крыльев.
6. Напишите формулу для насыщенных линий с крыльями.
7. Дать определение поверхностного магнитного поля.
8. Как магнитное поле влияет на линии?

9. Что такое блендирование линий?

Тема 12 «Уравнения равновесия звезды»

Цель занятия: изучить уравнения равновесия звезды.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Вывести уравнение механического равновесия.
2. Вывести уравнение Эмдена.
3. Вывести уравнение энергетического равновесия.
4. Вывести уравнение лучистого равновесия.
5. Вывести уравнение Эддингтона.
6. Вывести формулы для плотности, температуры и давления в центре звезды.
7. Вычислить значения плотности, температуры и давления в центре Солнца, используя его интегральные характеристики, значение политропного индекса, $n = 3$, $\mu = 1$, и зная, что $x_1 = 6.90$,
 $y'(x_1) = -4.24 \cdot 10^{-2}$.
8. Написать формулы для $\rho(r)$, $P(r)$, $T(r)$, годные для любой звезды, выразив их через соответствующие формулы и интегральные характеристики Солнца.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Сформируйте общую постановку задачи теории внутреннего строения и эволюции звёзд.
2. Напишите уравнение механического равновесия.
3. Что называется политропным индексом?
4. Напишите уравнение Эмдена.
5. Напишите граничные условия для решения уравнения Эмдена.
6. Какими граничными условиями надо пользоваться, чтобы найти распределение плотности с глубиной?
7. Почему в уравнение для плотности стоит «-»?
8. Дайте определение скорости энерговыведения.
9. Напишите уравнение энергетического равновесия.
10. Напишите уравнение лучистого равновесия.
11. На каких предположениях основана стационарная модель Эддингтона?
12. Напишите уравнение для стандартной модели Эддингтона.

Тема 13. «Уравнения состояния звездного вещества»

Цель занятия: изучить уравнения состояния вещества в звездах.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Записать уравнение состояния идеального газа внутри звезды.
2. Записать уравнение состояния при нерелятивистском вырождении для случая слабого вырождения.
3. Вывести уравнение состояния при нерелятивистском вырождении для случая сильного вырождения.
4. Вывести уравнение состояния вырожденного релятивистского электронного газа.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. В каком состоянии находится вещество в центре Солнца и других звёздах ГП и почему?
2. В чем причины вырождения электронного газа?
3. Напишите распределение электронов по импульсам – уравнение Ферми-Дирака.
4. Напишите систему уравнений, определяющих состояние нерелятивистски вырожденного электронного газа.
5. Напишите уравнение состояния сильно вырожденного нерелятивистского электронного газа.
6. Чем определяется максимальный импульс электронов в вырожденном состоянии?
7. Напишите систему уравнений, определяющих состояние релятивистски вырожденного электронного газа.
8. Как найти концентрацию электронов, определяющую переход от идеального газа к вырожденному и от нерелятивистского к релятивистскому вырождению?

Тема 14. «Конвекция внутри звезд»

Цель занятия: изучить условия установления конвекции внутри звезд
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Вывести условие устойчивости среды в общем случае.

2. Вывести критерий Шварцшильда.
3. Вывести критерий Леду.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите критерий устойчивости лучистого равновесия.
2. Напишите выражение для адиабатического градиента.
3. Сформулируйте критерий Шварцшильда.
4. Напишите критерий Леду. В каких средах надо его применять?
5. К чему приводит возникновение конвекции?
6. Какой градиент устанавливается внутри звёзд в результате конвекции?

Тема 15. «Поглощение излучения внутри звезд»

Цель занятия: изучить механизмы поглощения излучения внутри звезд.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Рассчитать среднюю безразмерную массу одной частицы в центре Солнца, где $X = 0.38$, $Y = 0.59$, и в атмосфере Солнца, где $X = 0.71$, $Y = 0.265$.
2. Вывести уравнение для коэффициентов поглощения вследствие bound-free переходов.
3. Вывести уравнение для коэффициентов поглощения вследствие free-free переходов.
4. Вывести формулу для концентрации свободных электронов.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите выражение для средней массы 1 частицы для произвольной смеси химических элементов.
2. Выразите среднюю массу 1 частицы через относительные весовые вклады H, He и металлов.
3. Какие механизмы поглощения действуют внутри звёзд?
4. Дайте определение планковского коэффициента поглощения.
5. Напишите выражение для концентрации электронов внутри звёзд.
6. Напишите окончательные формулы для средних коэффициентов поглощения.

Тема 16. «Тепловое равновесие»

Цель занятия: изучить условия теплового равновесия в звездах.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Вывести теорему вириала для звезды.
2. Вывести уравнение теплового равновесия.
3. Рассчитать гравитационную энергию и кельвиновский период сжатия Солнца.
4. Рассчитать максимальную ядерную энергию и ядерное время жизни Солнца.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите формулу для тепловой энергии звёзды.
2. Дайте определение и напишите формулу для гравитационной энергии.
3. Сформулируйте теорему вириала для стационарной звезды.
4. Как вычислить кельвиновское время жизни звёзд?
5. Как вычислить ядерное время жизни звёзд?
6. Когда нужно применять уравнение энергетического равновесия?
7. Напишите уравнение теплового равновесия.
8. Что следует из уравнения теплового равновесия?

Тема 17. «Термоядерные реакции»

Цель занятия: изучить термоядерные реакции, протекающие внутри звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Рассчитать энергосвечение в реакциях pp-цепочки.
2. Рассчитать энергосвечение в реакциях CNO-цикла.
3. Рассчитать равновесное относительное содержание изотопов в реакциях CNO-цикла.
4. Получить формулу для вероятности 3α -процесса.
5. Рассчитать энергосвечение в реакциях 3α -процесса.
6. Получить уравнения для скоростей изменения содержаний водорода и гелия.
7. Написать уравнения термоядерных реакций Ne-Na цикла.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. При каких температурах идут термоядерные реакции в звёздах и почему?
2. По каким причинам термоядерные реакции в звездах возможны?
3. В каких звёздах идут реакции PP-цепочки?
4. Напишите реакции PP-цепочки.
5. В каких звёздах идут реакции CNO-цикла?
6. Напишите реакции CNO-цикла.
7. Что происходит со звёздами после выгорания всего водорода в ядре?
8. Напишите формулу для вероятности термоядерной реакции.
9. Как определить характерное время термоядерной реакции?
10. Что характерно для равновесного хода термоядерной реакции, почему оно устанавливается?
11. Напишите реакции 3- α процесса.
12. Напишите уравнение для вероятности реакций 3- α процесса.
13. Напишите уравнение для скоростей энерговыделения в реакциях PP-цикла,
CNO-цикла и 3- α процесса.
14. Получите уравнение для скоростей изменения содержания водорода и гелия.
15. При каких условиях происходят реакции разрушения изотопов Li, Be и B? Напишите эти реакции.
16. Перечислите механизмы синтеза изотопов Li, Be и B в современную эпоху.
17. Приведите примеры реакций взаимодействия космических лучей с частицами
межзвёздной среды.
18. Объясните механизм синтеза дейтерия при взрывах SN.
19. Объясните механизм синтеза Li в красных гигантах.
20. Напишите реакции побочных ветвей PP-цепочки.
21. Напишите реакции NeNa-цикла. Где и при каких условиях они идут?
22. Напишите цепочки реакций последовательного захвата α -частиц в массивных звёздах.
23. Какой вид имеет кривая распространённости химических элементов во Вселенной и почему?
24. Напишите реакции горения углерода и кислорода. Где и когда они идут?
25. Что называют дефектом массы и энергией связи?
26. Как образуются элементы тяжелее железа?

Тема 18. «Модели внутреннего строения звезд»

Цель занятия: изучить методы построения моделей внутреннего строения звезд

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Задачи

1. Вывести уравнение для оболочки звезды в лучистом равновесии.
2. Вывести уравнение для оболочки звезды в конвективном равновесии.
3. Написать уравнения для газовых характеристик
4. Для Солнца рассчитать давление на глубине $r = 0.8 R$, где $T = 1.27 \cdot 10^6$ К. Известно: $M = 2 \cdot 10^{33}$ г, $L = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с, $R = 7 \cdot 10^{10}$ см, $\kappa_R(\tau=1) = 0.4$ см²/г.
5. Рассчитать нормировочные множители для температуры и давления в модели внутреннего строения Солнца.

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите систему основных уравнений. Перечислите неизвестные функции, входящие в эту систему.
2. Какими уравнениями нужно дополнить систему основных уравнений?
3. Какие нужны граничные условия для основной системы уравнений?
4. Чем определяется химический состав внутри звезды?
5. Как строится эволюционная сетка моделей внутреннего строения звёзд?
6. Назовите две группы звёзд, на которые делятся все звёзды ГП и перечислите их особенности.
7. Назовите две области внутри звёзд, для которых нужно писать разные системы уравнений.
8. Почему поверхностные слои важны для построения моделей внутреннего строения звёзд?
9. Как определяют поверхность звезды?
10. Напишите граничное условие для температуры на поверхности звезды.
11. Чему равна оптическая глубина на поверхности?
12. Напишите граничное условие для давления на поверхности звезды.
13. Напишите уравнение, связывающее давление и температуру в оболочках массивных звёзд.
14. То же для оболочек звёзд с $M \leq M_{\odot}$.
15. Как рассчитать изменение внутренней структуры звезды в периоды быстрой, неравновесной эволюции?
16. Что означает расходимость вычислительного процесса?

17. Как выполняется численное интегрирование при расчете модели внутреннего строения звезд по методу Мартина Шварцшильда?
18. Какие стандартные преобразования делают для перехода к безразмерным величинам? Зачем?

Список рекомендуемой литературы

1. Рекомендуемая литература.

Перечень основной литературы:

Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. 2018.

Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М., Наука, 3-е изд., 1985.

Сахибуллин Н.А. Методы моделирования в астрофизике. I. Звездные атмосферы. Казань, Фэн, 1997.

Шварцшильд М., Строение и эволюция звезд. УРСС, 4-е изд., 2009.

Перечень дополнительной литературы:

1. Ред. Михайлов А.А. Курс астрофизики и звездной астрономии. Т.2. 1964.

2. Мартынов Д.А. Курс общей астрофизики. 4-е изд., 1988

3. Мустель Р. Избранные труды. Физические процессы на звездах и на Солнце., 1991.

4. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М., Мир, 1980.

5. Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд: теория и наблюдения., М., Наука, 1988.

1.3. Интернет-ресурсы:

1. www.astronet.ru

2. www.sao.ru

3. www.allplanets.ru

4. www.exoplanet.eu

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

Внутреннее строение и атмосферы звезд

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы

Направления подготовки 03.03.02 Физика

Направленность (профиль)

«Фундаментальная и прикладная физика»

Ставрополь

2026

Содержание

Пояснительная записка

Виды и содержание самостоятельной работы студента; формы
контроля

Контрольные точки и виды отчетности

Методические рекомендации по изучению теоретического ма-
териала

Список рекомендуемой литературы

Пояснительная записка

Все виды самостоятельной работы студентов по дисциплине «Внутреннее строение и атмосферы звезд», предусмотренные учебным планом и рабочей программой, направлены на осуществление следующих основных целей:

- *овладение знаниями*: изучение источников литературы по темам дисциплины; учебно-исследовательская работа; использование компьютерной техники, Интернет;
- *закрепление и систематизация знаний*: работа с конспектом лекции (обработка текста); повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио- и видеозаписей); составление плана и тезисов ответа; ответы на контрольные вопросы; аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, конспект, анализ и др.); подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции; подготовка рефератов, докладов; составление библиографии; тестирование и др.;
- *формирование умений*: решение задач и упражнений по образцу; решение нелинейных задач математической физики; математическое моделирование разного рода физических процессов; подготовка курсовых и дипломных работ (проектов); экспериментальная работа; рефлексивный анализ профессиональных умений с использованием аудио- и видеотехники и др.

Основными **формами работы и контроля** самостоятельной работы студентов являются:

Индивидуальное решение репродуктивных, реконструктивных и творческих **заданий**, позволяющих оценивать и диагностировать уровень обученности, уровень умений и навыков студентов по дисциплине.

Собеседование - форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя со студентом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, рассчитанная на выяснение объема знаний студента по определенному разделу, теме, проблеме и т. п., позволяющая оценить их знания по теме, умение аргу-

ментировать собственную точку зрения, предполагающая всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

Виды и содержание самостоятельной работы студента; формы контроля

№	Наименование разделов и тем дисциплины, вид самостоятельной работы	Форма контроля
1	Основные уравнения звездных фотосфер.	Устный опрос
2	Серая фотосфера.	Устный опрос
3	Локальное термодинамическое равновесие. температуры с глубиной в приближении ЛТР.	Устный опрос
4	Возбуждение и ионизация в условиях ЛТР	Устный опрос
5	Зависимость коэффициента поглощения от частоты в непрерывном спектре.	Устный опрос
6	Гидростатическое равновесие.	Устный опрос
7	Модели атмосфер.	Устный опрос
8	Коэффициент поглощения в линии.	Устный опрос
9	Образование линий поглощения при ЛТР.	Устный опрос
10	Линии поглощения при когерентном рассеянии.	Устный опрос
11	Кривая роста.	Устный опрос
12	Уравнения равновесия звезды	Устный опрос
13	Уравнения состояния звездного вещества	Устный опрос
14	Конвекция внутри звезд	Устный опрос
15	Поглощение излучения внутри звезд	Устный опрос
16	Тепловое равновесие	Устный опрос
17	Термоядерные реакции внутри звезд	Устный опрос
18	Модели внутреннего строения звезд	Устный опрос

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

При изучении теоретического материала по дисциплине «Внутреннее строение и атмосферы звезд» основополагающим для студента является курс

лекций по данной дисциплине, составленный в соответствии с учебной программой. При использовании дополнительных источников литературы следует придерживаться плана и содержания изучаемой дисциплины, представленного в учебной программе.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

Тема 1 «Основные уравнения звездных фотосфер»

Цель занятия: изучить характеристики излучения и основные уравнения атмосфер звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что называется атмосферой звезды?
2. Как определяется верхняя граница атмосферы?
3. Назовите два слоя в атмосфере и их особенности.
4. Какой механизм переноса энергии работает в атмосферах звезд?
5. Перечислите характеристики поля излучения, дайте им определения и напишите их размерности.
6. Напишите уравнение, связывающее плотность излучения и интенсивность.
7. Напишите уравнение, связывающее поток излучения и интенсивность.
8. Напишите уравнение переноса в самом общем виде.
9. Сформулируйте условие лучистого равновесия.
10. Напишите уравнение лучистого равновесия.
11. Напишите уравнение переноса в сферических координатах.
12. Напишите уравнение переноса в сферических координатах для тонких атмосфер.

Тема 2. «Теория звездных фотосфер в сером приближении»

Цель занятия: изучить приближенный метод анализа звездных атмосфер, проанализировать получаемые решения

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что называется серым приближением?
2. Напишите граничные условия для серого приближения.
3. Сформулируйте основные положения метода Шустера-Шварцшильда
4. Напишите решение для функции источника методом Шустера-Шварцшильда.
5. Напишите точное решение уравнения переноса в сером приближении.
6. Напишите уравнение Милана.

7. Напишите точное уравнение для потока.
8. Дайте определение интегрально-показательной функции.
9. Как можно проверить правильность решений, полученных в разных приближениях?

Тема 3. «Локальное Термодинамическое Равновесие»

Цель занятия: изучить основные положения и уравнения ЛТР
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

11. Получите закон Кирхгоффа-Планка
12. Напишите функцию Планка.
13. Докажите, что тело в полном термодинамическом равновесии не излучает.
14. Вычислите выходящий поток излучения абсолютно черного тела в пустоте.
15. Получите закон Стефана-Больцмана.
16. Что подразумевает приближение ЛТР?
17. Дайте определение эффективной температуре звезды.
18. Найдите зависимость температуры от глубины при ЛТР в приближении Шустера-Шварцшильда.
19. Получите связь интегрального потока излучения с эффективной температурой звезды.
20. Получите формулу распределения выходящего потока по частоте и по диску звезды.

Тема 4. «Возбуждение и ионизация в условиях ЛТР»

Цель занятия: изучить распределение атомов по степеням ионизации и состояниям возбуждения в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите формулу Больцмана.
2. Что называется статистическим весом?
3. Сформулируйте словами, что выражает формула Больцмана.
4. Что называется потенциалом возбуждения?
5. Как определяется статистическая сумма?
6. Перепишите формулу Больцмана с использованием статистической суммы.
7. Что называется потенциалом ионизации?
8. Напишите формулу Саха.
9. Что выражает формула Саха?

Тема 5. «Поглощение в непрерывном спектре»

Цель занятия: изучить поведение коэффициента поглощения различных агентов в непрерывном спектре

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Назовите процессы, приводящие к непрерывному поглощению.
2. Когда происходит истинное поглощение, а когда – рассеяние?
3. Дайте определение коэффициенту поглощения на единицу объема, на одну частицу и на единицу массы вещества.
4. Напишите формулу Крамерса для свободно – свободных переходов.
5. Напишите функцию распределения свободных электронов по скоростям.
6. Напишите выражение для коэффициента поглощения на единицу объема вследствие свободно – свободных переходов.
7. Напишите формулу Крамерса для связанно – свободных переходов.
8. Напишите выражение для коэффициента поглощения на единицу объема вследствие связанно – свободных переходов.
9. Что происходит при отрицательном поглощении?
10. Каков физический смысл Эйнштейновских коэффициентов?
11. Напишите формулы, связывающие Эйнштейновские коэффициенты.
12. Напишите выражение для полного объемного коэффициента поглощения отрицательным ионом водорода.
13. Назовите виды рассеяния в звездных атмосферах.
Напишите объемные коэффициенты поглощения для них.

Тема 7. «Гидростатическое равновесие»

Цель занятия: изучить уравнения, описывающие состояние гидростатического равновесия в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что выражает уравнение гидростатического равновесия?
2. Напишите уравнение гидростатического равновесия.
3. Из чего складывается полное давление?
4. В чем причина давления излучения?
5. Напишите уравнение для давления излучения.
6. Выразите давление излучения через локальную температуру.
7. Что называется микротурбулентным движением?

Тема 7. «Модели атмосфер звезд»

Цель занятия: изучить алгоритм расчета моделей атмосфер звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Перечислите исходные параметры, необходимые для построения модели атмосферы звезды.
2. Сформулируйте физические предположения, принимаемые для упрощения задачи.
3. Перечислите физические предположения на первой итерации
4. Перечислите последовательность действий на первой итерации.
5. Как выполняется коррекция распределения температуры с глубиной?
6. Перечислите причины возможной расходимости итерационного процесса.
7. Напишите выражение для предельной светимости звезды (светимость Эддингтона).

Литература основная: 1.

Литература дополнительная: 1, 3, 5.

Интернет-ресурсы: 1, 3, 4.

Тема 8. «Коэффициент поглощения в линии»

Цель занятия: изучить механизмы уширения линий в спектрах звезд

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Перечислите механизмы уширения линий.
2. Почему возникает естественное уширение?
3. Напишите формулу для изменения населенности уровня вследствие спонтанных переходов.
4. Какие линии называются резонансными и субординатными?
5. Напишите выражение для коэффициента поглощения вследствие естественного уширения.
6. В чем причина доплеровского уширения линий?
7. Напишите выражение для коэффициента поглощения в линии вследствие 2-х механизмов уширения: естественного и доплеровского.
8. Чем определяется профиль линии в ядре и в крыльях?
9. Напишите функцию Фойгта и ее аппроксимацию для ядра и крыльев.
10. Назовите механизмы уширения вследствие взаимодействия.
11. Взаимодействие каких частиц приводит к линейному эффекту Штарка, квадратичному эффекту Штарка и к эффекту Ван-дер-Ваальса?

Тема 9. “Образование линий поглощения при ЛТР”

Цель занятия: изучить механизмы формирования линий поглощения в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Дайте определение остаточной интенсивности линии.

2. Дайте определение эквивалентной ширины линии.
3. За счет каких процессов возникают линии поглощения?
4. Какие линии видны, а какие не видны на краю диска Солнца и почему?
5. В каких звездах эффективен механизм истинного поглощения, а в каких – рассеяния?
6. Напишите уравнение переноса в линии.
7. Почему возникает некогерентное рассеяние?
8. Что называется флюоресценцией?

Тема 10. «Линии поглощения при когерентном рассеянии»

Цель занятия: изучить методы анализа линий поглощения в атмосферах звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

6. Перечислите упрощающие предположения, необходимые для получения аналитической формулы для функции источника в линии, напишите эту формулу.
7. Для каких случаев применима модель с обращаемым слоем?
8. Сформулируйте граничные условия для модели с обращаемым слоем.
9. Напишите формулу для остаточной интенсивности в линии.
10. Объясните, как ведут себя линии с увеличением числа поглощающих частиц.

Тема 11. «Кривая роста»

Цель занятия: изучить метод «кривых роста».

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Что называют кривой роста?
2. От каких параметров зависит эквивалентная ширина линии?
3. Что можно определить методом кривой роста?
4. Напишите формулу для слабых линий.
5. Напишите формулу для насыщенных линий без крыльев.
6. Напишите формулу для насыщенных линий с крыльями.
7. Дать определение поверхностного магнитного поля.
8. Как магнитное поле влияет на линии?

Тема 12 «Уравнения равновесия звезды»

Цель занятия: изучить уравнения равновесия звезды.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Сформируйте общую постановку задачи теории внутреннего строения и эволюции звёзд.
2. Напишите уравнение механического равновесия.
3. Что называется политропным индексом?
4. Напишите уравнение Эмдена.
5. Напишите граничные условия для решения уравнения Эмдена.
6. Какими граничными условиями надо пользоваться, чтобы найти распределение плотности с глубиной?
7. Почему в уравнение для плотности стоит «-»?
8. Дайте определение скорости энергосвыведения.
9. Напишите уравнение энергетического равновесия.
10. Напишите уравнение лучистого равновесия.
11. На каких предположениях основана стационарная модель Эддингтона?
12. Напишите уравнение для стандартной модели Эддингтона.

Тема 13. «Уравнения состояния звездного вещества»

Цель занятия: изучить уравнения состояния вещества в звездах.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. В каком состоянии находится вещество в центре Солнца и других звёздах ГП и почему?
2. В чем причины вырождения электронного газа?
3. Напишите распределение электронов по импульсам – уравнение Ферми-Дирака.
4. Напишите систему уравнений, определяющих состояние нерелятивистски вырожденного электронного газа.
5. Напишите уравнение состояния сильно вырожденного нерелятивистского электронного газа.
6. Чем определяется максимальный импульс электронов в вырожденном состоянии?
7. Напишите систему уравнений, определяющих состояние релятивистски вырожденного электронного газа.
8. Как найти концентрацию электронов, определяющую переход от идеального газа к вырожденному и от нерелятивистского к релятивистскому вырождению?

Тема 14. «Конвекция внутри звезд»

Цель занятия: изучить условия установления конвекции внутри звезд
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите критерий устойчивости лучистого равновесия.
2. Напишите выражение для адиабатического градиента.
3. Сформулируйте критерий Шварцшильда.
4. Напишите критерий Леду. В каких средах надо его применять?
5. К чему приводит возникновение конвекции?
6. Какой градиент устанавливается внутри звёзд в результате конвекции?

Тема 15. «Поглощение излучения внутри звезд»

Цель занятия: изучить механизмы поглощения излучения внутри звезд.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

3. Напишите выражение для средней массы 1 частицы для произвольной смеси химических элементов.
4. Выразите среднюю массу 1 частицы через относительные весовые вклады H, He и металлов.
3. Какие механизмы поглощения действуют внутри звёзд?
4. Дайте определение планковского коэффициента поглощения.
5. Напишите выражение для концентрации электронов внутри звёзд.
6. Напишите окончательные формулы для средних коэффициентов поглощения.

Тема 16. «Тепловое равновесие»

Цель занятия: изучить условия теплового равновесия в звездах.
Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. Напишите формулу для тепловой энергии звёзды.
2. Дайте определение и напишите формулу для гравитационной энергии.
3. Сформулируйте теорему вириала для стационарной звезды.
4. Как вычислить кельвиновское время жизни звёзд?
5. Как вычислить ядерное время жизни звёзд?

6. Когда нужно применять уравнение энергетического равновесия?
7. Напишите уравнение теплового равновесия.
8. Что следует из уравнения теплового равновесия?

Тема 17. «Термоядерные реакции»

Цель занятия: изучить термоядерные реакции, протекающие внутри звезд.

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

1. При каких температурах идут термоядерные реакции в звёздах и почему?
2. По каким причинам термоядерные реакции в звёздах возможны?
3. В каких звёздах идут реакции PP-цепочки?
4. Напишите реакции PP-цепочки.
5. В каких звёздах идут реакции CNO-цикла?
6. Напишите реакции CNO-цикла.
7. Что происходит со звёздами после выгорания всего водорода в ядре?
8. Напишите формулу для вероятности термоядерной реакции.
9. Как определить характерное время термоядерной реакции?
10. Что характерно для равновесного хода термоядерной реакции, почему оно устанавливается?
11. Напишите реакции 3- α процесса.
12. Напишите уравнение для вероятности реакций 3- α процесса.
13. Напишите уравнение для скоростей энерговыделения в реакциях PP-цикла, CNO-цикла и 3- α процесса.
14. Получите уравнение для скоростей изменения содержаний водорода и гелия.
15. При каких условиях происходят реакции разрушения изотопов Li, Be и B? Напишите эти реакции.
16. Перечислите механизмы синтеза изотопов Li, Be и B в современную эпоху.
17. Приведите примеры реакций взаимодействия космических лучей с частицами межзвёздной среды.
18. Объясните механизм синтеза дейтерия при взрывах SN.
19. Объясните механизм синтеза Li в красных гигантах.
20. Напишите реакции побочных ветвей PP-цепочки.
21. Напишите реакции NeNa-цикла. Где и при каких условиях они идут?

22. Напишите цепочки реакций последовательного захвата α -частиц в массивных звёздах.
23. Какой вид имеет кривая распространённости химических элементов во Вселенной и почему?
24. Напишите реакции горения углерода и кислорода. Где и когда они идут?
25. Что называют дефектом массы и энергией связи?
26. Как образуются элементы тяжелее железа?

Тема 18. «Модели внутреннего строения звезд»

Цель занятия: изучить методы построения моделей внутреннего строения звезд

Организационная форма занятия: лабораторная работа

Вопросы, выносимые на обсуждение:

2. Напишите систему основных уравнений. Перечислите неизвестные функции, входящие в эту систему.
2. Какими уравнениями нужно дополнить систему основных уравнений?
3. Какие нужны граничные условия для основной системы уравнений?
4. Чем определяется химический состав внутри звезды?
5. Как строится эволюционная сетка моделей внутреннего строения звёзд?
6. Назовите две группы звёзд, на которые делятся все звёзды ГП и перечислите их особенности.
7. Назовите две области внутри звёзд, для которых нужно писать разные системы уравнений.
8. Почему поверхностные слои важны для построения моделей внутреннего строения звёзд?
9. Как определяют поверхность звезды?
10. Напишите граничное условие для температуры на поверхности звезды.
11. Чему равна оптическая глубина на поверхности?
12. Напишите граничное условие для давления на поверхности звезды.
13. Напишите уравнение, связывающее давление и температуру в оболочках массивных звёзд.
14. То же для оболочек звёзд с $M \leq M_{\odot}$.
15. Как рассчитать изменение внутренней структуры звезды в периоды быстрой, неравновесной эволюции?
16. Что означает расходимость вычислительного процесса?
17. Как выполняется численное интегрирование при расчете модели внутреннего строения звезд по методу Мартина Шварцшильда?
18. Какие стандартные преобразования делают для перехода к безразмерным величинам? Зачем?

По результатам изучения теоретического материала преподавателем осуществляется контроль полученных студентом знаний, формами которого являются собеседование и доклад рефератов.

Собеседование - форма учебной деятельности, специальная беседа преподавателя со студентом на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, рассчитанная на выяснение объема знаний студента по определенному разделу, теме, проблеме и т.п., позволяющая оценить их умение аргументировать собственную точку зрения, предполагающая всестороннее обсуждение какого-либо вопроса, проблемы или сопоставлении информации, идей, мнений, предложений.

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя:

- отдельное собеседование по каждой из указанных тем;
- составленные аспирантом конспекты научной литературы;
- анализ аспирантом публицистического материала.

Принципиальные отличия заданий базового уровня от повышенного заключаются в большем объеме фактов и событий, в сравнительно-аналитическом характере изложения материала, его теоретической (методологической) составляющей.

Для подготовки к каждой теме следует изучить и законспектировать рекомендованные источники и научную литературу и на их основании подготовиться к указанным в методических материалах вопросам для обсуждения.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования указанными конспектами.

При проверке задания, оцениваются:

- активное участие в работе;
- уверенное владение материалом;
- умение четко и логично излагать свои мысли;
- умение творчески подходить к решению основных вопросов темы;

- самостоятельность мышления,
- полное соответствие конспекта установленным требованиям;
- самостоятельная устная речь, полностью раскрывающая суть проблематики собеседования.

Критерии оценки самостоятельной работы студентов

Критерии оценивания результатов самостоятельной работы студентов разработаны с учетом требований ФГОС ВО. Задания, выносимые на самостоятельную работу студентов, оцениваются по шкале «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «неудовлетворительно».

Оценка **«отлично»** выставляется при следующих условиях:

- даны исчерпывающие и обоснованные ответы на вопросы, поставленные в задании, выносимом на самостоятельную работу аспирантов;
- показано умение грамотно применять полученные теоретические знания при анализе событий действительности;
- показано глубокое и творческое овладение основной и дополнительной литературой;
- материал излагается аргументировано и логически стройно.

Оценка **«хорошо»** выставляется при следующих условиях:

- даны полные, достаточно глубокие и обоснованные ответы на вопросы, поставленные в задании, выносимом на самостоятельную работу аспирантов;
- показаны достаточно прочные практические навыки;
- даны полные, но недостаточно обоснованные ответы на дополнительные вопросы;
- показаны глубокие знания основной и недостаточное знакомство с дополнительной литературой;
- показано умение теоретически обосновывать высказываемые положения;
- ответы в основном были краткими, но в них не всегда выдерживалась логическая последовательность.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется при следующих условиях.

- даны в основном правильные ответы на все вопросы задания, выносимого на самостоятельную работу аспирантов, но без должной глубины и обоснования;
- не даны положительные ответы на некоторые дополнительные вопросы;
- показаны недостаточные знания основной литературы;
- ответы были многословными, мысли излагались недостаточно четко и без должной логической последовательности.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется в случаях, когда не выполнены условия, позволяющие поставить оценку «удовлетворительно», когда аспирант не усвоил основного содержания предмета и слабо знает рекомендованную литературу.

Список рекомендуемой литературы

1. Рекомендуемая литература.

Перечень основной литературы:

Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. 2018.

Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М., Наука, 3-е изд., 1985.

Сахибуллин Н.А. Методы моделирования в астрофизике. I. Звездные атмосферы. Казань, Фэн, 1997.

Шварцшильд М., Строение и эволюция звезд. УРСС, 4-е изд., 2009.

Перечень дополнительной литературы:

1. Ред. Михайлов А.А. Курс астрофизики и звездной астрономии. Т.2. 1964.

2. Мартынов Д.А. Курс общей астрофизики. 4-е изд., 1988

3. Мустель Р. Избранные труды. Физические процессы на звездах и на Солнце., 1991.

4. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары. М., Мир, 1980.

5. Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд: теория и наблюдения., М., Наука, 1988.

1.3. Интернет-ресурсы:

1. www.astronet.ru
2. www.sao.ru
3. www.allplanets.ru
4. www.exoplanet.eu