

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени
П.К.ШТЕРНБЕРГА
МГУ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ПРАКТИКУМ

по теоретической астрофизике для студентов 5 курса

Внутреннее строение звезд и звездная ЭВОЛЮЦИЯ

Методическое пособие

Москва 2015 г.

Содержание

1	Введение	3
1.1	Содержание файлов	3
1.1.1	Содержание файла history	3
1.1.2	Содержание файла profile	4
2	Строение и эволюция звезд до главной последовательности	9
3	Строение и эволюция газовых планет, коричневых карликов и маломассивных звезд	11
4	Строение и эволюция звезд на главной последовательности	15
5	Строение и эволюция звезд после схода с главной последовательности	17
6	Строение и эволюция звезд на стадии горения гелия	19
7	Поздние стадии эволюции массивных звезд	21
8	Новые звезды	22

1 Введение

Целью практикума является ознакомление с основными закономерностями в строении и эволюции звезд путем анализа результатов современных численных расчетов. Эти расчеты выполнены в программе MESA (<http://mesa.sourceforge.net>) и охватывают эволюцию объектов от массы порядка массы Юпитера до десятков солнечных масс. Программа рассчитывает изменение структуры звезды со временем и предоставляет два типа выходных файлов: `history` и `profile`. Файл `history` содержит основные характеристики звезды на каждом временном шаге по мере расчета моделей. Файл `profile` содержит информацию о структуре звезды, т.е. о распределении физических характеристик с глубиной. Этот файл записывается не для каждого временного шага, а с некоторой заранее определенной периодичностью. Однако для экономии дискового пространства после расчетов были удалены модели, которые с практической точки зрения мало отличаются друг от друга. В файле `index.profile` находится сопоставление имени файла типа `profile` с номером модели, такое сопоставление может быть сделано вручную по номеру модели, который обязательно присутствует во всех файлах. Помимо табличных данных к каждой модели прилагается фильм, иллюстрирующий изменение во времени структуры и наблюдаемых свойств моделируемой звезды.

На протяжении всего практикума мы будем использовать эти файлы, и следовательно прежде всего должны научиться извлекать из них необходимую информацию. Задачи практикума требуют обработки и анализа большого количества таких файлов, что предполагает написание соответствующих программ. Для этого могут быть использованы любые языки программирования и средства графического отображения результатов. Однако в описании мы будем использовать язык Python 2.x (с библиотеками `Matplotlib`, `astropy`, `numpy`, `scipy`). Выбор в пользу этого языка был сделан благодаря его свободному распространению как для Unix, так и для Windows, таким образом, каждый при желании может использовать этот язык и все необходимые библиотеки.

Чтение файлов `history` и `profile`

1.1 Содержание файлов

Содержание файлов может немного отличаться при расчете моделей звезд разных масс. Поэтому здесь будут перечислены только основные величины, которые с большой вероятностью потребуются для выполнения заданий практикума. Полный список всех возможных величин, которые может выдавать программа MESA, содержится в файлах `history_columns.list` и `profile_columns.list`. По умолчанию все физические величины задаются в системе СГС.

1.1.1 Содержание файла `history`

model_number – номер модели

star_age – возраст звезды в годах от начала расчета

star_mass – масса звезды в M_{\odot}
log_abs_mdot – $\lg |\dot{M}|$, $M_{\odot}/\text{год}$
log_dt – $\lg dt$ – шаг по времени
conv_mx1_top – положение верхней границы наиболее массивной конвективной зоны (в долях полной массы)
conv_mx1_bot – положение нижней границы наиболее массивной конвективной зоны
conv_mx2_top – положение верхней границы второй по массе конвективной зоны
conv_mx2_bot – положение нижней границы второй по массе конвективной зоны
epsnuc_M_1 – положение верхней границы зоны ядерного горения с энерговыделением более 50 эрг/(г сек)
epsnuc_M_2 – положение верхней границы зоны ядерного горения с энерговыделением более 1000 эрг/(г сек)
epsnuc_M_3 – положение нижней границы зоны ядерного горения с энерговыделением более 1000 эрг/(г сек)
epsnuc_M_4 – положение нижней границы зоны ядерного горения с энерговыделением более 50 эрг/(г сек)
epsnuc_M_5 – то же самое
epsnuc_M_6 – для следующей
epsnuc_M_7 – по массе
epsnuc_M_8 – зоны горения
he_core_mass – масса гелиевого ядра в M_{\odot}
c_core_mass – масса углеродного ядра в M_{\odot}
o_core_mass – масса кислородного ядра в M_{\odot}
log_LH – $\lg L_H$ – светимость за счет горения водорода в L_{\odot}
log_LHe – $\lg L_{He}$ – светимость за счет горения гелия в L_{\odot}
log_L – светимость звезды в L_{\odot}
log_Teff – эффективная температура
log_R – $\lg R/R_{\odot}$
log_center_T – центральная температура $\lg T_c$
log_center_Rho – центральная плотность $\lg \rho_c$
log_center_P – центральное давление $\lg P_c$
center_degeneracy – параметр вырождения электронов в центре
center_gamma – Γ – кулоновский параметр взаимодействия в плазме
center_h1, he4, c12... – центральное массовое содержание элементов
pp, cno, tri_alfa – \lg энерговыделения в конкретных ядерных реакциях в L_{\odot}

1.1.2 Содержание файла profile

zone – порядковый номер зоны, считая от поверхности
logT – $\lg T$ в центре зоны
logRho – $\lg \rho$ в центре зоны
logP – $\lg P$ в центре зоны
logR – $\lg R/R_{\odot}$

luminosity – L/L_{\odot}
total_energy – полная энергия на 1г вещества $v^2/2 - Gm/r + E$ (эрг/г)
eta – параметр вырождения электронов ($\eta > 0$ – начало вырождения)
mu – средний молекулярный вес
energy – внутренняя энергия (эрг/г)
grada – $\nabla_a = d \ln T / d \ln P$ при постоянном S
cv – c_v
cp – c_p
logS – $\lg S$, S – удельная энтропия
gamma1 – $d \ln P / d \ln \rho$ при постоянном S
gamma3 – $\Gamma_3 - 1 = d \ln T / d \ln \rho$ при постоянном S
gam – Γ – параметр кулоновского взаимодействия в плазме
free_e – число свободных электронов на нуклон
abar – средний атомный вес (г/моль)
eps_nuc – энерговыделение ядерных реакций эрг/г/сек (за вычетом энергии, уносимой нейтрино)
eps_grav – работа сил гравитации
log_conv_vel – скорость конвективных движений (см/сек)
gradT – $\bar{\nabla}$
gradr – ∇_r
mass – m – массовая координата
h1, h2, li7, he3... – массовое содержание изотопов
pp, cno, tri_alfa – энерговыделение различных типов ядерных реакций
 Также в шапке файла можно найти следующие величины:
initial_mass – начальная масса
initial_z – начальное Z
model_number – номер модели
num_zones – число зон
star_age – возраст звезды
time_step – шаг по времени
Teff – эффективная температура
photosphere_L – светимость звезды в L_{\odot}
photosphere_r – радиус звезды в R_{\odot}
center_eta – параметр вырождения в центре
center_h1, _he3 ... – центральное содержание элементов
star_mass – масса звезды в M_{\odot}
star_mdot – \dot{M}
star_mass_h1, _he3... – масса элемента

Задание

Ознакомиться со структурой и типичным содержанием файлов history и profile. На любом известном вам языке программирования написать программу, которая будет:

1. Строить на графике зависимость любой колонки от любой колонки в файлах history и profile. Оси должны подписываться. Необходимо уметь отображать на

одном графике одновременно данные из нескольких однотипных файлов. Для выполнения задания используйте файлы history и profile из любой эволюционной последовательности моделей на сайте <http://lnfm1.sai.msu.ru/~davnv/pr5> (см. пример 1,2)

2. На графике $\lg T_{eff} - \lg L$ отобразить номера моделей, для которых есть файлы profile (см. пример 3)

Пример 1. Программа на Python, которая читает файл и строит на графике две колонки из него.

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 from astropy.io import ascii
3 data = ascii.read("...PATH... /profile1.data", header_start=4, data_start
   =5)
4 print data.colnames
5 Xname = 'logT'
6 Yname = 'logRho'
7 X = data[Xname]
8 Y = data[Yname]
9 plt.plot(X, Y)
10 plt.xlabel(Xname)
11 plt.ylabel(Yname)
12 plt.show()

```

Пример 2. Программа, отображающая эволюционный трек на диаграмме Герцшпрунга-Рассела от стадии "до главной последовательности" до момента выгорания гелия в центре для двух масс звезд и двух химических составов.

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import math
3 from astropy.io import ascii
4
5 Mfiles = ['2.0', '5.0']
6 Chem = ['Z0.02', 'Z0.001']
7 Col = ['k-', 'r-']
8 x1=1.0e+10
9 x2=0.0e+0
10 ci=0
11 for C in Chem:
12     for M in Mfiles:
13         name = '...PATH.../M'+M+C+'/LOGS/history.data'
14         data = ascii.read(name, header_start=4, data_start=5)
15         print data.colnames
16         Xname = 'log_Teff'
17         Yname = 'log_L'
18         H1 = data['center_he4']
19         hlim = 0.0001*H1[0]
20         i=0
21         for h in H1:
22             if h<hlim:
23                 N=i

```

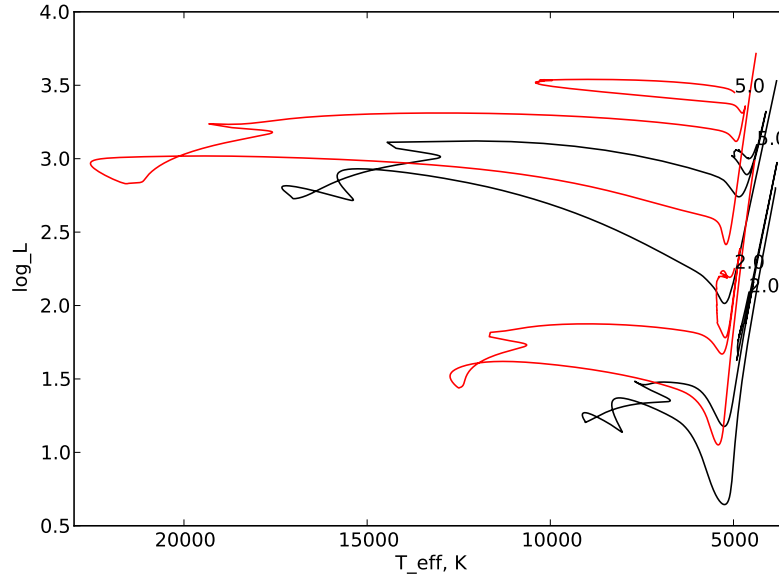


Рис. 1: Результат работы программы из Примера 2.

```

24         break
25     else:
26         i=i+1
27     X = data[Xname][0:N]
28     Y = data[Yname][0:N]
29     i=0
30     for a in X:
31         X[i]=math.pow(10,a)
32         i=i+1
33     plt.plot(X[50:N], Y[50:N], Col[ci])
34     plt.xlabel("T_eff, K")
35     plt.ylabel(Yname)
36     x1 = min(min(X),x1)
37     x2 = max(max(X),x2)
38     plt.xlim((x1, x2))
39     plt.text(X[N-1],Y[N-1],M)
40     ci=ci+1
41 plt.gca().invert_xaxis()
42 plt.show()

```

Пример 3. Программа, отображающая на графике $\lg T_{eff} - \lg L$ точками модели, для которых существуют файлы profile. Параметры звезды: $M = 2.0M_{\odot}$, $Z = 0.02$.

```

1 import os
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from astropy.io import ascii
4 import math
5

```

```

6 pp='...PATH.../M2.0Z0.02'
7 NumP = ascii.read((pp+'/LOGS/profiles.index'), data_start=1)
8 for a in NumP['col3']:
9     name=pp+'/LOGS/profile'+str(a)+'.data'
10    if os.path.isfile(name):
11        data=ascii.read(name, header_start=1, data_start=2, data_end=3)
12        X = data['Teff']
13        Y = data['photosphere_L']
14        X=math.log10(X)
15        Y=math.log10(Y)
16        plt.plot(X, Y, 'k. ')
17        plt.text(X,Y,str(a))
18 plt.gca().invert_xaxis()
19 plt.show()

```


2 Строение и эволюция звезд до главной последовательности

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Что такое линия рождения звезд?
2. Назовите источники энергии в протозвездах.
3. Что такое время Кельвина-Гельмгольца?
4. Что такое треки Хаяши и Хеньи? Дайте теоретические оценки наклона α этих треков на диаграмме Герцшпрунга – Рассела $\lg L = \alpha \lg T + C$.
5. По какому критерию вы будете отделять звезды на стадии "до главной последовательности" от звезд на главной последовательности?

Задание

Задания выполняются для звезд с массами $0.3-8M_{\odot}$ и при двух химсоставах.

1. Построить диаграмму Герцшпрунга – Рассела для всех звезд от начала расчетов до окончания стадии "до главной последовательности". Для звезды с заданными преподавателем значениями T_{eff} , L и $[Fe/H]$ оценить массу, возраст и их неопределенность.
2. Отметить на каждом эволюционном треке момент появления лучистого ядра (когда масса ядра станет больше заданной, например 0.2-0.5 от массы звезды).
3. Определить наклон α треков Хаяши и Хеньи для различных масс звезд $L \propto T_{eff}^{\alpha}$ и различных химических составов.
4. Для точек на треках Хаяши и Хеньи, а также в момент начала загорания водорода построить в зависимости от массовой координаты для звезд, заданных преподавателем:
 - (a) Светимость $L(m)$
 - (b) Температура $\lg T(m)$
 - (c) Плотность $\lg \rho(m)$
 - (d) Положение конвективных зон
5. Построить в зависимости от времени:
 - (a) Центральная плотность $\lg \rho_c(t)$
 - (b) Центральная температура $\lg T_c(t)$
 - (c) Параметр вырождения в центре $\eta_c(t)$ для $M > 0.5M_{\odot}$
6. Для каждой звезды определить время стадии "до главной последовательности" и сравнить его с временем Кельвина-Гельмгольца.

Вопросы для сдачи задания

1. Какие факторы вносят наибольшую неопределенность при оценке параметров звезды из п.1?
2. Как изменится результат п.1, если окажется, что для звезды не было учтено межзвездное поглощение?

3 Строение и эволюция газовых планет, коричневых карликов и маломассивных звезд

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Что такое и чему равен предел Кумара?
2. Какие ядерные реакции могут протекать в коричневых карликах?
3. Запишите систему уравнений и граничных условий, которые определяют строение и эволюцию звезды.

Введение

Расчет модели в MESA

В этой задаче необходимо рассчитать в программе MESA несколько моделей маломассивных звезд и газовых планет. Для выполнения расчетов программе необходимо передать значения параметров:

1. Параметры звезды (масса, химический состав, вращение и т.п.).
2. Свободные параметры, возникающие при описании некоторых физических процессов в звездах (параметр теории длины пути перемешивания, метод расчета звездного ветра, способы задания внешнего граничного условия и т.п.).
3. Параметры, управляющие выводом информации из программы (какие величины нужно вывести на экран или записать в файл, для каких моментов времени выводить эти величины, когда остановить расчет).

Всевозможные параметры вместе со своими значениями по умолчанию определены в файлах, которые лежат в директории `/home/dodin/mesa/mesa-r8845/star/defaults/`. Для расчета моделей маломассивных звезд нам потребуется изменить значения всего нескольких параметров. Для этого не следует модифицировать сами файлы `*.defaults`, а достаточно в директории, в которой производится расчет, создать текстовый файл с названием `inlist`. Пример такого файла представлен ниже.

```
1 &star_job
2
3     mesa_dir = '/home/dodin/mesa/mesa-r8845/'
4
5     ! choose starting model
6     ! regular create pre-ms does not work at very low mass
7     create_initial_model = .true.
8     radius_in_cm_for_create_initial_model = 1.0e+12 ! in cm
9     mass_in_gm_for_create_initial_model = 1.4e+32 ! in grams
10
11     ! change network to include (d, li7, etc)
12     change_net = .true.
```

```

13      new_net_name = 'pp_extras.net'
14      set_uniform_initial_composition = .true.
15      initial_h1 = 0.70
16      initial_h2 = 2d-5
17      initial_he3 = 2d-5
18      initial_he4 = 0.28
19
20      ! control the output
21      history_columns_file = 'histcol.list'
22      profile_columns_file = 'profcol.list'
23
24 / ! end of star_job namelist
25
26 &controls
27      ! helps convergence at low Teff
28      which_atm_option = 'tau_100_tables'
29      max_age = 3.0d9
30      profile_interval = 20
31      max_num_profile_models = 3000
32      history_interval = 1
33
34 / ! end of controls namelist

```

При запуске программы с этим файлом inlist будет рассчитана эволюция звезды с массой $0.07M_{\odot}$ до возраста 3 млрд лет.

Разберем этот пример построчно. Для начала расчета необходимо задать стартовую модель. Эта модель может быть автоматически рассчитана программой, а может быть прочитана из файла (это необходимо в некоторых случаях, например, если нужно начать расчет с уже продвинутой эволюционной стадии, а не со стадии протозвезды). В приведенном примере программа сама создаст начальную модель звезды:

$$\text{create_initial_model} = .\text{true}.$$

с массой $0.07M_{\odot}$:

$$\text{mass_in_gm_for_create_initial_model} = 1.4\text{e}+32$$

Для начала расчета нужно угадать приблизительный размер нашей протозвезды:

$$\text{radius_in_cm_for_create_initial_model} = 1.0\text{e}+12 \text{ ! in cm}$$

Если в начале расчетов программа не сможет построить модель, то следует в несколько раз изменить пробный радиус.

Сеть ядерных реакций 'pp_extras.net' включает некоторые дополнительные реакции, которые для обычных звезд можно не учитывать, но для маломассивных звезд эти реакции могут играть заметную, хотя и не определяющую роль. Полный список сетей и реакций можно найти в каталоге /home/dodin/mesa/mesa-r8845/data/net_data/.

Затем, при необходимости, можно переопределить значения начальных содержаний некоторых элементов.

```
set_uniform_initial_composition = .true.  
    initial_h1 = 0.70  
    initial_h2 = 2d-5  
    initial_he3 = 2d-5  
    initial_he4 = 0.28
```

В файлах, названных произвольно `histcol.list` и `profcoll.list`, в столбец должны быть выписаны имена переменных, которые будут выводиться в файлы `history` и `profile`. Полный список допустимых имен содержится в файлах `history_columns.list` и `profile_columns.list` в директории `/home/dodin/mesa/mesa-r8845/star/defaults/`, а также доступен на сайте.

Опция `which_atm_option = 'tau_100_tables'` определяет способ задания верхнего граничного условия для расчета модели звезды. В данном случае из файлов, находящихся в директории `/home/dodin/mesa/mesa-r8845/atm/atm_data`, читаются значения давления и температуры газа в атмосфере звезды на оптической глубине, равной 100.

Модель будет рассчитываться до максимального возраста в 3 млрд лет. Для экономии места на диске программа будет сохранять информацию о структуре звезды не для каждого шага, а только для каждого 20-го шага.

```
profile_interval = 20
```

В файл с эволюционным треком будет записываться каждый расчетный шаг.

```
history_interval = 1
```

Удаленные расчеты

Для расчета моделей необходимо по `ssh` зайти на `stud@158.250.29.139`. Для этого в любом эмуляторе терминала (Unix) или в эмуляторе терминала программы Putty (Windows) необходимо набрать:

```
ssh stud@158.250.29.139
```

Пароль будет выдан при допуске к задаче. Для копирования файлов с сервера или на сервер используется команда `scp` (выполняется на компьютере пользователя)
С сервера:

```
scp stud@158.250.29.139: "путь откуда" "путь куда"
```

На сервер:

```
scp "путь откуда" stud@158.250.29.139: "путь куда"
```

Для копирования директорий используется `scp -r ...`. Для выхода из `ssh`-сессии – `exit`. В системе Windows вместо `scp` используется программа `pscp.exe`, запускаемая из командного окна Windows (`cmd.exe`), например для копирования директории:

```
pscp -r stud@158.250.29.139: "путь откуда" "путь куда"
```

Для редактирования файлов на сервере можно использовать редактор `joe` – `joe filename`, для выхода из `joe` нужно нажать `ctrl-k` `x`, для выхода без сохранения – `ctrl-c`. Для просмотра содержимого файла в терминале можно использовать `cat`, `tail -n` – показать `n` строк с конца, `head -n` – показать `n` строк с начала.

При выполнении задания необходимо скопировать `inlist`, `*.list` и `mesa.sh` из домашней директории пользователя `stud` в директорию, в которой будет проводиться расчет, и отредактировать `inlist` в соответствии с требованиями задания. После редактирования `inlist` для запуска программы достаточно ввести команду `. mesa.sh`

Задание

1. Используя программу MESA рассчитайте строение и эволюцию объектов с массами заданными преподавателем.
2. Постройте эволюционный трек на диаграмме Герцшпрунга – Рассела начиная от 1 млн лет до возраста, на котором был окончен расчет.
3. В зависимости от времени, начиная от 1 млн лет, постройте:
 - (a) Светимость
 - (b) Радиус
 - (c) Температура в центре
 - (d) Плотность в центре
4. Найдите наклон α в законе изменения светимости от времени $\lg L = \alpha \lg t + C$ для различных масс.
5. Для возраста, заданного преподавателем, постройте в зависимости от полной массы тела:
 - (a) Радиус
 - (b) Светимость
 - (c) Эффективная температура

Вопросы для сдачи задания

1. Чем отличается строение тел с массой больше и меньше предела Кумара?
2. Чем обусловлен горб на зависимости $L(t)$?
3. Оцените наклон α зависимости $L(t)$ для сжимающейся звезды с постоянной эффективной температурой. Сравните α со значениями, полученными из численного моделирования.
4. Объясните полученную зависимость $R(M)$.

4 Строение и эволюция звезд на главной последовательности

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Что такое главная последовательность? Как вы будете её выделять из общего хода эволюции звезды?
2. Как зависят светимость и радиус звезды главной последовательности от ее массы?
3. Какие ядерные реакции протекают внутри звезд главной последовательности?
4. Оцените температуру в центре звезды заданной массы.
5. Что такое ядерное время? (Необходимо уметь его оценивать.)
6. Сформулируйте критерий Шварцшильда для начала конвекции.

Задание

Задание выполняется для звезд с массами от 0.6 до $50M_{\odot}$

1. Определить теоретическую зависимость для звезд главной последовательности, найти линейную аппроксимацию этой зависимости и определить величины характерных отклонений от неё, связанные с различиями в возрасте звезд и с различиями в их металличности. Если наклон полученных зависимостей существенно меняется на рассматриваемом интервале масс, разбейте этот интервал на несколько таким образом, что внутри каждого интервала зависимости можно будет считать линейными, и найдите наклон на каждом таком интервале.
 - (a) Эффективная температура – светимость $\lg T_{eff} - \lg L$
 - (b) Масса – радиус $\lg M - \lg R$
 - (c) Масса – светимость $\lg M - \lg L$
2. Для звезд главной последовательности в зависимости от времени построить:
 - (a) Радиус $\lg R(t)$
 - (b) Светимость $\lg L(t)$
 - (c) Центральная плотность $\lg T_c(t)$
 - (d) Центральная температура $\lg \rho_c(t)$
3. Для моделей звезд, указанных преподавателем, построить распределение перечисленных параметров внутри звезды в зависимости от массовой координаты на всех доступных этапах ее жизни на главной последовательности:
 - (a) Температура $\lg T(m)$

- (b) Плотность $\lg \rho(m)$
 - (c) $\lg \rho - \lg P$
 - (d) Найти индекс политропы. Используя политропную модель звезды, оценить центральную температуру и сравнить ее с температурой из численной модели.
 - (e) Содержание водорода
 - (f) Определить положение конвективных зон по критерию Шварцшильда.
4. Для всех звезд построить зависимость массы сгоревшего водорода (в массах звезды) $\Delta M/M$ от массы звезды M . Вычислить время жизни звезды на главной последовательности, сравнить его с ядерным временем.
 5. Построить зависимость $\lg pp/cno$ от центрального содержания водорода для всех звезд, где pp , cno – полное энерговыделение в p-p и CNO-циклах (из history.data).
 6. Построить зависимость потерянной за время эволюции на ГП массы ($\Delta M/M$) от начальной массы M .

Вопросы для сдачи задания

1. Объясните полученную зависимость масса-светимость.
2. Чему равны индексы политропы для различных звезд?
3. В каких звездах преобладает CNO-цикл?
4. Объясните изменение содержания различных изотопов внутри звезды, представленное на фильмах, от стадии "до главной последовательности" до окончания пребывания звезды на главной последовательности. Какие изотопы изменяют свое содержание и почему?

5 Строение и эволюция звезд после схода с главной последовательности

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Что такое провал Герцшпрунга?
2. Что такое ветвь гигантов?
3. Какие ядерные реакции идут на ветви гигантов?
4. Что такое гелиевая вспышка?

Задание

Задание выполняется для звезд с массой $M > 0.5M_{\odot}$

1. Постройте зависимость от времени полного энергосвечения в звезде за счет горения водорода и гелия и полной светимости звезды для различных масс. Определите полное энергосвечение за счет горения гелия, начиная с которого вы будете считать, что гелий горит.
2. Постройте диаграмму Герцшпрунга – Рассела от начала горения водорода до момента истощения гелия в центре. Отметьте на диаграмме:
 - (a) Точку истощения водорода в ядре
 - (b) Точку начала горения гелия
3. От начала горения водорода до момента истощения гелия в центре постройте в зависимости от времени:
 - (a) Светимость $\lg L(t)$
 - (b) Радиус $\lg R(t)$
 - (c) Центральная плотность $\lg \rho_c(t)$
 - (d) Центральная температура $\lg T_c(t)$
 - (e) Параметр вырождения газа в ядре звезды $\eta_c(t)$

Отметьте на полученных графиках:

- (a) Точку истощения водорода в ядре
 - (b) Точку начала горения гелия
4. То же, что в предыдущем пункте, но сместите начало отсчета времени на точку истощения водорода в центре.
 5. Для заданных преподавателем звезд на горизонтальном участке трека на диаграмме Герцшпрунга – Рассела сразу после схода с главной последовательности и перед началом горения гелия постройте:

- (a) Температура $\lg T(m)$
 - (b) Плотность $\lg \rho(m)$
 - (c) Светимость $\lg L(m)$
 - (d) Параметр вырождения $\eta(m)$, определите массу вырожденного ядра
 - (e) Определите массу и положение конвективных зон
 - (f) Распределение скорости энерговыделения для различных типов ядерных реакций
6. Для звезд с массой $1.0-8.0 M_{\odot}$, исходя из физических соображений, придумайте критерий и оцените его численное значение, при котором горизонтальный трек переходит в ветвь гигантов. Используя найденный критерий, определите время пребывания звезд на горизонтальном участке и на ветви гигантов в зависимости от массы. Сравните с тепловым и ядерным временем.
 7. Посмотрите фильмы и определите, в каких звездах гелий загорается взрывообразно. Для одной звезды постройте временной профиль светимости какой-либо гелиевой вспышки $L_{He}(t)$, определите его FWHM, полную энергию взрыва, массу сгоревшего гелия, количество гелиевых вспышек для каждой звезды. Определите примерную массу инертного ядра в момент начала первой гелиевой вспышки.
 8. Для звезд с $M > 0.5 M_{\odot}$ определите массу водорода, который сгорел после схода звезды с главной последовательности. Качественно сравните средний темп горения водорода в ядре на главной последовательности и в слоевом источнике.
 9. Определите массу звезды в момент начала горения гелия. Постройте график зависимости массы $\Delta M/M$, потерянной к моменту начала горения гелия, от начальной массы M .

Вопросы для сдачи задания

1. В каких моделях горение гелия не начинается?
2. Почему водород в слоевом источнике горит быстрее, чем в ядре?
3. Почему гелиевая вспышка происходит не в центре звезды?
4. Почему гелиевая вспышка не приводит к увеличению яркости звезды, к разрушению звезды? Обоснуйте численными оценками.

6 Строение и эволюция звезд на стадии горения гелия

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Опишите основные ядерные реакции горения гелия в звездах.
2. Что такое горизонтальная ветвь и асимптотическая ветвь гигантов (AGB)?
3. Сформулируйте критерий вырожденности газа.

Задание

Задание выполняется для звезд с массой $M \geq 1.0M_{\odot}$

1. Постройте перечисленные величины в зависимости от времени, начиная от момента загорания гелия, и отметьте на графиках моменты истощения гелия в центре:
 - (a) Центральная плотность $\lg \rho_c(t)$
 - (b) Центральная температура $\lg T_c(t)$
 - (c) Параметр вырождения газа в центре $\eta_c(t)$
 - (d) Скорость потери массы $\lg \dot{M}$
2. Постройте диаграмму Герцшпрунга – Рассела и отметьте на ней момент начала горения гелия в центре, момент истощения гелия в центре.
3. Определите продолжительность перечисленных стадий в зависимости от начальной массы и химсостава
 - (a) От начала горения гелия до его истощения в центре звезды
 - (b) От истощения гелия в центре до ухода с асимптотической ветви гигантов (или окончания расчета) для $1 - 5M_{\odot}$
4. Для одной звезды постройте $L(t)$ и $T_{eff}(t)$ на всем протяжении фазы тепловых вспышек. Определите длительность фазы, длительность одной вспышки и характерное время между вспышками.
5. Для звезд, заданных преподавателем, постройте распределение перечисленных величин с глубиной в момент начала горения гелия, в произвольный момент горения гелия в центре звезды, в момент истощения гелия в центре, на стадии AGB:
 - (a) Температура $\lg T(m)$
 - (b) Плотность $\lg \rho(m)$
 - (c) Светимость $L(m)$

- (d) Параметр вырождения $\eta(m)$
 - (e) Скорость энерговыделения наиболее важных термоядерных реакций
 - (f) Положение конвективных зон
6. Определите массу вырожденного ядра последней модели для всех звезд $0.6 - 50M_{\odot}$
 7. Постройте зависимость светимости от массы вырожденного ядра для звезд верхней части асимптотической ветви гигантов ($2 - 8M_{\odot}$, $Z = 0.02$)

Вопросы для сдачи задания

1. Опишите и объясните изменение химического состава конечных продуктов эволюции звезд с массой менее $8M_{\odot}$?

7 Поздние стадии эволюции массивных звезд

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Какие химические элементы могут образовываться в звездах в результате экзотермических термоядерных реакций?
2. Назовите причины коллапса ядра звезды.
3. Оцените плотность, при которой происходит нейтронизация вещества.

Задание

1. Для параметров звезды, заданных преподавателем, постройте распределение следующих величин перед коллапсом ядра:
 - (a) Температура $\lg T(m)$
 - (b) Плотность $\lg \rho(m)$
 - (c) Светимость $L(m)$
 - (d) Параметр вырождения $\eta(m)$
 - (e) Параметр кристаллизации Γ
 - (f) Распределение Fe56, Fe54, Si28, C12, O16
2. Для той же звезды постройте диаграмму $\rho_c - T_c$
3. Для той же звезды постройте график изменения со временем перечисленных величин. *Рекомендация: время отсчитывать как время до коллапса ядра, используя dt .*
 - (a) Центральная температура $\lg T_c$
 - (b) Центральная плотность $\lg \rho_c$
 - (c) Нейтринные потери $\lg L_\nu$
4. Для звезд $20 - 50 M_\odot$ и двух химсоставов постройте зависимость полной массы Cr60, Co56, Fe56, Fe54, Si28, O16, C12, He4 от начальной массы звезды.

Вопросы для сдачи задания

1. При какой плотности началась нейтронизация в рассмотренной модели? Сравните с простой оценкой, полученной ранее.
2. Почему на поздних стадиях в ядре появляется he4?

8 Новые звезды

Вопросы для допуска к выполнению задания

1. Что такое карликовые новые, новые звезды и сверхновые Ia?
2. Опишите кривую блеска типичной новой звезды.
3. Что такое предел Чандрасекара и чему он равен?

Задание

1. Постройте в зависимости от времени для заданных трех наборов параметров перечисленные величины:
 - (a) Светимость $\lg L(t)$
 - (b) Радиус $\lg R(t)$
 - (c) Эффективная температура $\lg T_{eff}(t)$
 - (d) Темп потери массы $\lg \dot{M}(t)$
2. Определите период вспышек для всех моделей.
3. Постройте зависимость периода P от массы звезды и от темпа аккреции на неё, найдите критическую массу $\dot{M}P$ в зависимости от массы звезды и темпа аккреции.
4. Постройте зависимость массы звезды от времени и проверьте полученные значения критической массы.
5. Оцените время за которое белый карлик с массой $1.0, 1.38M_{\odot}$ при фиксированном темпе аккреции наберет массу, достаточную для его взрыва как сверхновой звезды.

Вопросы для сдачи задания

1. У какого из двух белых карликов с массами 1.0 и $1.2 M_{\odot}$ значения критической массы водородной оболочки больше и почему?
2. Какое значение предельной массы белого карлика вы использовали в последнем задании и почему?