

Рецензия Адамского Сергея Сергеевича,
учителя информатики высшей категории,
на работу
ученика 11 класса МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы
Башкова Артёма Олеговича.

Для работы была выбрана тема «Моделирование эволюции звезд». Тема рецензируемой работы достаточно необычна, поскольку увлечённость астрономическими науками в РФ на сегодняшний день лишь только начинает восстанавливаться после времён распада СССР. Тему можно назвать актуальной, поскольку не только учащемуся, но и обычному обывателю крайне тяжело представить процессы формирования и развития звёздных тел в нашей Вселенной. Актуальна тема и потому, что в некоторых её аспектах среди учёных до сих пор ведутся споры о тех или иных параметрах протекания жизни звёздного объекта.

Работа Артёма призвана решить проблему заинтересованности людей в астрономии. Путём наглядной интерактивной компьютерной модели автор буквально увлекает пользователя процессом развития звезды. В проекте предусмотрены алгоритмы развития звёзд с разными характеристиками, которые соответствуют существующим теориям и наблюдениям в современной астрофизике.

Данный проект – не просто качественная работа начинающего программиста, это проект, достойный презентации в научных музеях астрономии и астрофизики. Это превосходной наглядное пособие для уроков астрономии и физики.

В работе рассмотрено достаточное количество теоретического материала, о чём свидетельствует её первая часть. Автор способен делать верные выводы и отлично ориентируется в астрофизике относительно своего материала. Проект выполнен на стыке нескольких наук и является метапредметным.

В ограниченном объёме текстовой работы автору удалось отразить основные теоретические положения относительно выбранной темы. Данный пласт теории необходим, чтобы понимать всю сложность реализации конечного продукта.

Работа имеет хорошую структуру, оформление, четко сформулированы цель и задачи. Учащимся исследован материал, выходящий за рамки школьной программы. Содержание работы отвечает выбранной теме, которая раскрыта достаточно ёмко и доступно для читателя.

Работа грамотно изложена, прослеживается логическая связь между частями работы. Прделанная практическая работа заслуживает внимания экспертного сообщества и достойной оценки.

Подпись подтверждаю,
директор МБОУ «ЛСТУ №2» г. Пензы



Адамский С. С.

/В.Ч. Щеглова/

Управление образования города Пензы
МБОУ «Лицей современных технологий управления № 2» г. Пензы

Моделирование эволюции звезд

Выполнил:

Башков Артём Олегович, учащийся 11 класса
МБОУ «Лицей современных технологий управления № 2» г. Пензы

Научные руководители:

Знобишина Наталья Юрьевна, учитель физики высшей категории
МБОУ «Лицей современных технологий управления № 2» г. Пензы

Адамский Сергей Сергеевич, учитель информатики высшей категории
МБОУ «Лицей современных технологий управления № 2» г. Пензы

Пенза, 2020

Содержание

Введение.....	3 стр.
1. Теоретические сведения	
1.1. Масса звезды.....	3 стр.
1.2. Источники энергии звезды.....	3 стр.
1.3. Основы моделирования эволюции звезды.....	6 стр.
2. Реализация модели	
2.1. Выбор языка и среды программирования.....	10 стр.
2.2. Фрагменты базовой реализации программного обеспечения.....	10 стр.
2.3. Меню.....	11 стр.
2.4. Ручной ввод массы звезды.....	11 стр.
2.5. Глоссарий.....	11 стр.
2.6. Воспроизведение алгоритма эволюции звезды.....	12 стр.
Заключение.....	14 стр.

Введение.

У учащихся в старших классах прослеживается дефицит свободного времени. Неизбежная временная близость к ГИА-11 заставляет концентрироваться на профильных учебных предметах, однако данный факт ничуть не помешал возвращению в расписание старшекласников дисциплины «астрономия».

Данная дисциплина содержит несколько тем, которые без наглядных примеров и моделей сложно понять и представить без выдающегося воображения. По итогам опроса старшекласников МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы, наиболее трудной темой для визуального понимания стала «эволюция звезд». В разных источниках, в том числе и в разных учебных пособиях по астрономии могут встречаться противоречивые сведения: часто можно встретить информацию о том, что звезда определенной массы в определенное время расширится, а потом сбросит свои внешние слои, а в действительности она после увеличения радиуса, через некоторое время, сожмется, потом вновь расширится и только после данного этапа эволюции будет готова сбросить свои внешние слои. Именно поэтому замотивированный ученик может запугаться при исследовании дополнительной литературы.

Наиболее интерактивная модель в астрономии — это, безусловно, компьютерная программа, поэтому основной **целью** настоящей работы стала разработка программного продукта, моделирующего эволюцию звезд максимально понятно и доступно для учащихся.

Безусловно, тема «эволюция звезд» довольно обширна, из-за чего в данной работе будут рассмотрены ряд позиций из разделов квантовой и ядерной физики. Без понимания природы процессов в самой звезде – невозможно создать требуемую модель.

Новизна проекта заключается в том, что подобных моделей, в которых бы столь подробно и доступно рассматривалась эволюция звездных объектов практически нет, либо они малоизвестны.

Проект призван не только внести вклад путём создания интерактивной модели, но и упростить доступ обучающихся к сложной и малоизвестной теории по теме.

Для достижения поставленной цели в работе было предусмотрено выполнение следующих задач:

- Собрать профильные данные из учебной литературы по астрономии и из сети Интернет.
- Сопоставить найденную теорию и выбрать наиболее подходящую, отражающую современный взгляд учёного сообщества по теме.
- Спроектировать Программное обеспечение, иллюстрирующее эволюцию звезд.
- Апробировать разработку.

1. Теоретические сведения

1.1. Проблема массы звезды

Один из самых главных факторов звездной эволюции - масса звезды. Настоящим не известны точные условия появления некоторых конечных стадий эволюции звезд, таких как черные дыры и нейтронные звезды. Конечно, некоторые пороговые значения известны современной науке, но они очень условные и постоянно дополняются с развитием технологий исследования. Такое положение дел и является первопричиной проблемы разногласия сведений в разных источниках, например, разные пределы масс. Не стоит также забывать, что в результате всей своей «жизнедеятельности» звезда заметно теряет в массе, т. к. часть ее массы уходит в виде излучения, поэтому не всегда ясно, о какой именно массе идет речь: на момент появления звезды или же перед ее коллапсом.

1.2. Источники энергии звезды

Необходимость моделирования наиболее полной эволюции звезды с момента вступления ее на Главную Последовательность (ГП, Приложение 1), обязывает разработчика модели знать временные рамки тех или иных этапов такой эволюции. Источники энергии напрямую влияют на продолжительность жизни звезды.

А. Ядерный синтез гелия из водорода.

Для подсчёта продолжительности жизни звезды существует формула А. Эйнштейна

$$E=mc^2$$

(формула 1)

При образовании одного ядра гелия суммарная масса элементов, входящих в него, уменьшается в среднем на 3%, значит, масса каждого протона уменьшится почти на 1% (потенциальная энергия взаимодействия частей тела, деленная на квадрат скорости света). Если учитывать, что звезда была сформирована преимущественно только из ядер водорода (некоторую металличность (Приложение 1) звезда должна иметь), то масса звезды уменьшится на 0,01М, где М — масса только сформировавшейся звезды. Однако лишь в центральной области (не более 10% объема звезды) происходит ядерный синтез, поэтому реальное значение в 10 раз меньше. Результат применения формулы Эйнштейна для нахождения выделяющейся энергии $E=0,001Mc^2$ следует разделить на светимость звезды, чтобы узнать, сколько эта энергия сможет поддерживать светимость звезды на одном уровне (при этом мы пренебрегаем изменением радиуса звезды). Светимость же звезды можно вычислить по формуле:

$$L=4\pi R^2\sigma T^4$$

(формула 2)

В данной формуле R – радиус звезды, σ – постоянная Стефана - Больцмана, T – температура звезды, L – светимость. Также формулу можно использовать относительно другой звезды (например, Солнца) следующим образом:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \cdot \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4$$

(формула 3)

В данной формуле индекс \odot означает соответствие параметра солнечному.

Из вышеописанных формул 1 и 2 можно сделать вывод, что время выгорания водорода в ядре звезды (t) можно оценить следующим образом [1, 151 с.]:

$$t \approx 10^{-3} \cdot M c^2 / L$$

(формула 4)

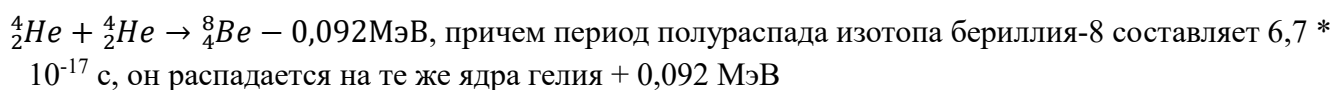
У звезд ГП светимость резко возрастает с массой, поэтому, по формуле 4, время выгорания водорода убывает с возрастанием массы звезды. (в справедливости этого можно убедиться в таблице 4.4 из учебного пособия Сурдина В. Г. (Приложение 3))

Справедливо высказывание, что реальный состав звезды будет неоднородным, из-за чего реальные данные от теоретических, полученных таким способом, будут отличаться (в частности, в реальных условиях значение получилось бы меньше).

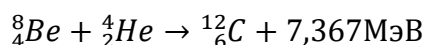
Б. Тройная гелиевая реакция

На поздних стадиях эволюции звезд с массой более 0,5 M_{\odot} , либо более 0,75 M_{\odot} (по разным источникам) гелий в их ядре превращается в углерод в результате Тройной гелиевой реакции. Эта реакция происходит при средних значениях температуры свыше 1,5 * 10⁸ К и плотности порядка 5 * 10⁷ кг/м³ и проходит в два этапа:

- **Эндотермическая** реакция с образованием нестабильного изотопа бериллия-8:



- **Изотермическая** реакция с образованием возбужденного ядра углерода-12:



Так как ядро бериллия-8 имеет очень малое время жизни, эта реакция протекает с заметной

скоростью только при высокой плотности ядер гелия.

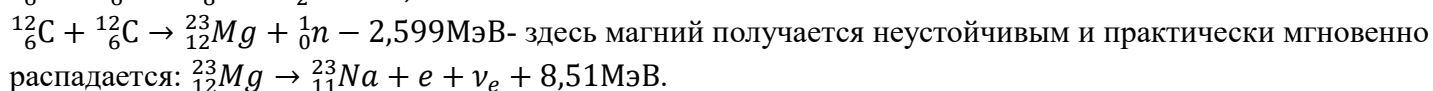
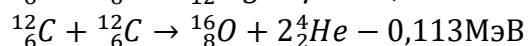
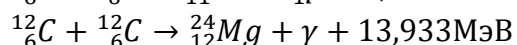
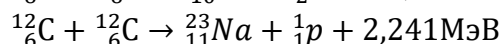
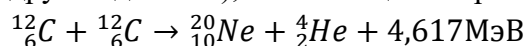
Также, из-за того, что возбужденное состояние ядра углерода-12 нестабильно, оно может распасться на три альфа-частицы и лишь с вероятностью 0,0413(11) % излучает гамма-квант и переходит в основное стабильное состояние ^{12}C [17].

Выделяющаяся из Тройной гелиевой реакции энергия соответствует уменьшению массы каждого из ядер гелия примерно на 0.3%. Таким образом, при ядерном «сгорании» 1 кг гелия выделяется почти втрое меньше энергии, чем при «сгорании» 1 кг водорода. Поскольку на стадии горения гелия светимость звезды в несколько раз выше, чем на Главной Последовательности, то ясно, что гелий в звезде должен выгорать примерно на порядок быстрее, чем водород. Видеть это наглядно можно в таблице 5.2. (Приложение 7). [1, с. 152]

Калорийность других видов ядерного топлива еще меньше, чем у гелия, а светимость звезды при их сгорании еще больше, поэтому последующие стадии эволюции звезды более скоротечны. Именно поэтому пребывание на Главной Последовательности звезд массой более $0.5M_{\odot}$ занимает около 90% их жизни. Естественно, речь идет об активной фазе существования звезды — белые карлики и нейтронные звезды живут практически вечно (но светят недолго).

В. Ядерное горение углерода

Реакции слияния ядер углерода-12 в недрах звёзд, с массой более 5-6 масс Солнца (выше 8 по другим данным), начинающиеся при температуре около 10^8K и плотности порядка 10^8кг/м^3 , выглядят так:



Эти реакции с участием углерода не проходят так спокойно, как большинство других реакций, это сопровождается колоссальным выплеском энергии, что будет выглядеть, как вспышка сверхновой типа II (то есть с наличием водорода), однако в настоящее время эта информация подвергнута сомнению. В основном же эти реакции протекают при вспышке сверхновой типа Ia — сверхновая белого карлика в двойной системе, где на белый карлик аккрецирует вещество с компаньона. [18]

По другим данным горение углерода происходит относительно спокойно, но все же очень быстро, например, у звезды массой $25 M_{\odot}$ углерод будет гореть на протяжении около 600 лет.

Г. Ядерное горение неона, кислорода, кремния.

Ядерное горение неона происходит в звездах массой выше 8 солнечных при высокой температуре ($1,2 \cdot 10^9\text{ K}$) и плотности $4 \cdot 10^9\text{ кг/м}^3$; кислорода - при температуре около $1,5 \cdot 10^9\text{ K}$ и плотности порядка 10^{10} кг/м^3 ; кремния — при температуре $2,7—3,5 \cdot 10^9\text{ K}$. Такие условия могут обеспечить только звезды по массе в 8-11 раз превосходящие солнечную. Более того, эти реакции начинаются лишь в момент прямо перед коллапсом звезды (одна за другой) и могут поддержать звезду очень не долго, как например, в звездах массой свыше $25M_{\odot}$ не более двух лет суммарно (по другим данным не более полугода), поэтому не имеет смысла расписывать все эти реакции, но упомянуть о них нужно обязательно, так как после них ядерный синтез в звезде закончится. Образованное в ходе ряда ядерных реакций железо не станет новым источником энергии в звезде.

Д. Ядерные реакции в тяжелых звездах

Опираясь на главу 5.2.3. В. Г. Сурдина, можно сказать, что скорость выделения энергии в реакциях ядерного синтеза очень сильно зависит от температуры, то есть от интенсивности движения частиц. В этом легко убедиться из молекулярной физики:

$$E_k = \frac{2}{3} RT$$

(формула 5)

В данной формуле R - универсальная газовая постоянная, T - абсолютная температура (выраженная в К), в нашем случае, в ядре звезды.

Температура в центре Солнца и других звезд нижней части ГП такова, что лишь малая доля протонов может преодолеть взаимное отталкивание и сблизиться на расстояния, при которых преобладают ядерные силы притяжения. Ядрам других элементов сблизиться на достаточно малые расстояния еще труднее, так как по закону Кулона (Приложение 1) сила взаимного отталкивания пропорциональна произведению зарядов ядер. Поэтому в звездах нижней части ГП в реакции вступают лишь ядра легчайших химических элементов.

Е. Некоторые иные ядерные реакции.

При столкновении лития-7 и протона образуются 2 ядра гелия-4, но учитывается, что лития в звезде нет. К тому же его горение не происходит в звездах, меньших 60 масс Юпитера.

В звездах происходит так называемый CNO-цикл, он играет значительную роль лишь в звездах больших масс, но все равно он обеспечивает звезду энергией много-меньше, чем p-p-цикл. Кроме того, для этого цикла в звезде должны быть такие элементы как углерод, кислород, азот, но мы при моделировании я считаю, что в звезде в начальный момент времени было ничтожно мало любых иных элементов, кроме водорода.

Во время протекания тройной гелиевой реакции в ядре звезды, также происходит реакция захвата α -частицы ядром углерода: ${}^4_2\text{He} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma + 7,16\text{МэВ}$

Выход такой реакции довольно значительный, однако им все равно можно пренебречь, потому что стабильного углерода на протяжении большей части времени протекания подобных реакций в ядре довольно мало, а стадия горения углерода занимает сравнительно мало времени. Однако эта реакция объясняет, почему концом эволюции звезд определенных масс будет именно углеродно-кислородный карлик, а не просто углеродный.

1.3. Основы моделирования эволюции звезды

А. Главная Последовательность.

Нужно понимать тот факт, что звезда существует еще до вступления ее на ГП. Однако, так или иначе, моделирование эволюцию звезды будет происходить с момента ее вступления на ГП, поэтому в данном контексте не важно, что было до этого события.

Звезда вступает на Главную Последовательность при установлении энергетического равновесия за счет «сжигания» в ее недрах водорода и синтеза из него гелия. Звезда уходит с ГП, когда в ее ядре заканчивается водород, а само ядро становится гелиевым. Чем больше звезда, тем больше водорода она расходует в единицу времени, поэтому время пребывания светила на ГП напрямую зависит от ее массы.

Б. Эволюция звёзд после ГП малых масс.

Исследование эволюции звезд малой массы осложняется тем, что длительность стадии ГП для них больше возраста нынешней Вселенной — среди звёзд малой массы еще нет таких, которые сошли с главной последовательности. В основном какие-либо данные о них получены теоретическими расчетами: звёзды с массами менее $0,2M_{\odot}$ не станут красными гигантами, так как полностью конвективны и химически однородны. Эти звезды будут по мере накопления гелия нагреваться, превращаясь в голубые

карлики (Приложение 1).

Голубые карлики — гипотетический класс звёзд, эволюционирующий из красных карликов, звёзд по массе меньших, чем Солнце (менее 0,5 масс Солнца и вплоть до минимального порога масс звёзд). Поскольку красные карлики сжигают водород медленно и являются полностью конвективными, что позволяет им использовать больший процент водородного горючего по сравнению с более массивными звёздами, то в настоящее время ещё ни один из красных карликов не успел превратиться в голубого карлика. Однако, существование этого класса звёзд следует из теоретических моделей.

Предполагается, что после израсходования всего запаса водорода голубые карлики становятся гелиевыми белыми карликами (Приложение 1).

В научном мире продолжают споры по поводу того, как поведут себя более массивные красные карлики, но массой менее половины Солнечной. Такие звезды не смогут увеличить температуру своего ядра для поддержания тройной гелиевой реакции, даже после использования слоевого источника, поэтому при увеличении размеров звезды, гравитация не сможет удержать внешние слои, и они рассеются в пространстве, а от звезды останется лишь плотное гелиевое ядро — белый карлик [1, с. 162].

В. Эволюция звезд после ГП средних масс.

Когда ядро звезды средней массы близко к тому, чтобы стать практически полностью гелиевым, водород всё ещё имеется во внешней оболочке ядра этой звезды. Если в звёздах массой до $1,5M_{\odot}$ уже идёт синтез гелия, то в звёздах с большей массой начинается кратковременное сжатие, которое приводит к разогреву оболочки ядра и началу горения водорода в ней. Звезда немного нагревается и становится ярче.

В конце стадии субгигантов, гелиевое ядро у звезды становится достаточно массивным и начинает сжиматься, но то, как проходит этот процесс, зависит от массы звезды. В звёздах с массой более $2,5—3M_{\odot}$ сжатие ядра начинается из-за того, что в какой-то момент его масса превышает предел Шёнберга — Чандрасекара (Приложение 1), при этом оно остаётся в состоянии, близком к идеальному газу. В звёздах с меньшей массой гелиевое ядро начинает сжиматься после того, как станет вырожденным.

Температура в ядре звезды поднимается достаточно для начала тройной гелиевой реакции, в которой выделяется так много энергии, что звезда начинает буквально раздуваться. При этом светимость звезды остается примерно на том же уровне, что и в течение основной фазы ее жизни, но, поскольку излучается эта энергия теперь через значительно большую площадь поверхности, внешний слой звезды остывает до красной части спектра — звезда превращается в красный гигант.

После стадии субгигантов, звезда в любом случае переходит на ветвь красных гигантов, однако у звёзд меньшей массы гелиевое ядро оказывается вырожденным, а у звёзд большей массы остаётся в состоянии, близком к идеальному газу. В любом случае у звезды появляется протяжённая зона конвекции во внешних слоях, которая в определённый момент достигает ядра, что приводит к перемешиванию вещества в звезде. Происходит быстрый рост радиуса и светимости, хотя температура снижается. Ядро, не имея источника энергии в центре, становится изотермическим, излучается сильный звёздный ветер, приводящий к некоторой потере массы звездой. Солнце пробудет на ветви красных гигантов около 600 миллионов лет.

В итоге у звёзд с начальной массой более $2,5—3M_{\odot}$ постепенно, с ростом температуры и плотности ядра, загорается гелий: при тройной гелиевой реакции из трёх ядер гелия в ядре синтезируется ядро углерода. Теперь у звезды есть два источника ядерной энергии: центральный, в котором сгорает гелий, и слоевой, в котором гелий образуется из водорода. Подстраиваясь под изменившиеся условия, оболочка звезды уменьшается в размере и немного нагревается. Эффективная температура звезды возрастает, и звезда покидает область красных гигантов. Пребывание в состоянии с большим радиусом не проходит для звезды бесследно: в этот период часть вещества оболочки, слабо связанная с основной массой звезды,

истекает в окружающее пространство.

У звёзд с меньшей массой (но превышающей $0,5 M_{\odot}$) происходит то же, но ядро пребывает в вырожденном состоянии, из-за чего оно хорошо проводит тепло и может быстро отдавать энергию. Кроме того, в это время звезда в большом количестве излучает нейтрино, из-за чего рост температуры замедляется и возгорание гелия откладывается. Тем не менее, масса гелиевого ядра возрастает, и при массе $0,4—0,5 M_{\odot}$ температура оказывается достаточной для запуска тройной гелиевой реакции — порядка 10^8 К. В отличие от более тяжёлых звёзд, здесь возгорание гелия происходит взрывообразно и за несколько минут выделяется огромное количество энергии, причем большая часть ее уходит на снятие вырожденного состояния с ядра — это явление известно как гелиевая вспышка. Непосредственно перед гелиевой вспышкой масса Солнца будет составлять $0,725 M_{\odot}$. Его радиус будет составлять $170R_{\odot}$, температура — 3100 К, а светимость — $2300 L_{\odot}$.

После начала тройной гелиевой реакции у звезд массой менее $2,5-3 M_{\odot}$ происходит быстрое уменьшение в размерах (у Солнца это займет около миллиона лет и после этого оно будет иметь радиус $9,5R_{\odot}$, температуру — 4700 К, а светимость — $41 L_{\odot}$. Такие параметры сохранятся у него до 130 млн. лет) после чего звезда вступает в довольно продолжительный период своей жизни, в течение которого в ее недрах накапливается углерод. Когда концентрация углерода возрастает, некоторая часть углерода превращается в кислород, вступая в реакцию с гелием. По мере выгорания гелия светимость звезды немного увеличивается, а ее эффективная температура то понижается, то увеличивается.

Когда гелий в центральной области кончается, лишенное источников энергии ядро звезды начинает сжиматься, и вскоре температура и плотность на его внешней границе увеличиваются, звезда последний раз немного сожмется, пока не начнется горение гелия в слоевом источнике над ядром, но под слоевым источником водорода, расширится и больше не сможет сжаться. И для таких звезд это становится последней стадией их жизни, после чего внешние слои звезды «растают», и от нее останется лишь углеродно-кислородный белый карлик.

Г. Эволюция звезд после ГП больших масс.

В звёздах с массами более $2,5—3 M_{\odot}$ гелий загорается не взрывообразно, а постепенно, из-за чего они эволюционируют по-другому. Такого резкого изменения параметров не происходит, однако с увеличением выработки энергии в гелиевом ядре звезда постепенно сжимается и становится горячее, практически не изменяя светимость, но потом снова расширяется.

Длительность прохождения этого этапа зависит от массы звезды: при начальной массе звезды в $10M_{\odot}$ время прохождения составит 4 миллиона лет, а при массе в $5M_{\odot}$ — 22 миллиона лет

Дальнейшая эволюция похожа на эволюцию звезд средних масс, однако перед превращением звезды в белый карлик, она проходит еще одну стадию после накопления углерода и кислорода в ядре звезды.

Когда гелий в центральной области кончается, лишенное источников энергии ядро звезды начинает сжиматься, и вскоре температура и плотность на его внешней границе увеличиваются настолько, что там загорается гелий. С этого момента ядро окружено двумя слоевыми источниками: внешним, где «горит» водород и внутренним, где «горит» гелий. Это сопровождается увеличением размера звезды и снижением ее эффективной температуры: звезда становится красным сверхгигантом, имеющим радиус в $100-1000$ раз больше солнечного.

Пульсируют эти звезды по той же причине, что и цефеиды. Как правило, пульсации красных сверхгигантов происходят не строго периодически, зато их амплитуда очень велика: в течение одного цикла радиус звезды меняется в десятки, а светимость в тысячи раз! Называют эти звезды миридами по

имени первой открытой звезды такого типа — Миры (Приложение 1).

Перенос тепла в оболочках красных сверхгигантов осуществляется конвекцией (Приложение 1), которая захватывает область от слоевых источников горения гелия и водорода до фотосферы. В результате в нижнюю часть оболочки попадают продукты термоядерных реакций.

По мере того, как наружные слои оболочки, состоящие в основном из водорода и гелия, улетают в окружающее пространство, атмосфера звезды все больше обогащается прибывшими из глубины продуктами ядерного синтеза. Истекающий из атмосфер этих звезд газ постепенно охлаждается. Когда его температура опускается ниже 1500 К, атомы углерода начинают конденсироваться в мельчайшие пылинки, активно поглощающие свет: звезда коптит, как заводская труба! Внешняя яркость звезды в оптическом диапазоне за несколько дней может упасть в тысячу раз.

К окончанию стадии сверхгиганта, которая длится несколько сотен тысяч лет, практически вся оболочка звезды сбрасывается, обнажая горячее вырожденное углеродно-кислородное ядро, которое затем остывает и превращается в белый карлик, однако масса белого карлика не может превышать предел Шёнберга - Чандрасекара, приблизительно равный $1,4 M_{\odot}$ (иначе карлик коллапсирует). Именно этими двумя обстоятельствами определяется верхняя граница интервала масс, который мы рассматриваем (8-10 M_{\odot}): это начальная масса тех звезд, у которых к концу эволюции вырожденное углеродно-кислородное ядро не превышает по массе предел Шёнберга — Чандрасекара [1, с. 162-168].

Д. Эволюция звезд после ГП масс больше 10 солнечных.

На этапе сверхгиганта такие звезды представляют из себя некую «матрешку» из слоевых источников. Чем глубже — тем сложнее элементы синтезируются в них: от водородного слоя до кремниевого, в котором образуются элементы группы железа — от самого верхнего слоевого источника к центру (Приложение 4). Постепенно ядро звезды становится железно-никелевым. Реакции ядерного синтеза к тому моменту достигают пика своей активности, так как расход энергии в звезде становится как никогда ранее большим. Однако образование элементов порядковым номером выше ${}_{26}^{56}Fe$ не возможно в звезде, потому что это энергетически не выгодно, так что образование нового слоевого источника или продолжение ядерного синтеза в ядре не возможно и единственный способ «добычи» энергии ядро звезды находит только в своем сжатии, причем давление и температура меняются не столь стремительно, как объем, поэтому ядро коллапсирует.

Результат коллапса прямо зависит от массы ядра. До этой стадии, начиная от ГП нулевого возраста крупная звезда потеряет до двух третей своей массы (на самой ГП до $3 \cdot 10^{-6} M_{\odot}$ ежегодно, а на поздних стадиях темп возрастает в 10-30 раз). Как сказано было ранее, ядро должно иметь массу выше $1,4 M_{\odot}$, чтобы сколлапсировать. Для этого необходимо, чтобы на ГП звезда имела массу приблизительно не более $40 M_{\odot}$ [1, с. 169-177] и всего лишь $8 M_{\odot}$, по другим данным [19]. После коллапса масса ядра немного увеличится за счет падающих на него вышележащих слоев, однако часть вещества, упавшего на звезду, относительно не большая, ведь коллапс сопровождается вспышкой сверхновой и большая часть вещества уходит в межзвездное пространство, образуя туманность типа SN (Приложение 5). Масса нейтронной звезды ограничена — $1,5 M_{\odot}$ - $3 M_{\odot}$, при этом верхний порог называется пределом Оппенгеймера-Волкова.

Если же масса железно-никелевого ядра превысила значение в $3 M_{\odot}$ (то есть масса звезды ГП нулевого уровня превысила значение в $40 M_{\odot}$), то коллапс звезды не окончится на нейтронной звезде, она схлопнется в черную дыру. Часть вещества коллапсирующего ядра образует вокруг новорожденной черной дыры аккреционный диск, который в течение нескольких секунд «заглатывается» черной дырой. Процесс дисковой аккреции вещества в дыру сопровождается выбросом двух газовых струй под названием джеты (Приложение 6), которые с релятивистскими скоростями движутся в направлениях, перпендикулярных плоскости диска. Все это происходит внутри оболочки звезды, не успевшей

отреагировать на перестройку ядра, поэтому мощные потоки газа пробивают оболочку звезды и порождают всплески гамма-излучения, направленные вдоль оси диска. Одновременно с этим в плоскости диска возникает ударная волна, которая распространяется наружу и сбрасывает оболочку звезды, что называется вспышкой гиперновой.

2. Реализация модели

2.1. Выбор языка и среды программирования

Поскольку в программном обеспечении справедливо ожидается большой объем вычислительных операций, был выбран язык C++. Преимуществом данного языка является его скорость, а также относительная популярность.

Среда программирования Code:Blocks была выбрана за её простоту использования, открытость и распространенность.

Компилятор — MinGW, устанавливался вместе со средой программирования.

Дополнительно к Code:Blocks была использована графическая библиотека SFML.

2.2. Фрагменты базовой реализации программного обеспечения

В программе все изменения обусловлены изменением некоторых переменных. Например, «`polo_window`» - отвечает за то, какие спрайты, текст, действия будут происходить. Изначально значение переменной принято за нуль, что означает, что в окне открыто меню. При нажатии клавиши «Esc» после того, как в меню осуществляется выбор, данная переменная обнулится, а значит, перед нами снова будет меню.

«`variable`» - переменная «времени». Количество кадров в секунду (FPS) ограничено 10-ю. Эта переменная изменяется при ненулевом значении «`polo_window`» - к ней прибавляется по 0,1 за 1 кадр. Таким образом, получается, что за 1 секунду «`variable`» изменяется на 1, что позволяет мне использовать условия, по типу: `if (variable > N and variable < M) {...}`

То есть, это можно интерпретировать так: «если с момента запуска эволюции прошло больше N секунд, но меньше M секунд, то выполнять следующие указания: ...».

«`d_rad`» - эта переменная будет играть роль коэффициента увеличения или уменьшения радиуса «звезды», увеличивающийся за 1 кадр на 0,003.

Работа с радиусом, позицией, цветом.

Вот пример операции по увеличению радиуса круга (звезды): «`R=R*(1+2.469*d_rad);`» - здесь R – радиус, который должен в начале цикла оставаться при прежнем значении. При R=50 пикселей, за 27 секунд эта функция будет плавно «увеличивать» радиус до 150 пикселей. На деле будет изменяться лишь «`d_rad`», отобразится круг того радиуса, который образует эта функция, а потом он вновь станет равным 50, так как цикл начнётся заново, но отобразится круг радиуса уже большего радиуса. Цикл проходит 10 раз в секунду, это количество равно базовому FPS анимации.

Изменяется и положение круга, а его положение необходимо всегда изменять, потому что центр при изменении радиуса перемещается по диагонали: левый верхний угол - правый нижний.

Пример функции изменения позиции круга на экране:

`shape.setPosition(350*(1-0.353*d_rad),250*(1-0.494*d_rad)).`

При начальной позиции круга (350, 250) на экране, она будет плавно перемещаться вверх-влево. Комбинируя данную строчку кода со строкой изменения радиуса, можно получить, что круг будет стоять на месте, если необходимо, чтобы он находился в центре окна.

Цвет отображения звезды можно разложить на три составляющие RGB –красный, зеленый и синий, например: «`shape.setFillColor(Color(255, 255, 255));`» -эта строка устанавливает белый цвет объекту shape, что в программе является именем объекта типа Circle, то есть круг, он же и звезда. Если на месте одного из чисел в этой функции поместить переменную, то можно получить изменяющийся цвет круга (звезды) во времени, например:

«shape.setFillColor(Color(255, 255, 234*(1+0.641*d_bright)));», где `d_bright` – переменная, которая используется у меня только для изменения цвета, увеличивающаяся на 0,001 за кадр. За 14 секунд эта строчка сделает круг чисто белым.

Также можно через запятую добавить и четвертое число в указании цвета круга, тогда оно будет означать его прозрачность. 255 — круг абсолютно непрозрачный, 0 — абсолютно прозрачный. Также подставляя уравнения с переменной, можно динамически изменять прозрачность круга.

Для лучшего дальнейшего моделирования, введем несколько терминов.

Во время выполнения алгоритма программы существуют события изменения параметров внешнего вида звезды и события, в которых звезда выглядит статично, но меняются лишь отображаемые комментарии. «Статичные» участки модели во времени, где звезда не меняет своих параметров, обозначим «комментатор – паузой». Изменение текста комментариев во время комментатор-паузы обозначим «слайдами». Если параметры звезды меняются во времени, будем говорить, что мы «запускаем эволюцию звезды».

2.3. Меню

После запуска программы открывается меню, где предоставляется возможность пользовательского ввода параметров звезды, за эволюцией которой необходимо проследить, или же возможность выбора звездной массы из предложенных (см. приложение 8).

Если пользователь выбирает звездную массу из предложенных, он просмотрит на эволюцию звезды данной массы и автоматически подобранными светимостью и радиусом с комментариями, то есть с кратким описанием того, что происходит у него на глазах – поэтому программой могут пользоваться не только знающие астрономию люди, но и начинающие своё обучение в данной теме, что делает данный продукт хорошим инструментом популяризации астрофизики, небесной механики и астрономии в целом.

Меню представляет собой один большой спрайт, разделенный на участки уже программно. Всего участков 17, при нажатии на любой из них изменится значение «`polo_window`» и будут выполняться заложенные алгоритмические действия.

Помимо «зонированных кнопок», которые запустят эволюцию звезды, есть 6 кнопок, отвечающих за другие действия. Среди таких кнопок: консольный ввод (`polo_window=50`); «Всему приходит конец» (`polo_window=12`), при выборе которого будут показаны слайды без звезды, текст будет повествовать о истинном конце эволюции звезд; «Разработчик» (`polo_window =13`), состоящий из одного слайда, содержащего название программы, версию, имя разработчика (Gypsy Sparrow's Industry (GSI)) и уведомление, что мы не несем ответственности за действия пользователя в программе; «Благодарность автору проекта» (`polo_window =14`) - также состоит из одного слайда; «Глоссарий» (`polo_window =15`) - кнопка, открывающее в окне Глоссарий; «Выход» (`polo_window =16`) - альтернатива прямому закрытию окна. Все остальные «кнопки» будут запускать определенную эволюцию звезды.

2.4. Ручной ввод массы звезды

Кнопка консольного ввода заменит спрайт меню похожим слайдом с небольшой долей отличий, в котором невозможно будет осуществить нажатие на «кнопки», будут доступны лишь клавиши «Esc», «Enter», клавиши числового ввода и плавающей точки. После осуществления пользователем ввода массы звезды (выраженной в почти 5% солнечной массы) он может нажать «Enter» и, если введенное значение приемлемо, то есть лежит в диапазоне от 0,24 до 10000 (верхняя граница условна), то в зависимости от введенного значения будет выбрано отличное от нуля значение переменной «`polo_window`». Например, если введенное значение принадлежит диапазону от 15,9 до 21,5 (если умножить это число на 10^{29} , то мы получим значение массы этой звезды), то эта звезда будет относиться к звездам солнечной массы, то есть `polo_window=4` — в окне запустится предусмотренная эволюция для такого типа звезды.

2.5. Глоссарий

При нажатии на кнопку «Глоссарий» в окне отрывается один большой специальный спрайт, а с помощью переменной «`frame`» он разделяется на участки, между которыми и перемещается фокус

просмотра за счет нажатия на клавиши стрелок: вправо и влево. Благодаря этим кнопкам пользователь может перемещаться по глоссарию, состоящему будто из нескольких разных фотографий, картинок и текста.

2.6 Воспроизведение алгоритма эволюции звезды.

Пример визуального отображения эволюции звезды представлен в приложении №9.

А. Первые секунды.

При выборе в меню какой-либо звездной массы или после введения своих параметров звезды, в окне программы исчезает меню и возникают два поочередно сменяющихся слайда, как вступление к тому, что нас ждет далее: «Где-то в далекой-далекой Вселенной... .. Где-то в далекой-далекой Вселенной... Появилась новая звезда...»

После короткого вступления пользователь сразу видит почти сформировавшуюся звезду (вид которой будет зависеть от выбранных параметров). Менее секунды пользователь может видеть последнее аккрецирующее межзвездное вещество (отдельный спрайт) на поверхность звезды. Важный факт: учитывается, что все межзвездное вещество находится в непосредственной близости к звезде и в результате аккреции упало на ее поверхность, не сформировав протопланетного диска вокруг нее или даже второй звезды, также учитывается, что вокруг моделируемой звезды нет ни единого космического тела, способного как-либо повлиять на процесс эволюции. Особенно важно, чтобы система не состояла из двух и более звезд, ведь некоторые процессы, вызванные взаимным влиянием близких звезд друг на друга для астрономов остаются загадкой и поныне.

Последнее межзвездное вещество присоединилось к звезде, аккреционный диск у звезды исчез и больше частицы газа и пыли (в основном водород) не могут нагревать звезду, посредством перехода кинетической энергии их движения (падения на звезду) во внутреннюю. В то же время звезда продолжает излучать свет в инфракрасном диапазоне, поэтому звезде необходимо где-то брать энергию. Собственно, механизм появления этой энергии не меняется, но внешне мы видим иную картину: звезда начинает сжиматься – то есть вещество из внешних слоев падает на более глубокие слои (снова кинетическая энергия идет на нагрев и излучение). В то же время в центральной области звезды концентрация вещества растет, частицы все чаще начинают сталкиваться, а излучению все труднее перенести энергию из центра в выше лежащие слои, поэтому быстро растет температура центральных областей, а различные процессы постепенно переносят тепло ближе к поверхности. Таким образом сжатие будет продолжаться до тех пор, пока в ядре звезды температура не достигнет значений, при которых начинается ядерный синтез гелия из водорода - пользователь увидит, как после пропажи аккреционного диска звезда начнет быстро (так как наш временной масштаб очень высок) сжиматься.

Все выше описанное будет происходить со звездой при любых заданных или выбранных параметрах кроме случая, когда выбранная масса соответствует массе коричневого карлика — в этом случае аккреция и уменьшение «звезды» не показываются. После этого звезда считается полностью сформированной, и она вступает в Главную Последовательность на диаграмме Гарцшпрунга-Рассела. Дальнейший ход эволюции в принципе тоже схож у звезд, но начиная с некоторого этапа, он различается кардинально. Однако, у каждой звезды этот этап будет проходить в разные периоды времени.

У всех звезд ГП одинаковых масс, также почти равные светимости и радиусы. Именно поэтому была использована таблицей 4.4. учебника Сурдина В. Г. «Звезды» в разрабатываемой программе для моделирования звездной эволюции на этапе жизни звезды, когда она на Главной Последовательности (Приложение 3) [1, с. 111].

Таким образом, мы будем считать, что время, когда звезды сходят с ГП, во многом зависит от массы сформировавшейся звезды.

Б. Основные этапы изменения параметров звезды.

У всех звезд, представленных в меню масс, различаются время начала и продолжительность того или иного этапа, либо вообще нет такого этапа в ее эволюции, поэтому программа повествует, что происходит со звездами на том или ином этапе, не придерживаясь временных рамок. Об исключениях: у коричневого карлика, то есть звезды массы $2,4 \cdot 10^{28}$ — $1,5 \cdot 10^{29}$ кг (`polo_window=2`) не происходит никаких изменений параметров, потому что он не эволюционирует. Для него не был даже показан аккреционный диск вначале. Что касается всех остальных звёзд, то они начнут менять свои параметры по ходу симуляции эволюции не раньше, чем через 59 секунд, после старта, когда показываются изменения звезды на Главной Последовательности. Для Солнца (самая верхняя, левая «кнопка», `polo_window=1`) пользователь сначала увидит, как звезда менялась в течение почти 4,6 млрд. лет, то есть до нынешнего состояния Солнца, а только потом, после короткой «комментатор-паузы» возобновится эволюция звезды вплоть до ее завершающей стадии нахождения на ГП. Стоит отметить, что во время эволюции комментарии все же меняются, а если пропадают, то не более чем на 3 секунды без изменения самой звезды.

Красные карлики (третья слева, в верхнем ряду кнопка, `polo_window=3`) уменьшаются в своих размерах, превращаясь в голубой карлик — гипотетический класс звезд. Сейчас ученые предполагают, что после этого голубой карлик должен расширяться до красного гиганта и сбросить свою оболочку, но в программе это не было показано, потому что разные источники информации говорят о разных концах эволюции красного карлика, к тому же, чтобы стать голубым карликом, красному карлику потребуются триллионы лет, поэтому вполне можно остановиться на этой стадии.

У остальных же звёзд окончание их нахождения на ГП отмечается кратковременной «комментатор-паузой», после чего вновь продолжается эволюция звезды. Пока что она не отличается у оставшихся звезд, все они достигают стадии субгиганта. У оранжевого карлика, желтого карлика (включая солнечную массу), звезды спектрального класса А, что соответствуют значениям `polo_window`, равным 4, 5 (1 - Солнце), 6 — самая верхняя справа «кнопка» и первые 2 «кнопки» во втором ряду, слева, после «комментатор-паузы», после стадии субгиганта происходит увеличение в размерах до красного гиганта и звёзды увеличиваются в размере до 150-200 раз. Другие звезды перед этим проходят стадии цефеиды и уменьшения. Для экономии времени цефеида (а после и мирида) была изображена, как быстрое уменьшение в размерах и почти без паузы еще более скоростное увеличение в размерах. Любое увеличение либо уменьшение в размере будут сопровождены плавным желтением, краснением звезды, либо наоборот, она станет белее. Различие звезд с `polo_window`, равным 1, 4, 5, 6 и остальных, более массивных звезд из списка в стадии уже красного гиганта в том, что у более массивных звезд эта стадия переходит в стадию красного сверхгиганта, то есть рост радиуса звезды уже в более чем 200 раз! Так или иначе, но такие увеличения радиусов по ходу выполнения программы были взяты не в масштабе.

Чередуя эволюцию звезд с небольшими «комментатор-паузами», звезды с `polo_window`, равным 4, 5, 6 после стадии красного гиганта уменьшаться в размерах, потом вновь увеличатся до еще больших размеров, что завершается тем, что внешние слои «отделяются от звезды» и остается лишь белый карлик и планетарная туманность. Для осуществления такой визуализации был создан дополнительный круг. У обоих кругов и их окантовок со временем изменяются параметры.

Что касается оставшихся звезд, звезд большей массы с массой от $2,95 \cdot 10^{30}$ кг (`polo_window=7`), то после стадии красного сверхгиганта они переходят в стадию мириды. Это необязательно может произойти в реальных условиях, но очень важно это показать в программе в образовательных целях. Эта стадия показана в программе аналогично прохождению стадии цефеиды. После этой стадии будет продолжено увеличение радиуса звезды без «комментатор-пауз» (комментарии все также будут меняться и иногда исчезать), но увеличение звезды будет происходить гораздо медленнее, чем до этого.

Появляются последние комментарии перед «вспышкой сверхновой», которая в программе

показана, как мгновенная замена всего, что мы видим на экране одним лишь чисто белым фоном. Так показать вспышку сверхновой позволяет факт масштабности этого взрыва. Этот белый фон был сделан одним лишь белым прямоугольником, который был отрисован на всю площадь окна. Постепенно этот белый прямоугольник будет становиться все более прозрачным.

Если переменная `polo_window=9`, то это отобразится нейтронная звезда — маленький белый кружочек в центре экрана. Если `polo_window=10`, то это будет черная дыра — маленький черный кружок, с бело-желтым обрамлением — аккрецирующим веществом.

Г. Черная дыра из пыли и газа.

Если была нажата кнопка «Черная дыра из облака пыли и газа» (`polo_window=11`), то, вместо того, чтобы запустить стандартный сценарий эволюции, в окне появляется большой спрайт, вращающийся по часовой стрелке, за ним находится полупрозрачный круг. Таким образом показано закручивание газа в места пространства, обладающих большой гравитацией. Отображается ещё немного комментариев и экран становится полностью белым из-за «вспышки сверхновой», после которой остается уже описанный выше вид черной дыры. Таким образом описан сценарий образования черной дыры из очень массивного облака газа и пыли, из которого формировалась постепенно звезда, протоядро которой сумело превзойти предел Оппенгеймера-Волкова.

Заключение

Апробация программного обеспечения прошла на занятиях по астрономии в МБОУ ЛСТУ №2 г. Пензы. В результате неё были получены положительные отзывы как от преподавателей, так и от учащихся старших классов.

В ходе работы все поставленные задачи были выполнены и достигнута основная цель проекта.

Созданная программа позволяет всем заинтересовавшимся темой эволюции звёзд пользователям получить визуальные и иные представления о протекающих в недрах звезды процессах, а также внешних изменений звезд во время их «жизни».

Эволюция звёзд была достаточно подробно и доступно описана. Всем описания имеют наглядную визуализацию процессов. Было рассмотрено большое количество сценариев развития эволюции звёзд и проработаны их отображения на экране.

В перспективе планируется расширение функциональности ПО, улучшение качества визуализации.

Список использованных источников

- 1) В.Г. Сурдин «Звезды». М.: Издательство Физико-математической литературы, 2008. - 428 с. - (Астрономия и астрофизика)
- 2) К.А. Постнов, А.В. Засов. «Курс общей астрофизики» М.: Физический факультет МГУ, 2005, 192 с.
- 3) Б.А. Воронцов-Вельяминов, Е.К. Страут «Астрономия. Базовый уровень. 11 класс: учебник. - 5-е изд., пересмотр. - М.: Дрофа, 2018. - 238, [2] с.
- 4) Засов А. В., Кононович Э. В. «Астрономия»: Учеб. Пособие. - 3-е изд., испр. И доп. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. - 264 с.
- 5) Попов С. Б. «Суперобъекты. Звёзды размером с город». — М.: Литагент «Альпина», 2016
- 6) Звезды сверхгиганты: [сайт]. URL: <https://spacegid.com/zvezdyi-sverhgigantyi.html> (1.12.2020)
- 7) Красный гигант — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Красный_сверхгигант (10.10.2020)
- 8) Эволюция звезд — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эволюция_звёзд (24.12.2020)
- 9) Черная дыра — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Чёрная_дыра#Теоремы_об (24.12.2020)
- 10) Черная дыра звездной массы— Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Чёрная_дыра_звёздной_массы (20.07.2020)
- 11) Звезды главной последовательности спектрального класса F — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Звёзды_главной_последовательности_спектрального_класса_F (27.11.2020)
- 12) Голубой гигант — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Голубой_гигант (27.11.2020)
- 13) Желтый карлик — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Жёлтый_карлик (26.11.2020)
- 14) Оранжевый карлик — Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оранжевый_карлик (26.11.2020)
- 15) Эволюция солнца: происхождение, строение и стадии : [сайт]. URL: <https://fb.ru/article/380022/evolyutsiya-solntsa-proishojdenie-stroenie-i-stadii> (16.11.2020)
- 16) Эволюция Солнца: характеристика этапов: [сайт]. URL: <https://v-kosmose.com/solntse-interesnyie-faktyi-i-osobennosti/evolyutsiya/> (16.11.2020)
- 17) Тройная гелиевая реакция– Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тройная_гелиевая_реакция. (24.12.2020)
- 18) Ядерное горение углерода – Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерное_горение_углерода (24.12.2020)
- 19) Нейтронная звезда – Википедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нейтронная_звезда (4.12.2020)

Приложение 1: Глоссарий.

Теория относительности — физическая теория пространства-времени, то есть теория, описывающая универсальные пространственно-временные свойства физических процессов. Термин был введён в 1906 году Максом Планком с целью подчеркнуть роль принципа относительности в специальной теории относительности (и, позже, общей теории относительности). Теория относительности включает в себя специальную и общую теорию относительности. Специальная теория относительности (СТО) относится к процессам, при исследовании которых полями тяготения можно пренебречь, а общая теория относительности (ОТО) — теория тяготения, обобщающая ньютоновскую.

Главная Последовательность — класс звёзд, а также область на диаграмме Герцшпрунга — Рассела, образованная ими. Она расположена примерно на диагонали этой диаграммы и проходит из её верхнего левого угла (звезды высоких светимостей, синего цвета) в правый нижний угол (звезды низких светимостей, красного цвета). То есть звёзды Главной Последовательности лежат в довольно широком диапазоне значений масс, температур и светимостей.

Металличность — относительная концентрация элементов тяжелее водорода и гелия в звёздах или иных астрономических объектах.

Светимость — это полная энергия, излучаемая звездой по всем направлениям за единицу времени

Закон Кулона - один из основных законов электростатики, который определяет величину и направление силы взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами.

Экспериментально с удовлетворительной точностью закон впервые установил Генри Кавендиш в 1773. Электростатическая сила взаимодействия F_{12} двух точечных неподвижных зарядов q_1 и q_2 в вакууме прямо пропорциональна произведению абсолютных значений зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r_{12} между ними.

Голубые карлики — гипотетический класс звёзд, эволюционирующий из красных карликов, звёзд по массе меньших, чем Солнце (менее 0,5 масс Солнца и вплоть до минимального порога масс звёзд). Эти звезды горячее и меньше красных карликов, из которых они были образованы.

Белые карлики — звёзды, состоящие из электронно-ядерной плазмы, лишённые источников термоядерной энергии и слабо светящиеся благодаря своей тепловой энергии, постепенно остывающая и краснеющая.

Цефеиды - класс пульсирующих переменных звёзд, прототипом которых стала δ Цефея. Эти звёзды являются жёлтыми гигантами и сверхгигантами и среди переменных звёзд цефеиды выделяются хорошо изученной зависимостью период — светимость. Они проявляют признаки регулярных радиальных пульсаций с периодами от нескольких дней до нескольких недель при амплитуде блеска от нескольких десятых звёздной величины до 2 звёздных величин.

Диаграмма Герцшпрунга — Рассела — математическая диаграмма, изображающая значения двух переменных в виде точек на декартовой плоскости, по осям которой отмечается абсолютная звёздная величина или светимость и спектральный класс или температура поверхности звезды. Звёзды на этой диаграмме не распределены равномерно, а располагаются в определённых областях. Эта диаграмма сыграла важную роль в развитии теории звёздной эволюции.

Предел Шёнберга — Чандрасекара - максимальная масса для изотермического ядра звезды, в котором не протекают ядерные реакции и которое может поддерживать окружающую оболочку. Представляется в виде отношения массы ядра к полной массе ядра и оболочки. Оценки предела зависят от используемых моделей и предполагаемого химического состава ядра и внешних слоёв, обычно значения предела составляют от 10% до 15% полной массы звезды. Представляет собой максимальное значение, до которого может происходить рост гелиевого ядра; если ядро

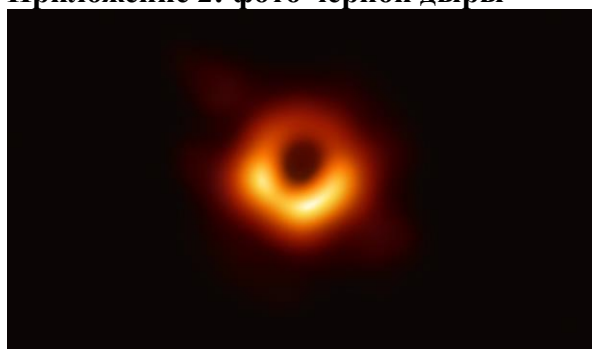
превосходит по массе данный предел, что возможно в случае массивных звёзд, происходит коллапс ядра, выделившаяся энергия приводит к расширению внешних слоёв звезды и переходу её на стадию красного гиганта. Предел назван по фамилиям астрофизиков С. Чандрасекара и М. Шёнберга, оценивших значение данной величины в статье 1942 года.

Предел Оппенгеймера - Волкова — верхний предел массы невращающейся нейтронной звезды, при которой она ещё не коллапсирует в чёрную дыру. Если масса нейтронной звезды меньше этого значения, давление вырожденного нейтронного газа может компенсировать силы гравитации. Одновременно предел Оппенгеймера - Волкова является нижним пределом массы чёрных дыр, образующихся в ходе эволюции звёзд.

Мириды - класс пульсирующих переменных звёзд, названный по имени звезды Мира из созвездия Кита. К этому классу относятся звезды поздних спектральных классов с изменениями блеска от 2,5 до 11 звёздных величин в видимом диапазоне.

Конвекция - вид теплообмена (теплопередачи), при котором внутренняя энергия передается струями и потоками самого вещества.

Приложение 2: фото черной дыры



Фотография была опубликована 10.04.2019 Национальным Научным Фондом США.

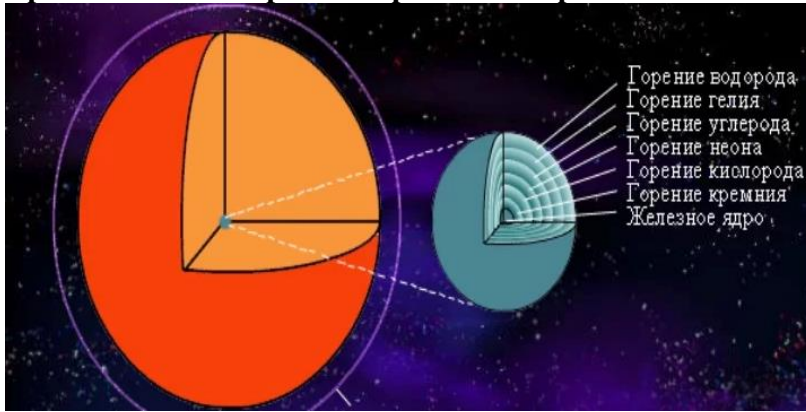
Приложение 3: таблица 4.4. в учебнике Сурдина В. Г. «Звезды»

Таблица 4.4

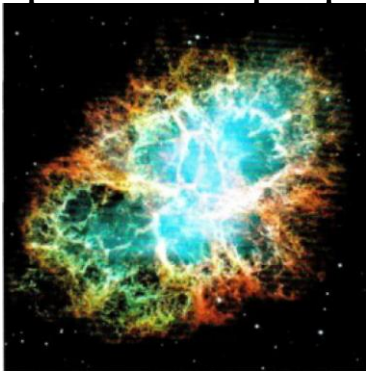
Параметры звезд главной последовательности

Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	Светимость, L_{\odot}	Температура, К	Спектраль- ный класс	Время жизни
120	15,8	1 800 000	53 300	O 3	3 млн
60	10,6	530 000	48 200	O 4	4
27	8,5	140 000	38 000	O 7	8
16	5,7	16 000	32 000	B 0	13
8,3	4,8	2 500	17 000	B 3	34
5,4	3,7	750	15 000	B 5	80
3,5	2,7	130	12 500	B 8	220
2,6	2,3	63	9 500	A 0	480
2,2	2,0	40	9 000	A 2	770
1,9	1,8	24	8 700	A 5	1 200
1,8	1,7	11	8 100	A 7	1 400
1,6	1,5	9	7 400	F 0	2 030
1,5	1,3	6,3	7 100	F 2	2 500
1,35	1,2	4,0	6 400	F 5	3 500
1,2	1,1	2,5	6 100	F 8	5 300
1,08	1,05	1,45	5 900	G 0	7 600
1,0	1,00	1,10	5 800	G 2	10 млрд
0,95	0,91	0,70	5 600	G 5	12
0,85	0,87	0,44	5 300	G 8	18
0,83	0,83	0,36	5 100	K 0	20
0,78	0,79	0,28	4 830	K 2	25
0,68	0,74	0,18	4 370	K 5	43
0,58	0,67	0,12	3 900	K 8	70
0,47	0,63	0,075	3 670	M 0	150
0,33	0,36	0,030	3 400	M 2	230
0,26	0,29	0,014	3 300	M 3	500
0,2	0,21	0,005	3 200	M 4	800

Приложение 4: Строение красного сверхгиганта

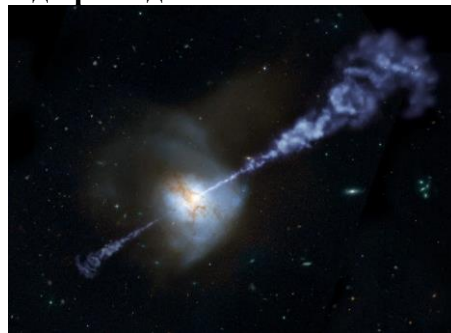


Приложение 5: Пример туманности SN



В данном случае представлена Крабовидная туманность. Изображение взято из книги Засова А. В., Кононовича Э. В. «Астрономия»: Учеб. Пособие. - 3-е изд., испр. И доп. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2017. - 264 с.

Приложение 6: Пример черной дыры с джетом.



Изображение взято из открытых источников.

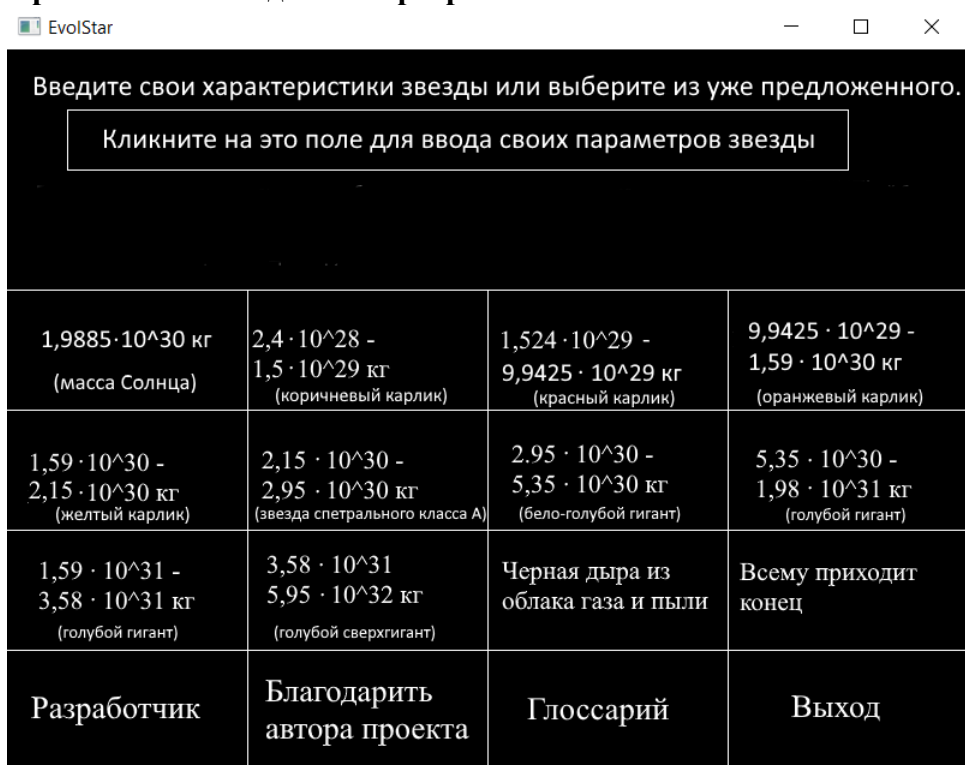
Приложение 7: таблица 5.2 [1, с. 152].

Таблица 5.2

Продолжительность (в годах) важнейших этапов эволюции звезд

Стадия	Масса		
	$1 M_{\odot}$	$5 M_{\odot}$	$10 M_{\odot}$
Формирование	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^5$
Главная последовательность	$9 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Гигант	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$

Приложение 8: вид меню программы.



Приложение 9: демонстрация эволюции звезды.

