

Плазма в космосе

Лекция №8

Эволюция звёзд ч.3: Гиганты и переменные звёзды

Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

28 октября 2021



Содержание лекции

- 1 Цфеиды
 - Периодичность пульсаций
 - Причина пульсаций
- 2 Звёзды массой $> 8M_{\odot}$
- 3 Сверхновые
- 4 Нейтронные звёзды
 - Структура
 - Радиопульсары
 - Рентгеновские барстеры
 - Рентгеновские пульсары

Цефеиды

Цефеиды

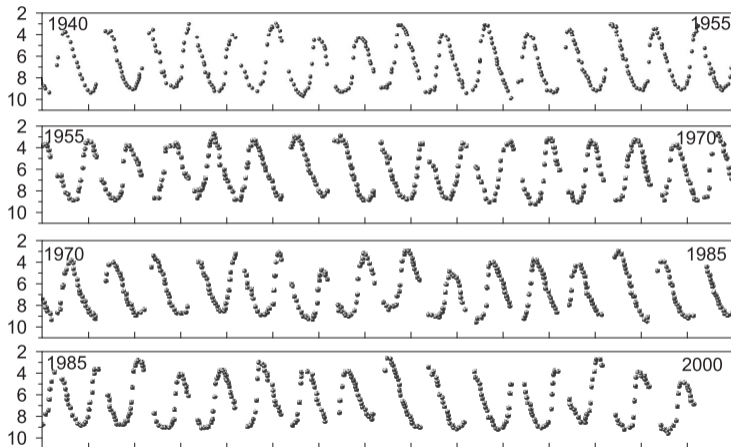
- Цефеиды – звезды, мощность излучения которых в десятки тысяч раз больше, чем у Солнца.
- Это желтые сверхгиганты, они не принадлежат ни к самым горячим, ни к самым холодным звездам.
- Блеск цефеид меняется почти строго периодически
- Периоды большинства цефеид заключены в пределах от суток до месяца.
- В максимальном блеске типичная цефеида становится ярче на одну-две звездных величины, что соответствует увеличению мощности излучения по сравнению с минимальным блеском примерно в **2.5 – 6** раз.

RS Кормы (RS Puppis, RS Pup)

Цфеиды

- Классическим образцом долгопериодических пульсаций является звезда Мира (о Ceti), переменность блеска которой с периодом 11 месяцев (точнее, 322 дня) была обнаружена в 1596 г. Д. Фабрициусом.
- В минимуме блеска она наблюдается как звезда +9 зв. величины и не видна невооруженным глазом, а в максимуме ее яркость достигает +3.5 звездной величины, то есть за один период светимость Мира изменяется более чем в 100 раз.
- Позднее (1784 г.) периодические пульсации блеска с амплитудой в 1 – 2 зв. величины и периодами в несколько дней были обнаружены у важного класса переменных звезд типа δ Цфея (отсюда название всего класса).

Цфеиды



Изменения блеска Миры Кита за 60 лет по данным Американской ассоциации наблюдателей переменных звезд. Указана визуальная звездная величина, усредненная за 10 суток.

Цфеиды

- Основное свойство этих переменных звезд состоит в эмпирической зависимости период—светимость: чем ярче звезда, тем больше период переменности ее блеска (1912 г., обнаружена амер. астрономом Генриеттой Левитт по наблюдениям 25 цфеид в Малом Магеллановом Облаке).

- Современная зависимость (Бердников и др., 1996) имеет вид:

$$\left\langle \lg \frac{L_V}{L_\odot} \right\rangle = 1.15 \lg \left(\frac{T}{\text{сут}} \right) + 2.34 \quad (1)$$

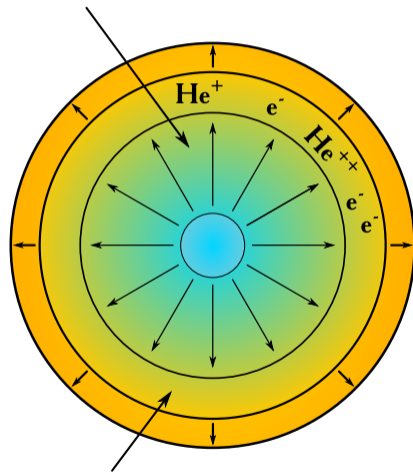
где L_V – средняя (за период) светимость в видимой области спектра, T – период пульсаций.

- Эта зависимость достаточно универсальна и по измерениям периода позволяет определять светимость цфеиды, а тогда из наблюдаемого потока излучения (видимой зв. величины) можно определить расстояние до нее.
- Цфеиды — яркие звезды-гиганты и могут наблюдаться в близких галактиках до расстояний ≈ 15 Мпк.

Кappa-механизм

- В звезде есть слой ионизованного гелия толщиной порядка 1-2% радиуса.
- He III (дважды ионизованный гелий) менее прозрачен, чем He II (однократно ионизованный гелий).
- С ростом температуры доля He III растёт и "запирает" энергию, идущую из ядра.
- В самой тусклой части цикла Цфеиды ионизированный газ во внешних слоях звезды непрозрачен, поэтому он нагревается излучением звезды и из-за повышения температуры начинает расширяться.
- По мере расширения он охлаждается и становится менее ионизированным и, следовательно, более прозрачным, что позволяет излучению выходить наружу.
- Затем расширение останавливается, и под действием гравитационного притяжения звезды происходит обратное движение.

Поток излучения от ядра



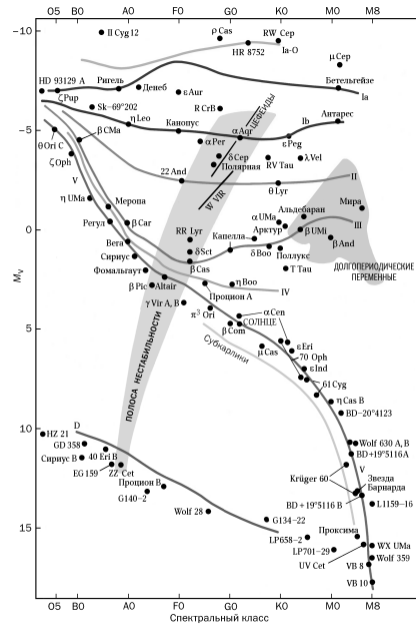
Слой ионизованного гелия

Цефеиды

- Эти пульсации в наблюдениях проявляются как переменности блеска цефеид.
- Движение вещества происходит только вдоль радиуса звезды, а ее форма не изменяется, оставаясь приблизительно шаровой.
- Пульсируют только атмосферы: глубоко в недра звезды пульсации не проникают.
- При сжатии атмосфера звезды разогревается, а при расширении — охлаждается.
- Светимость цефеиды оказывается наиболее высокой, когда температура поверхности близка к максимуму и звезда начала расширяться после того, как сжалась до минимального размера.

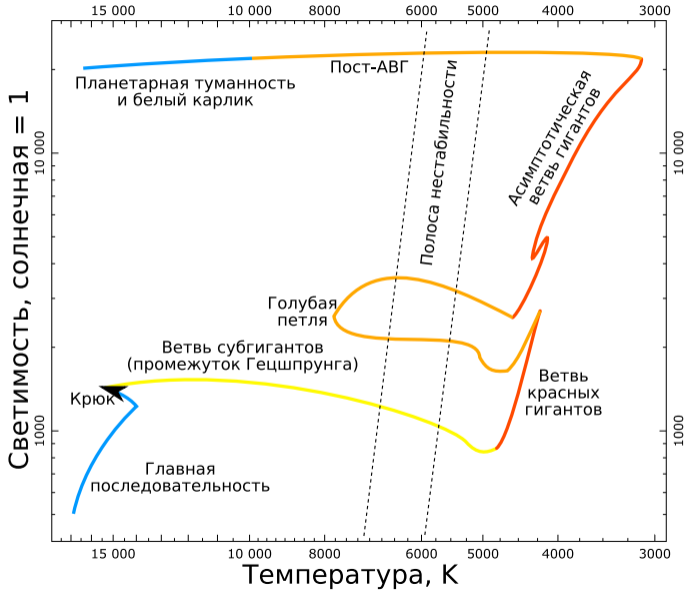
Цефеиды

- Распределение температуры внутри звезды зависит от её массы.
- Чем массивнее звезда, тем ближе к поверхности достигается необходимая для реализации описываемого процесса температура, составляющая 35000–55000 Кельвин.
- Колебания могут продолжаться только в том случае, если их период совпадает с собственным периодом колебаний звезды.
- При увеличении массы уменьшается плотность звезды и увеличивается период колебаний и светимость, чем и вызвана наблюдаемая зависимость период – светимость.
- Эта зависимость позволяет использовать цефеиды в качестве стандартных свечей для определения расстояний.



Цефеиды

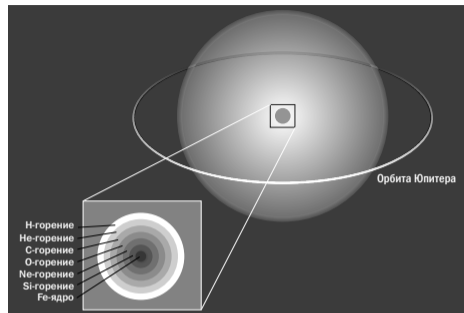
Эволюция звезды массой 5 солнечных



Звёзды массой $> 8M_{\odot}$

Гиганты

- У звёзд большой массы вырождение электронного газа не препятствует нагреву внутренних слоёв до температуры порядка $\sim 10^9$ К.
- При таких условиях углерод и кислород начинают вступать в разные ядерные реакции с образованием более тяжёлых элементов.
- Эволюция звезды состоит в последовательном "выгорании" всё более тяжёлых элементов, сжатию ядра и образованию на его внешней границ новых слоевых источников.
- Звезда становится луковицей.

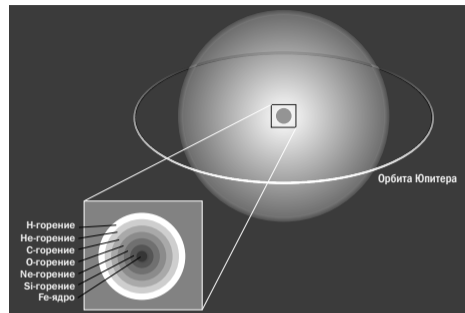


Продолжительность этапов эволюции звезды с массой $25 M_{\odot}$.

Стадия	Длительность	Стадия	Длительность
Горение водорода	7 000 000 лет	Коллапс ядра	Около 0,1 секунд
Горение гелия	500 000 лет	Отскок ядра	Несколько миллисекунд
Горение углерода	600 лет	Взрывное горение	Около 10 секунд
Горение кислорода	6 месяцев	Разлет оболочки	Около 1 часа
Горение кремния	1 день		

Гиганты

- После начала ядерных реакций с участием углерода и кислорода основную часть выделяющейся энергии уносят не фотоны, а нейтрино и антинейтрино.
- При температуре 10^9 К протекает множество процессов, приводящих к рождению нейтрино.
- Например, ядро кремния ${}_{14}^{28}\text{Si}$ может захватить свободный электрон, испустить нейтрино и превратиться в ядро алюминия ${}_{13}^{28}\text{Al}$, которое неустойчиво и вскоре превращается в исходное ядро ${}_{14}^{28}\text{Si}$, порождая при этом электрон и антинейтрино.
- В результате ни кремний, ни электрон не исчезли, но появились нейтрино и антинейтрино, на рождение которых ушла часть кинетической энергии свободного электрона, т. е. тепловой энергии газа.



Продолжительность этапов эволюции звезды с массой $25 M_{\odot}$.

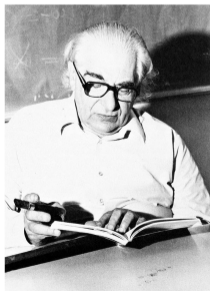
Стадия	Длительность	Стадия	Длительность
Горение водорода	7 000 000 лет	Коллапс ядра	Около 0,1 секунд
Горение гелия	500 000 лет	Отскок ядра	Несколько миллисекунд
Горение углерода	600 лет	Взрывное горение	Около 10 секунд
Горение кислорода	6 месяцев	Разлет оболочки	Около 1 часа
Горение кремния	1 день		

Урка-процесс

- Урка-процесс – процесс нейтринного охлаждения звёздных недр.
- Впервые об этом процессе заговорили Георгий Гамов (1904-1968) и Марио Шенберг (1914-1990), когда они посетили казино «Огса» в Рио-де-Жанейро и обнаружили, что при игре в рулетку деньги исчезают так же быстро, как энергия с потоком нейтрино уносится из звездного ядра.
- Кроме того, Гамов, несомненно, знал, что в России «урками» называют мелких воришек, так что это название с подтекстом.



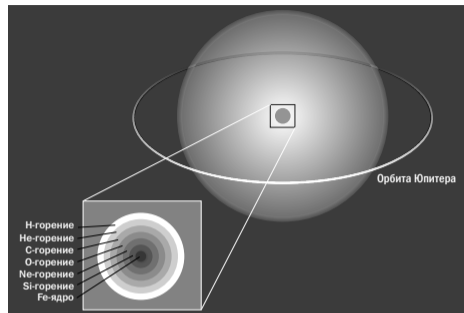
Георгий Антонович Гамов



Марио Шёнберг

Гиганты

- На поздних стадиях эволюции нейтрино весьма эффективно «крадут» у звезды тепловую энергию, вынуждая ее ядерный реактор работать на полную мощность, чтобы не дать веществу остыть.
- Переход к новому виду ядерного топлива требует увеличения температуры газа, что, в свою очередь, приводит к возрастанию интенсивности нейтринного излучения.
- Из-за этого выгорание каждого нового вида ядерного топлива происходит все быстрее и быстрее: для превращения углерода и кислорода в элементы группы кремния требуется несколько сотен лет, а последующее их превращение в железо происходит за несколько десятков лет.

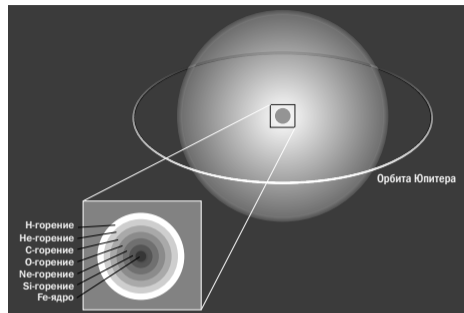


Продолжительность этапов эволюции звезды с массой $25 M_{\odot}$.

Стадия	Длительность	Стадия	Длительность
Горение водорода	7 000 000 лет	Коллапс ядра	Около 0,1 секунд
Горение гелия	500 000 лет	Отскок ядра	Несколько миллисекунд
Горение углерода	600 лет	Взрывное горение	Около 10 секунд
Горение кислорода	6 месяцев	Разлет оболочки	Около 1 часа
Горение кремния	1 день		

Гиганты

- Чем горячее газ, тем выше средняя энергия рождающихся в нем фотонов.
- Когда температура поднимается до миллиарда кельвинов и начинается горение кремния, в заметном количестве появляются γ -кванты, энергия которых настолько велика, что при столкновении с ядрами они разбивают их на несколько ядер-осколков (фотодиссоциация).
- Осколки тут же вступают в реакции синтеза.
- На фотодиссоциацию ядер расходуется энергия фотона, которая при его рождении была изъята из тепловой энергии газа.
- До некоторого момента выделяемая при ядерных реакциях энергия превосходит затраты энергии на разрушение ядер, но лишь до тех пор, пока у звезды не сформируется железно-никелиевое ядро.

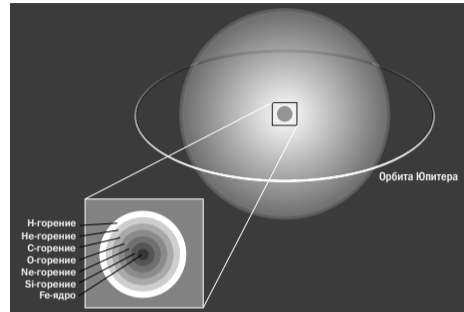


Продолжительность этапов эволюции звезды с массой $25 M_{\odot}$.

Стадия	Длительность	Стадия	Длительность
Горение водорода	7 000 000 лет	Коллапс ядра	Около 0,1 секунд
Горение гелия	500 000 лет	Отскок ядра	Несколько миллисекунд
Горение углерода	600 лет	Взрывное горение	Около 10 секунд
Горение кислорода	6 месяцев	Разлет оболочки	Около 1 часа
Горение кремния	1 день		

Гиганты

- Синтез элементов тяжелее ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ сопровождается уже не выделением, а поглощением энергии, поэтому на фотодиссоциацию начинает расходоваться тепловая энергия, выделяемая при сжатии внутренних областей звезды.
- Из-за этого температура, а вместе с ней и давление газа нарастают слишком медленно, чтобы компенсировать растущую при сжатии силу тяготения.
- В результате нарушается гидростатическое равновесие, и ядро звезды начинает стремительно сжиматься – коллапсировать.
- При сжатии газ нагревается до $10^{10} - 10^{11}$ К, и это приводит к мощному всплеску нейтринного излучения.

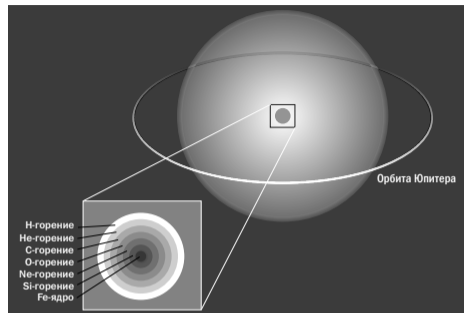


Продолжительность этапов эволюции звезды с массой $25 M_{\odot}$.

Стадия	Длительность	Стадия	Длительность
Горение водорода	7 000 000 лет	Коллапс ядра	Около 0,1 секунд
Горение гелия	500 000 лет	Отскок ядра	Несколько миллисекунд
Горение углерода	600 лет	Взрывное горение	Около 10 секунд
Горение кислорода	6 месяцев	Разлет оболочки	Около 1 часа
Горение кремния	1 день		

Гиганты

- У звезд, имевших на главной последовательности массу менее примерно $40M_{\odot}$, коллапсирующее ядро превращается в **нейтронную звезду** – объект с массой $1.5 - 3M_{\odot}$, радиусом около 10 км и средней плотностью в сотни миллионов тонн в кубическом сантиметре.
- При такой плотности вещество в основном состоит из нейтронов; именно давление вырожденного нейтронного газа уравнивает гигантскую силу тяготения, сжимающую эти компактные тела.
- Если масса ядра оказывается больше $3M_{\odot}$, то происходит формирование **чёрной дыры**.



Продолжительность этапов эволюции звезды с массой $25 M_{\odot}$.

Стадия	Длительность	Стадия	Длительность
Горение водорода	7 000 000 лет	Коллапс ядра	Около 0,1 секунд
Горение гелия	500 000 лет	Отскок ядра	Несколько миллисекунд
Горение углерода	600 лет	Взрывное горение	Около 10 секунд
Горение кислорода	6 месяцев	Разлет оболочки	Около 1 часа
Горение кремния	1 день		

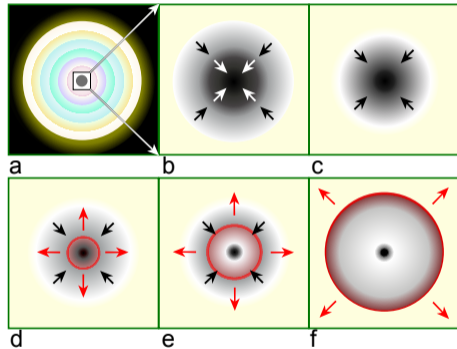
Сверхновые

Сверхновые

- Вспышка сверхновой – один из самых мощных катастрофических природных процессов. В астрономии вспышки сверхновых наблюдаются как внезапное увеличение блеска звезды на 9 – 10 порядков, т. е. одна звезда в максимуме светит почти так же, как совокупность звезд всей галактики, и поэтому сверхновые в настоящее время регистрируются из очень далеких галактик вплоть до красных смещений ~ 1 , т. е. с расстояний порядка тысячи Мпк.
- По своим спектральным свойствам сверхновые делятся на два основных типа: I – в спектрах которых отсутствуют линии водорода, и II – в спектрах которых линии водорода наблюдаются. Кроме того, сверхновые этих типов имеют разные кривые блеска $L(t)$.

Сверхновые II типа

- С физической точки зрения, феномен сверхновой II типа и типа Ib/c означает очень быстрое (почти мгновенное) энерговыделение порядка $E_0 = 10^{51}$ эрг внутри звезды с радиусом $R_0 \sim 10^{14}$ см.
- Эта энергия в конечном счете переходит в кинетическую и тепловую энергию расширяющейся оболочки.
- Увеличение блеска связано с нагревом расширяющихся внешних слоев звезды ударной волной, возникновение которой связывают с отскоком свободно падающих внутренних слоев от сколлапсировавшего плотного ядра массивной звезды.

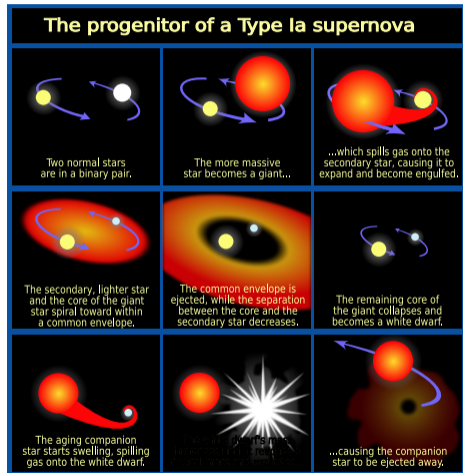


Сверхновые типа Ia

- В спектрах сверхновых Ia нет линий водорода.
- Кривые блеска носят универсальный характер, что свидетельствует об одинаковых свойствах предсверхновых этого типа.
- Наиболее реалистичной представляется модель термоядерного взрыва белого карлика с массой около M_{Ch} , поэтому такие сверхновые также называют «термоядерным».
- $M_{Ch} = 5.83M_{\odot}Y_e^2$ – предел Чандрасекара (верхний предел массы холодного невращающегося белого карлика, определяемый условием равенства сил давления вырожденного электронного газа и гравитации), где Y_e — число электронов, приходящееся на один нуклон, и для элементов тяжелее гелия $Y_e \leq 0.5$

Сверхновые типа Ia

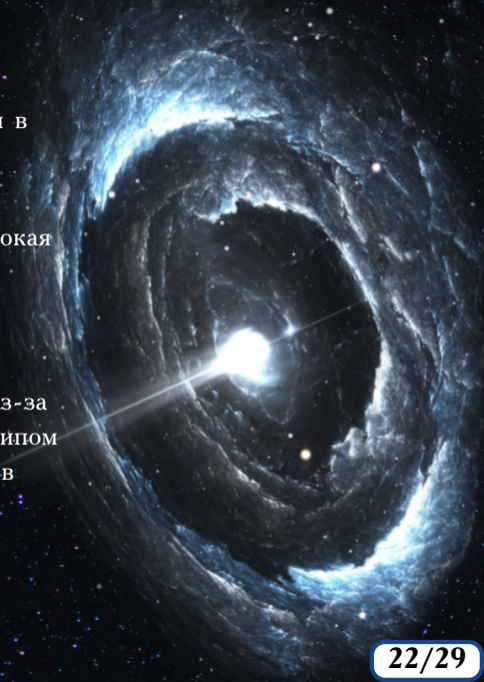
- Причины потери гидростатической устойчивости белого карлика по мере приближения его массы к верхнему пределу это нейтронизация вещества в центре и эффекты ОТО.
- Однако эта неустойчивость приводит не к коллапсу, а к термоядерному взрыву звезды.
- Энергия, выделяемая при термоядерном взрыве белого карлика с массой около M_{Ch} составляет около $2 \cdot 10^{52}$ эрг.
- В этом случае масса оболочки должна быть порядка $1M_{\odot}$, а скорость расширения $v \sim 10^4$ км/с.



Нейтронные звёзды

Нейтронные звёзды

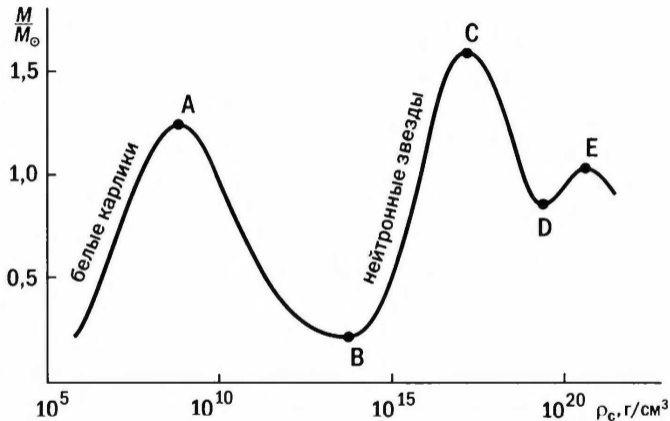
- В большинстве случаев нейтронные звезды образуются в результате коллапса ядер массивных звезд с массой на главной последовательности больше $8 - 10M_{\odot}$.
- Специфическое свойство нейтронных звезд – сверхвысокая плотность, порядка ядерной ($\rho_0 \approx 2.8 \cdot 10^{14}$ г/см³)
- В нейтронной звезде нуклоны удерживаются вместе гравитационными силами.
- Внутри НЗ вырожденные нейтроны не распадаются: из-за высокой плотности β -распад нейтрона запрещен принципом Паули, так как образующемуся электрону нет «места» в фазовом пространстве из-за сильного вырождения электронного газа.
- Масса нейтронной звезды не превышает $3M_{\odot}$, а минимальная составляет $\sim 0.1M_{\odot}$.



Нейтронные звёзды

- Первая статья с упоминанием возможности сверхплотного состояния материи была опубликована Л. Д. Ландау в 1932 г. вскоре после открытия нейтрона.
- На возможность образования сверхплотных нейтронных звезд при коллапсе ядер массивных звезд, сопровождающихся вспышками сверхновых, указывали астрономы В. Бааде (W. Baade) и Ф. Цвикки (F. Zwicky) в 1934 г.
- Теоретическая заметка Л. Д. Ландау о нейтронных звездах была опубликована в 1938 г.
- Одиночные нейтронные звезды были открыты как радиопульсары только в 1967 г. Э. Хьюишем (A. Hewish) и Дж. Беллом (J. Bell).
- Их продолжают открывать в радио и гамма-диапазоне, и на конец 2010 г. их число превысило 2000.
- Общее число нейтронных звезд в Галактике оценивается в $10^8 \div 10^9$, из них радиопульсаров (молодых нейтронных звезд) – порядка 10^5 .
- Нейтронные звезды, входящие в состав тесных двойных систем, были открыты как компактные рентгеновские источники первым специализированным рентгеновским спутником «Ухуру» в 1972 г.

Нейтронные звёзды



- Зависимость «масса—центральная плотность» для звезд, лишенных ядерного источника энергии.
- Точка А соответствует максимальной массе белых карликов (предел Чандрасекара).
- Участки до точки А и от В до С соответствуют двум устойчивым решениям: белым карликам и нейтронным звездам; для них центральная плотность растет с ростом массы.

Нейтронные звёзды

- Радиусы НЗ, выводимые из современных наблюдений, лежат в пределах от 10 до 15 км.
- Из наблюдений следует, что НЗ обладают сверхсильным магнитным полем.
- Из-за вмороженности магнитного поля в космическую плазму, при сжатии вещества сохраняется поток магнитного поля через выделенный контур:
 $\Phi \sim BR^2 = const.$
- Так, при сжатии звезды типа Солнца, со средней напряженностью магнитного поля на поверхности $B_0 \sim 1$ Гс, до размеров НЗ 10 км, получаем
 $B_{ns} = B_0(R_\odot/10 \text{ км})^2 \sim 5 \cdot 10^{11}$ Гс.
- Такие огромные и даже более высокие значения действительно подтверждаются анализом наблюдаемых свойств радиопульсаров и рентгеновских пульсаров.

Нейтронные звёзды. Структура

В отличие от масс, которые в двойных пульсарах измеряются по релятивистским эффектам с рекордной точностью в доли процентов, внутреннее строение НЗ (особенно ее центральных частей) известно с большой степенью неопределенности из-за отсутствия лабораторных данных о свойствах вещества в сверхплотном состоянии.

В зависимости от состояния вещества по модельным расчетам внутри НЗ выделяют четыре основных зоны.

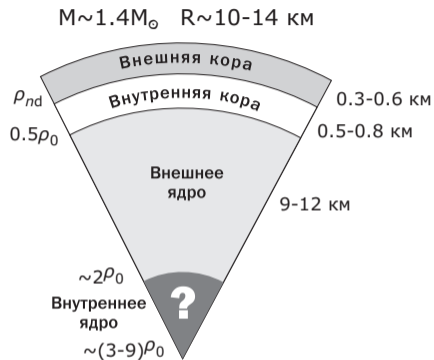


Схема внутреннего строения НЗ.

Обозначения:

$\rho_0 = 2.8 \cdot 10^{14}$ г/см³ – ядерная плотность,

$\rho_{nd} = 4 \cdot 10^{11}$ г/см³ – плотность

образования нейтронных капель.

Нейтронные звёзды. Структура

1) Внешняя кора

- $\Delta R = 300 \div 600$ м, $\rho < \rho_{nd} \approx 4 \cdot 10^{11}$ г/см³
- Величина ρ_{nd} соответствует плотности, при которой газ свободных нейтронов начинает приобретать свойства жидкости.
- Внешняя кора состоит из сильно вырожденных электронов (представляющих почти идеальный Ферми-газ) и ядер (ионов).
- Уравнение состояния во внешней коре известно достаточно хорошо.

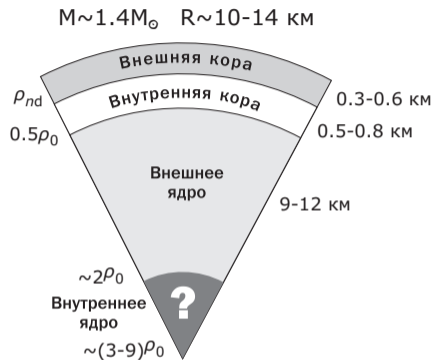


Схема внутреннего строения НЗ.

Обозначения:

$\rho_0 = 2.8 \cdot 10^{14}$ г/см³ – ядерная плотность,

$\rho_{nd} = 4 \cdot 10^{11}$ г/см³ – плотность

образования нейтронных капель.

Нейтронные звёзды. Структура

2) Внутренняя кора

- $\Delta R = 500 \div 800$ м, $\rho_{nd} < \rho < 0.5\rho_0$, где ρ_0 – ядерная плотность.
- Верхняя граница соответствует плотностям, при которых отдельные атомные ядра уже не могут существовать.
- Электроны находятся в состоянии ультрарелятивистского вырожденного газа, а ядра обогащены нейтронами и занимают значительный объем.
- Свободные нейтроны образуют сильно вырожденную Ферми-жидкость, которая может быть сверхтекучей.
- Вблизи границы с внешним ядром в слое в несколько сотен метров атомные ядра становятся слабо связанными.
- Детали структуры внутренней коры плохо известны.

$M \sim 1.4M_{\odot}$ $R \sim 10-14$ км



Схема внутреннего строения НЗ.

Обозначения:

$\rho_0 = 2.8 \cdot 10^{14}$ г/см³ – ядерная плотность,

$\rho_{nd} = 4 \cdot 10^{11}$ г/см³ – плотность

образования нейтронных капель.

Нейтронные звёзды. Структура

3) Внешнее ядро

- $0.5\rho_0 < \rho \lesssim 2\rho_0$.
- Вещество во внешнем ядре представляет собой однородную материю из сильно вырожденных нейтронов, протонов, электронов и возможно мюонов.
- Электроны и мюоны образуют почти идеальные ферми-газы, а нуклоны – сильно неидеальные ферми-жидкости, которые могут быть сверхтекучими и сверхпроводящими.
- Уравнение состояния известно сравнительно неплохо, но точность резко уменьшается с ростом плотности.

$M \sim 1.4M_{\odot}$ $R \sim 10-14$ км



Схема внутреннего строения НЗ.

Обозначения:

$\rho_0 = 2.8 \cdot 10^{14}$ г/см³ – ядерная плотность,

$\rho_{nd} = 4 \cdot 10^{11}$ г/см³ – плотность образования нейтронных капель.

Нейтронные звёзды. Структура

4) Внутреннее ядро

- $2\rho_0 < \rho \lesssim 20\rho_0$.
- Состав точно не известен из-за плохого знания физики сильных взаимодействий и эффектов взаимного влияния частиц в сверхплотном веществе.
- Возможный состав – нуклонно-гиперонное вещество, или более экзотические возможности (пионный конденсат, кварковое вещество).
- Уравнение состояния во внутреннем ядре является фундаментальной физической проблемой.

гипероны – семейство элементарных частиц, барионы, содержащие минимум один s-кварк, но не содержащие более тяжёлых кварков (с и b)

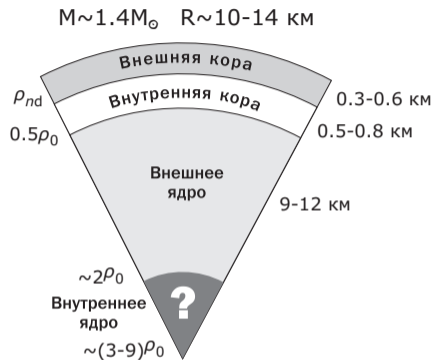


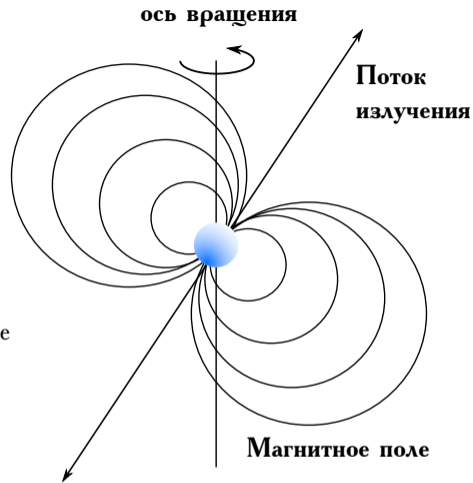
Схема внутреннего строения НЗ.

Обозначения:

$\rho_0 = 2.8 \cdot 10^{14}$ г/см³ – ядерная плотность,
 $\rho_{nd} = 4 \cdot 10^{11}$ г/см³ – плотность образования нейтронных капель.

Радиопульсары

- Известно, что пульсары излучают за счет энергии своего вращения. Период их вращения постоянно увеличивается, вращение затухает, а его энергия уходит в виде электромагнитных волн и потоков релятивистских частиц.
- Торможение вращения происходит за счет магнитного поля.
- Чем сильнее поле и чем быстрее вращение, тем эффективнее тор мозится пульсар.
- Все это удалось установить еще в конце 1960-х – начале 1970-х гг.
- Сам механизм излучения пульсаров неизвестен до сих пор.
- Как энергия вращения (точнее, ее малая часть) переходит в импульсы ЭМ излучения – не ясно.



Нейтронная звезда с магнитосферой. Схематично показаны силовые линии магнитного поля нейтронной звезды, ось магнитного диполя которой наклонена к оси вращения.

Рентгеновские барстеры

- Многие НЗ входят в состав двойных систем. В тесных двойных системах с нейтронными звездами возможны уникальные явления.
- Если магнитное поле НЗ не очень большое ($< 10^{10}$ Гс), то при перетекании вещества на НЗ оно накапливается на её поверхности (заметим, что оно находится в вырожденном состоянии), и при превышении некоторого критического значения плотности и температуры на поверхности НЗ происходит термоядерный взрыв.
- При этом продукты вспышки образуют расширяющуюся атмосферу, которая не отделяется от звезды в виде оболочки, а вновь сжимается.
- Эти взрывы наблюдаются в виде регулярных **рентгеновских барстеров** (или вспыхивающих рентгеновских источников).

Рентгеновские пульсары

- При наличии очень сильного магнитного поля нейтронной звезды ($10^{12} \div 10^{14}$ Гс) в тесной двойной системе возможен такой тип аккреции на НЗ, при котором газ нормальной звезды, замороженный в поле, падает вдоль линий индукции в область магнитных полюсов НЗ.
- Избыток момента импульса передается звезде через магнитное поле.
- Скорости падения на поверхность НЗ порядка сотен тысяч км/с, и на небольшие области поверхности НЗ (сотни квадратных метров) обрушивается колоссальный поток вещества и энергии (порядка 100 кг/с на квадратный сантиметр).
- Температура плазмы в области падения при этом может достигать $10^9 \div 10^{10}$ К.
- Выделяющаяся энергия излучается в форме жестких квантов, и на поверхности НЗ в районе магнитных полюсов образуются два горячих «рентгеновских» пятна.
- Сильное магнитное поле делает излучение этих пятен неизотропным.
- Поскольку магнитная ось в общем случае не совпадает с осью вращения, за время одного оборота НЗ вокруг оси далекий наблюдатель будет регистрировать один или два импульса рентгеновского излучения.