

Р.А. УПЕРЧУК

Звездная астрономия

Учебные материалы астрономического кружка «Лаборатория космической мысли» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева

Вместо предисловия

Презентация создавалась на основе лекций по циклу «Достань рукой до звезд», читавшихся на встречах клуба в октябре-ноябре 2017 г. Работая с ней, вы получите новые знания или освежите уже имеющиеся по данной теме. Материалы рассчитаны на самый широкий круг пользователей. Распространяется свободно с условием сохранения полной идентичности структуры и компонентов.

Вы узнаете о классификации, происхождении, строении и эволюционном развитии звезд, научитесь определять физико-химические характеристики звезды по блеску и цвету, а также для вас не будет темным лесом ориентирование на ночном небосводе. Вы изучите движение в системе кратных звезд, сможете предсказать будущее какой-либо звезды и наконец поймете, почему невозможно наблюдать звезды в настоящем времени.

Приятного прочтения!

Содержание

- Лекция 1. Звезды. Основные понятия
- Лекция 2. Классификации звезд
- Лекция 3. Образование и эволюционное развитие звезд
- Лекция 4. Строение и химический состав звезд
- Лекция 5. Звездная активность
- Лекция 6. Механика звездных систем. Звездные ассоциации
- Лекция 7. Сверхновые и гиперновые

Лекция 1. Звезды. Основные понятия

- **Звезда** — массивный газовый шар, удерживаемый в состоянии **гидростатического равновесия** силами **гравитации** и **внутренним давлением**.
- Энергия звезд выделяется в результате **термоядерных реакций**, протекающих в их внутренних областях.
- **Основные характеристики звезд**: светимость, температура, цвет, спектр, химический состав, радиус, масса, внутренняя энергия.
- **Предел Чандрасекара** — верхний предел массы, при котором звезда может существовать как белый карлик.



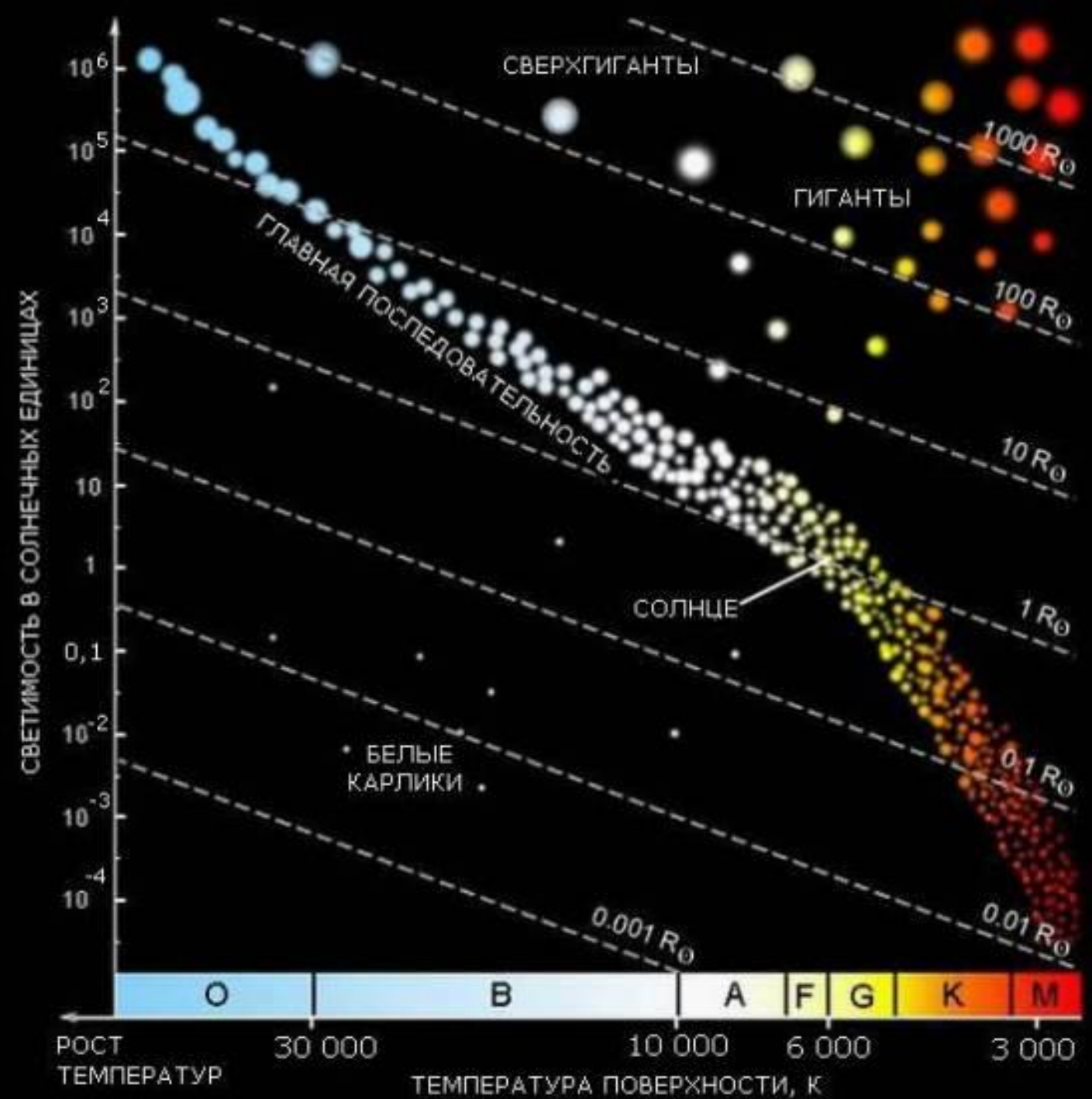
Лекция 2. Классификации звезд

- **Спектр звезды** — распределение интенсивности электромагнитного излучения, излучаемого звездой, по частотам или длинам волн.
- Различия в спектрах звёзд **обуславливаются различием физических свойств** их атмосфер, в основном, температуры и давления (определяющих степень ионизации атомов). Вид спектра зависит также от наличия магнитных и атомных электрических полей, различий в химическом составе, вращения звёзд и от других факторов.
- На этом **основана основная (гарвардская) спектральная классификация звезд**.
- Существует также более новая, **йеркская спектральная классификация**, учитывающая зависимость спектра звезды от ее светимости.
- **Диаграмма Герцшпрунга — Рассела** объединила эти две классификации.

Основная (гарвардская) спектральная классификация звёзд

Класс	Температура, К	Истинный цвет	Видимый цвет	Масса, M_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	Светимость, L_{\odot}	Линии водорода
<u>B</u>	10 000—30 000	бело-голубой	бело-голубой и белый	18	7	20 000	средние
<u>A</u>	7500—10 000	белый	белый	3,1	2,1	80	сильные
<u>O</u>	30 000—60 000	голубой	голубой	60	15	1 400 000	слабые
<u>F</u>	6000—7500	жёлто-белый	белый	1,7	1,3	6	средние
<u>G</u>	5000—6000	жёлтый	жёлтый	1,1	1,1	1,2	слабые
<u>M</u>	2000—3500	красный	оранжево- красный	0,3	0,4	0,04	очень слабые
<u>K</u>	3500—5000	оранжевый	желтовато- оранжевый	0,8	0,9	0,4	очень слабые

По диаграмме Герцшпрунга-Рассела можно определить зависимость между абсолютной звездной величиной, светимостью, спектральным классом и температурой поверхности звезды.



- Существует много типов звезд.
- **СУБКАРЛИКИ** — звезды VI класса светимости Йеркской классификации.
- **Холодные субкарлики** имеют низкую светимость из-за низкой металличности, они содержат ничтожный процент элементов тяжелее гелия.
- **Горячие субкарлики** — звезды классов В и О, поздняя стадия эволюции звезд, когда красные гиганты теряют водород из внешних слоев параллельно с протеканием гелиевых реакций.
- **КАРЛИКИ** — звезды с массой порядка 0,01-1,2 массы Солнца.
- **Желтые карлики** — тип небольших звёзд главной последовательности спектрального класса G, имеющих массу от 0,8 до 1,2 массы Солнца.
- **Оранжевые карлики** — тип небольших звёзд главной последовательности спектрального класса K, имеющих массу от 0,5 до 0,8 массы Солнца и более продолжительное время жизни.
- **Красные карлики** — маленькие и относительно холодные звезды главной последовательности, имеющие спектральный класс M. Диаметр и масса красных карликов не превышает трети солнечной (нижний предел массы — 0,0767 солнечной, за этим идут коричневые карлики).

- **Голубые карлики** — гипотетический тип звёзд, эволюционирующий из красных карликов перед выгоранием всего водорода, а после предположительно эволюционирующие в белых карликов.
- **Белые карлики** — проэволюционировавшие звёзды с массой, не превышающей предел Чандрасекара, лишённые собственных источников термоядерной энергии. Имеют спектральный класс DA.
- **Чёрные карлики** — остывшие и вследствие этого не излучающие (или слабоизлучающие) в видимом диапазоне белые карлики. Представляют собой конечную стадию эволюции белых карликов в отсутствие аккреции. Массы чёрных карликов, подобно массам белых карликов, ограничиваются сверху пределом Чандрасекара.
- **Коричневые карлики** — субзвёздные объекты (с массами в диапазоне 12,57—80,35 масс Юпитера, что соответствует 0,012—0,0767 массам Солнца), в недрах которых, в отличие от звёзд главной последовательности, не происходит реакции термоядерного синтеза с превращением водорода в гелий (цикл Бете).
- **Субкоричневые карлики** или **коричневые субкарлики** — холодные образования, по массе лежащие ниже предела коричневых карликов. Их в большей мере принято считать планетами.

- **СУБГИГАНТЫ** — бывшие звезды главной последовательности, в ядре которых иссяк водород, началось горение водорода в ядерной оболочке, но еще не началось горение гелия.
- **ГИГАНТЫ** — тип звёзд со значительно большим радиусом и высокой светимостью, чем у звёзд главной последовательности, имеющих такую же температуру поверхности.
- **Красные гиганты** — звезды, в которых произошло выгорание водорода, и основным источником энерговыделения стала тройная гелиевая вспышка.
- **Голубые гиганты** — звезды с небольшим временем существования вследствие высокой светимости.
- **Яркие гиганты** — звезды, по светимости близкие к сверхгигантам, но не относящиеся к ним по массе.
- **СВЕРХГИГАНТЫ (красные, голубые, желтые)** — звезды, которые размерами, массой и светимостью превышают гиганты.
- **ГИПЕРГИГАНТЫ (красные, голубые, желтые)** — самые мощные, самые яркие, самые тяжелые, самые редкие и самые короткоживущие сверхгиганты.

- **Отставшие звезды (красные, желтые, голубые)** — звезды, выделившиеся из обычных звезд главной последовательности вследствие аномальной звездной эволюции.
- **Оболочечные звезды** — звезды, имеющие экваториальный газовый диск.
- **Углеродные / бариевые / технециевые / ртутно-марганцевые звезды** — звезды, в спектре которых велика доля соответствующих химических элементов.
- **НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ** — звезды, имеющие нейтронную сердцевину и оболочку из электронов и атомных ядер.
- **Пульсары** — вращающиеся нейтронные звезды с наклоненным к оси вращения магнитным полем, космические источники радио- (**радиопульсар**), оптического (**оптический пульсар**), рентгеновского (**рентгеновский пульсар**) и/или гамма- (**гамма-пульсар**) излучений, приходящих на Землю в виде периодических всплесков.
- **Магнетары** — нейтронные звезды, обладающие исключительно сильным магнитным полем.
- **Переменные звезды** — звезды, яркость которых изменяется со временем в результате физических процессов.

Вопрос – ответ

- Почему изменяется блеск у переменных звезд?

Это может происходить из-за пульсаций вещества, хромосферной активности, периодических звездных затмений (если это система кратных звезд), взрывов сверхновых и различных других явлений.

- Однозначна ли вышеупомянутая звездная классификация по типам?

Нет. Могут существовать и исключения (например, оставшие звезды), к тому же, одну звезду можно отнести к разным типам (вследствие искажения полученных данных), в процессе звездной эволюции физико-химические характеристики меняются, а также звезды взаимодействуют между собой, что тоже может приводить к изменениям.

- Каждая ли мерцающая звезда является переменной?

Нет. Мерцание может происходить из-за колебаний молекул воздуха и оптического искажения в атмосфере Земли. Для уточнения наблюдение повторяют с помощью космических телескопов.

Лекция 3. Образование и эволюционное развитие звезд

Звезды образуются так же, как и планеты: в процессе аккреции газопылевого облака. Различие состоит лишь в массе исходного облака: гравитация должна быть достаточной, чтобы разогреть звездные недра до нескольких миллионов Кельвин и инициировать термоядерные реакции. В соответствии с принципом наименьшей энергии звезда принимает сферическую форму. Дальнейший жизненный цикл зависит от исходной массы звезды. На приведенных иллюстрациях вы можете ознакомиться с эволюцией звезд.



ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ

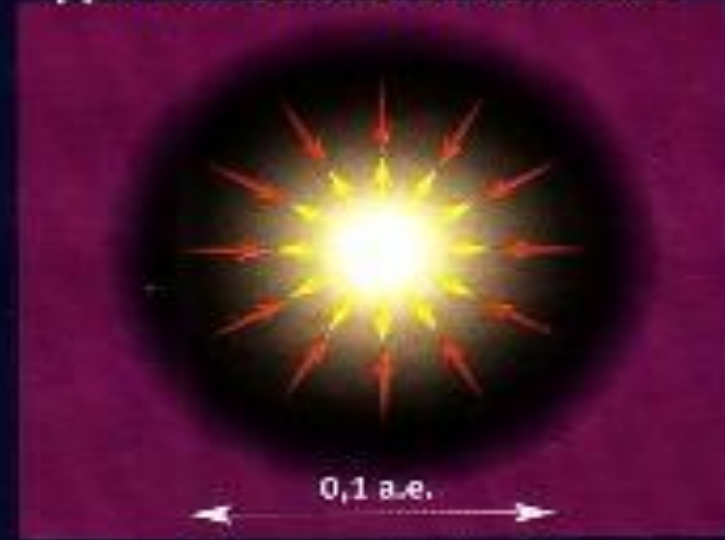
Темное межзвездное облако
Начало процесса



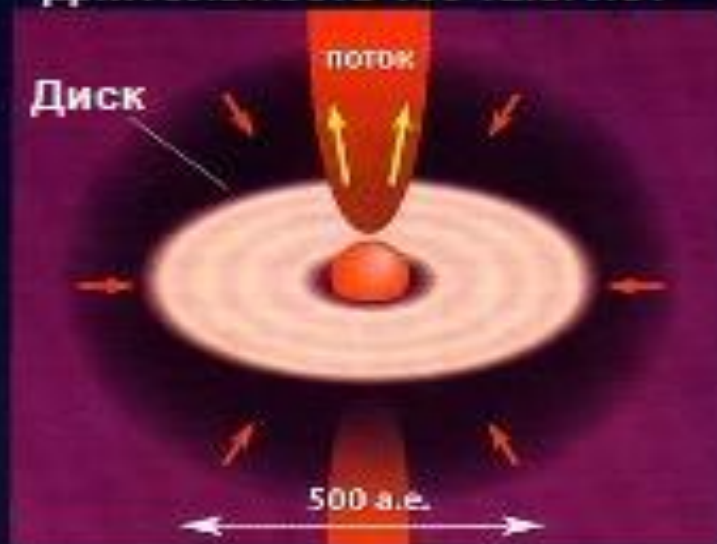
Быстрое сжатие плотного ядра
Длительность 100 тыс. лет



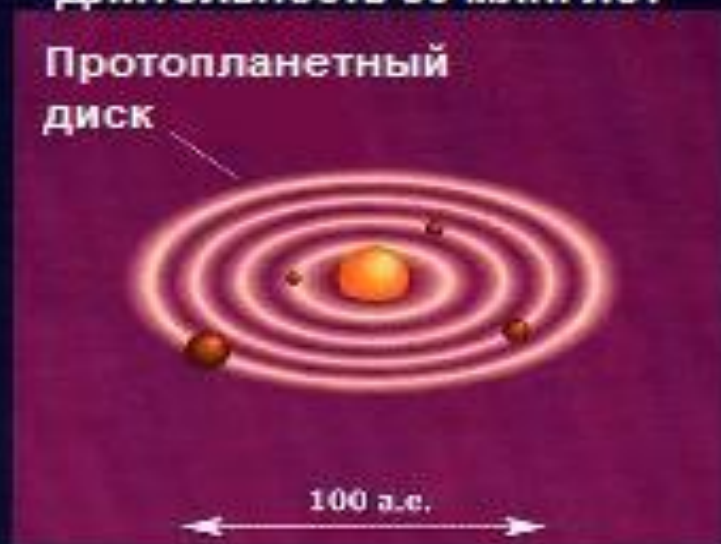
Медленное сжатие
Длительность 50 млн. лет



Протозвезда
Длительность 100 тыс. лет



Очень молодая звезда
Длительность 50 млн. лет



Молодая звезда
Конец процесса



Звезды:

“Время жизни”:

Конечные стадии эволюции:

Голубые сверхгиганты класса W с массой до $100 M_{\odot}$

Голубовато-белые звезды класса O с массой до $50 M_{\odot}$

Бело-голубые звезды класса B с массой до $10 M_{\odot}$

Белые звезды класса A с массой до $5 M_{\odot}$

Желтоватые звезды класса F с массой до $3 M_{\odot}$

Желтые звезды класса G, $M \sim 1 M_{\odot}$

Оранжевые звезды класса K, $M < 1 M_{\odot}$

Красные звезды класса с массой до $0,5 M_{\odot}$

Коричневые карлики, $M < 0,01 M_{\odot}$

10^6 лет

10^7 лет

10^8 лет

10^9 лет

10^{10} лет

10^{11} лет

10^{12} лет

Взрыв Сверхновой звезды

Волокнистая туманность

Черная дыра

Нейтронная звезда

Планетарная туманность

Белый карлик

10^{10} лет

Вспышка Новой звезды

Черный карлик

Красный сверхгигант

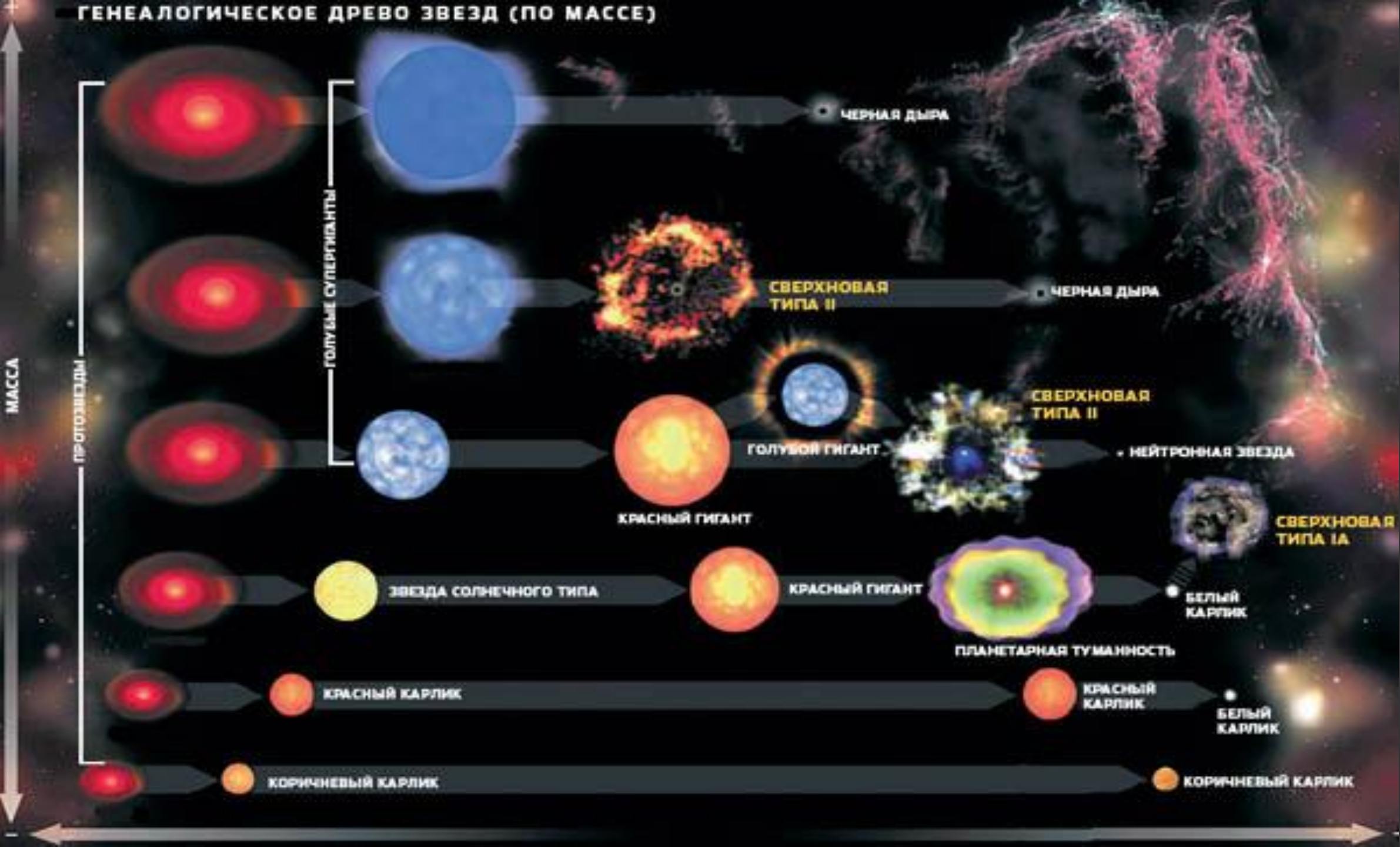
Красный гигант

Эволюция двойных звезд носит сложный характер, определяемый массой звезд и расстоянием между ними.

Один из возможных случаев: звезда с большей массой “ворует”, притягивает, в вещество соседки, при этом ее масса и температура увеличивается, возрастает интенсивность протекания ядерных реакций и звезда быстрее проходит свой путь развития



ГЕНЕАЛОГИЧЕСКОЕ ДРЕВО ЗВЕЗД (ПО МАССЕ)



Туманность

Облака пыли и газа. Туманности - место рождения звезд. Существуют различные типы туманностей.

3% Гелий
97% Водород

Всего во Вселенной около **2 000 000 000 000 000 000 000 000** звезд

Конвективная оболочка
Конвективное ядро

Красный карлик

Холодные, слабые и маленькие звезды, которые медленно горят в течении 100 000 000 000 лет.

Красный гигант

Большие, яркие звезды с холодной поверхностью, сформировавшиеся на поздних стадиях эволюции звезды. Самые большие из них называются красными сверхгигантами.

Водород + углерод
Водород + гелий
Излишек водорода

Гелий + углерод + другие элементы
50-ти километровый слой газа

Солнце - ближайшая к Земле звезда.

Белый карлик

Представляет собой компактную звезду с массой как у Солнца, но с радиусом в ~100 меньше, соответственно, светимостью в ~10 000 раз меньшей солнечной.

Черный карлик

Остывшие и вследствие этого не излучающие (или слабоизлучающие) в видимом диапазоне белые карлики.

Эволюция звезд

Звезда - светящийся газовый шар, производящий тепло и свет в результате ядерных реакций (ядерного синтеза). Жизнь звезды уникальна и длится чрезвычайно долго. Эта схема рассказывает о различных этапах жизни звезд.

Температура (10^3) к звезд

< 3.5	M
3.5 - 5	K
5 - 6	G
6 - 7.5	F
7.5 - 11	A
11 - 25	B
> 25	O

Сверхновая звезда

Смерть звезды, сопровождающаяся грандиозным взрывом, яркостью 1000000000 Солнц в течение короткого времени. Взрыв выбрасывает материал звезды со скоростью до одной десятой скорости света (30 000 км / с).

Черная дыра

Образуется из массивных звезд в конце их жизни. Гравитационное притяжение достаточно сильно, чтобы поймать все, даже свет.

Нейтронная звезда

Состоит в основном из нейтронов и возникает при взрыве сверхновой. Нейтронные звезды очень плотные.

Нейтроны
20-ти километровая кора

Специально для сайта
"Гид в мире космоса"
<http://spacegid.com/>

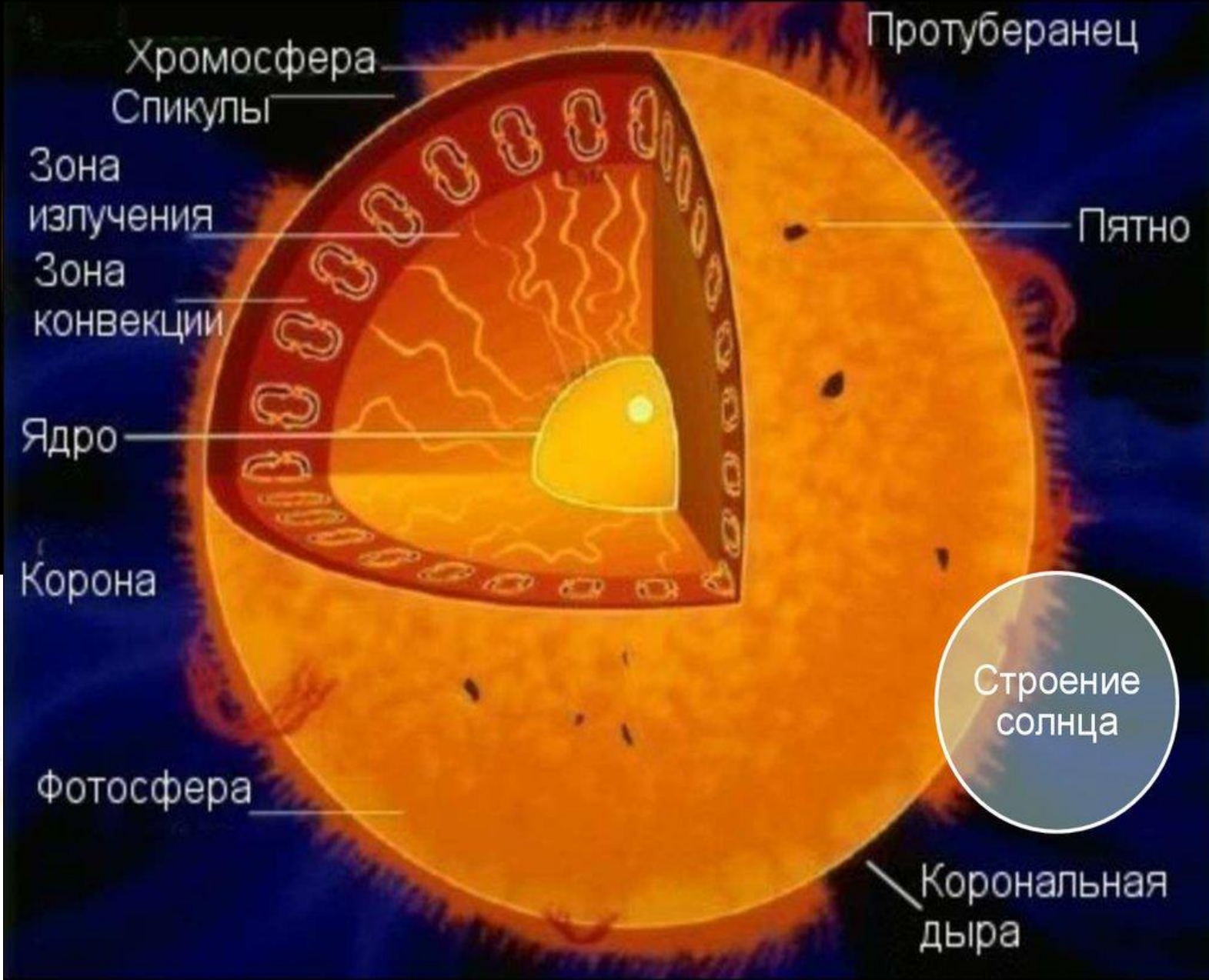
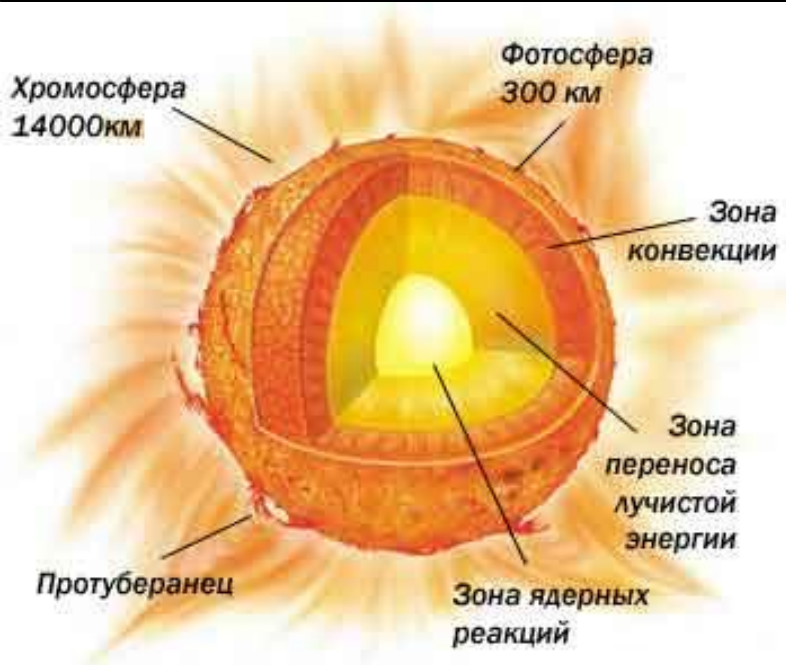
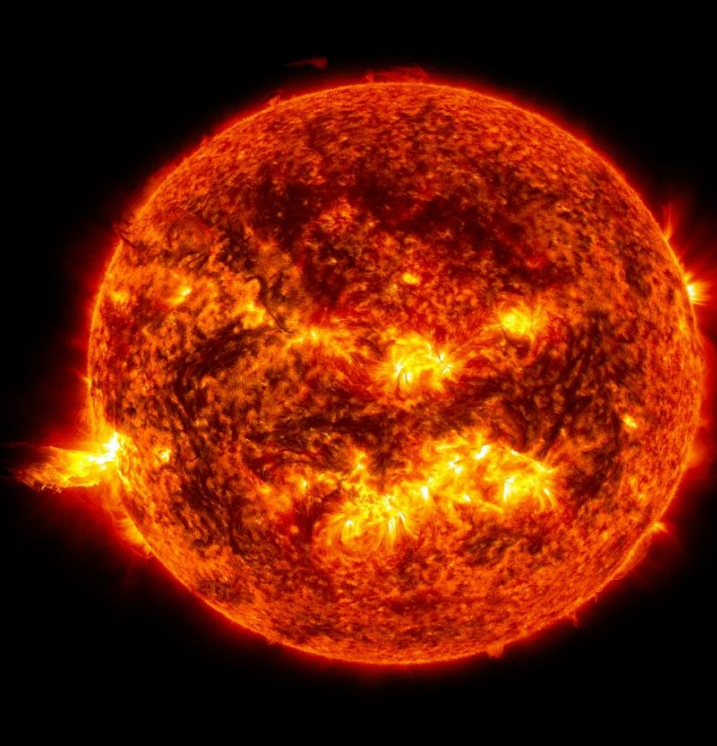
LUCY

Белый карлик состоит из углерода и весит 5000000 триллионов триллионов килограмм.

Лекция 4. Строение и химический состав звезд

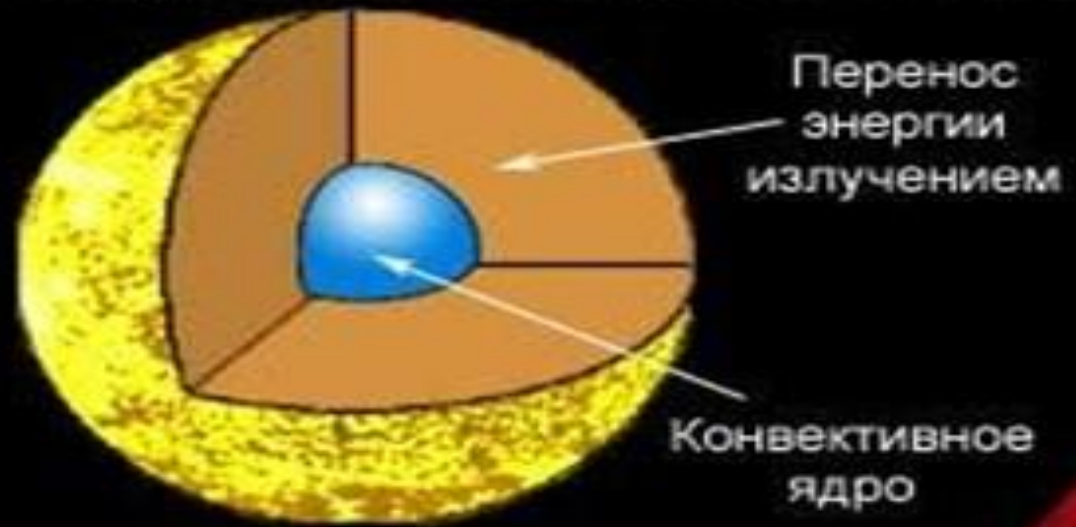
- У звезды можно выделить три основные зоны: ядро, зону конвекции, зону лучистого переноса.
- **Ядро** — центральная область звезды, в которой протекают термоядерные реакции.
- **Конвективная зона** — зона, в которой перенос энергии происходит за счёт конвекции. Для звёзд с массой менее $0,5 M_{\odot}$ она занимает всё пространство от поверхности ядра до поверхности фотосферы. Для звёзд с массой, сравнимой с солнечной, конвективная часть находится на самом верху, над лучистой зоной. А для массивных звёзд она находится внутри, под лучистой зоной.
- **Лучистая зона** — зона, в которой перенос энергии происходит за счёт излучения фотонов. Для массивных звёзд эта зона расположена между ядром и конвективной зоной, у маломассивных она отсутствует, а у звёзд больше массы Солнца находится у поверхности.
- В ходе эволюции, когда начинаются реакции с участием гелия и других элементов, у звезды появляются новые слои, и чем больше масса и размеры звезды, тем их больше.

- **Атмосфера звезды** состоит из **фотосферы, хромосферы и звездной короны**.
- **Фотосфера** — самая глубокая и холодная часть атмосферы звезды.
- **Хромосфера** — оболочка, в спектре которой доминирует красная Н-альфа линия излучения водорода.
- **Звездная корона** — внешний слой атмосферы звезды.

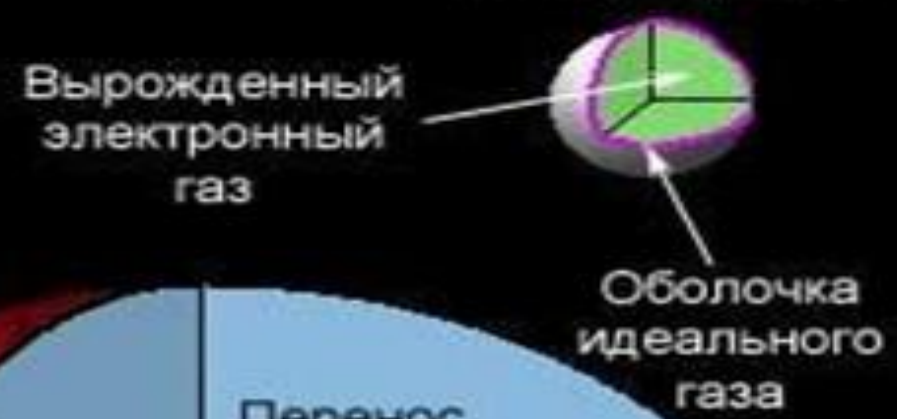


Строение солнцеподобной звезды

Звезды главной последовательности

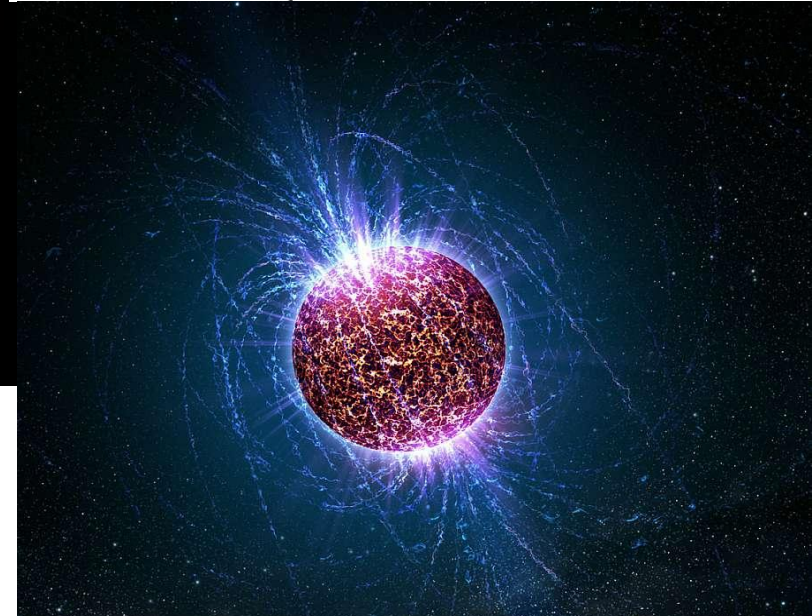
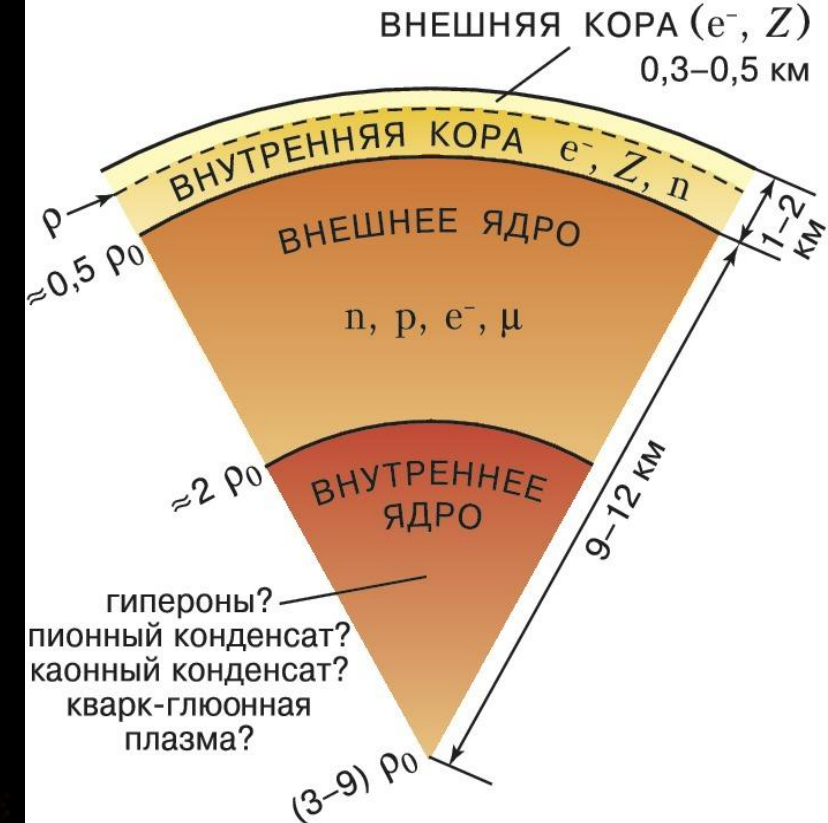


Белый карлик



Солнце





Строение нейтронной звезды

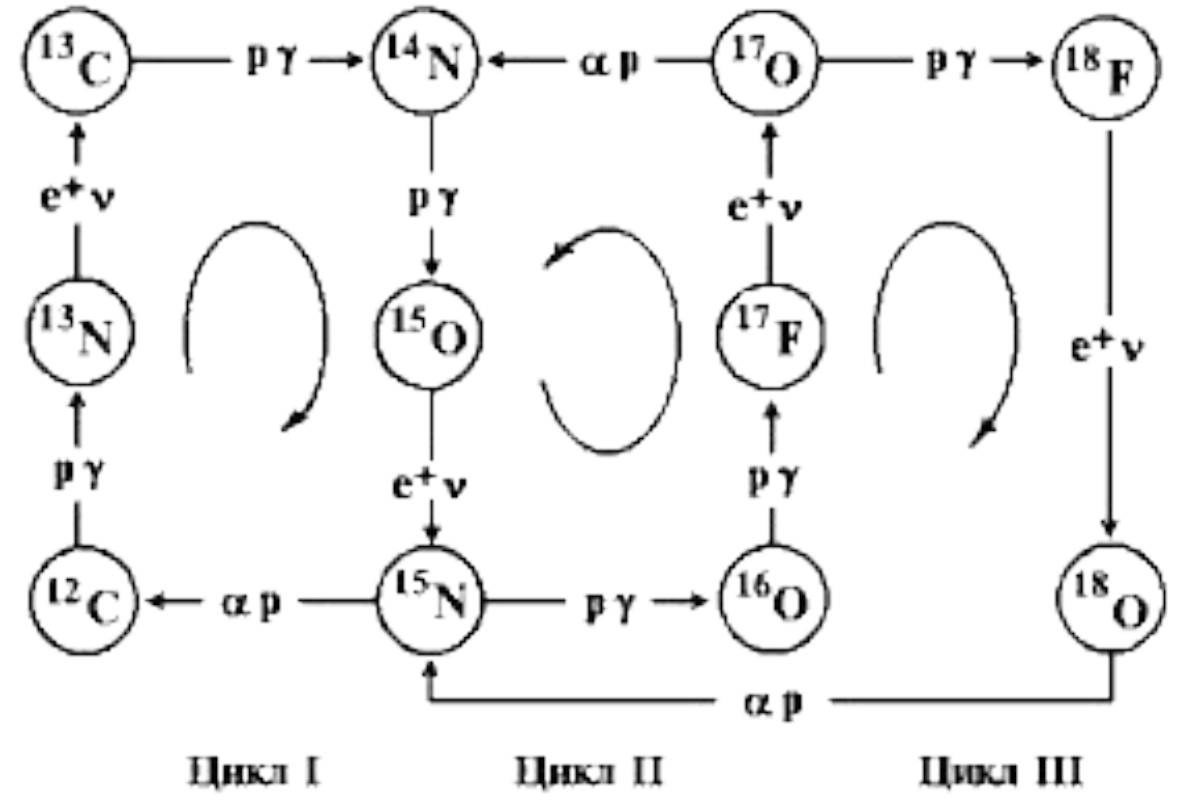
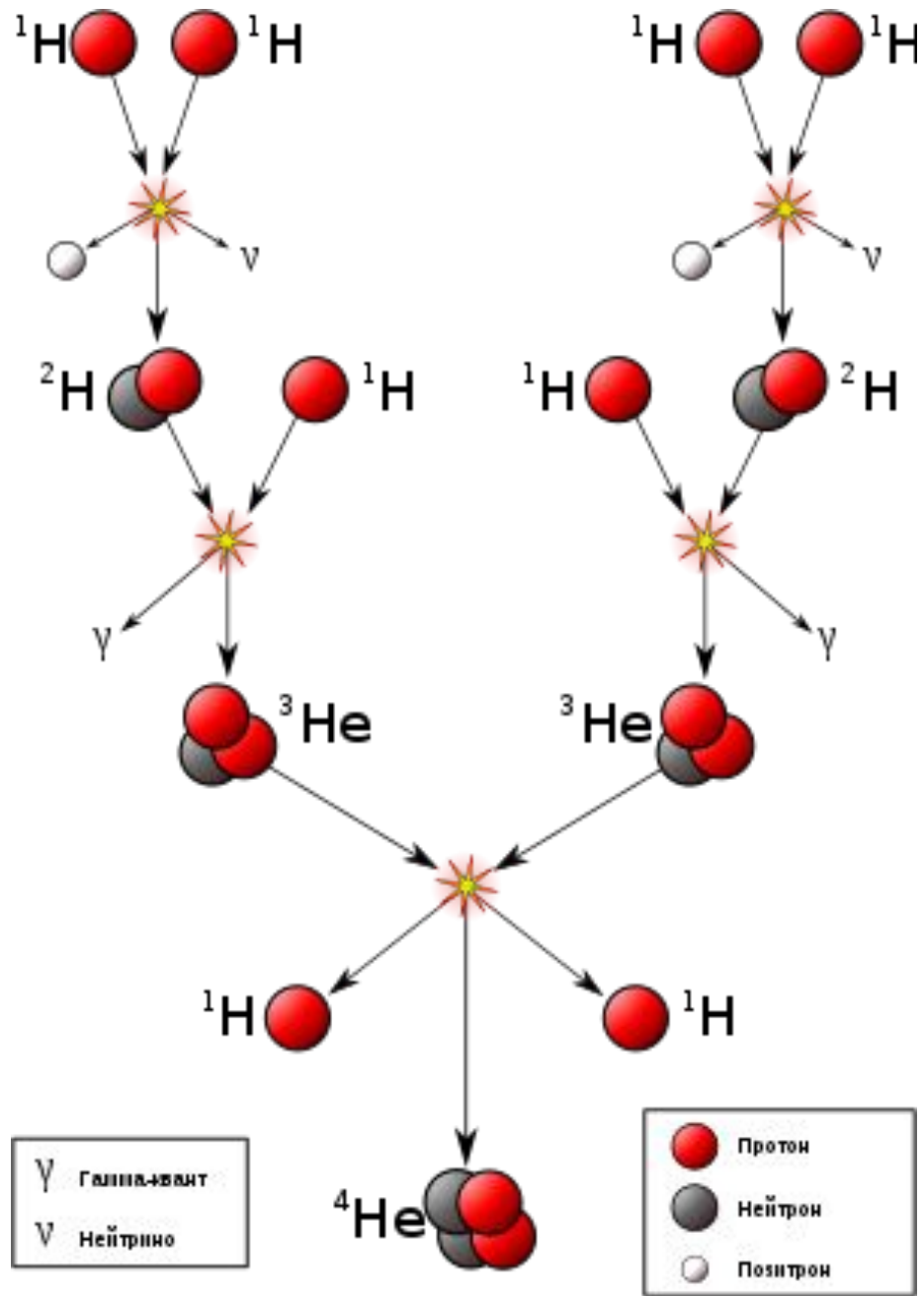
Термоядерные реакции звезд

Нуклеосинтез — процесс образования химических элементов тяжелее водорода. **Все вещество, из которого состоит Вселенная, образовалось в процессе звездного нуклеосинтеза.**

Для звёзд главной последовательности основным источником энергии являются ядерные реакции с участием водорода: **протон-протонный цикл**, характерный для звёзд с массой около солнечной, и **CNO-цикл**, идущий только в массивных звёздах и только при наличии в их составе углерода. На более поздних стадиях жизни звезды могут идти ядерные реакции и с более тяжёлыми элементами вплоть до железа.

Основные цепочки ядерных реакций в звёздах

Протон-протонный цикл	CNO-цикл
$p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e + 0,4 \text{ MeV}$	${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma + 1,95 \text{ MeV}$
${}^2\text{D} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5,49 \text{ MeV}$	${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e + 1,37 \text{ MeV}$
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p + 12,85 \text{ MeV}$	${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma + 7,54 \text{ MeV}$
	${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma + 7,29 \text{ MeV}$
	${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e + 2,76 \text{ MeV}$
	${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} + 4,96 \text{ MeV}$

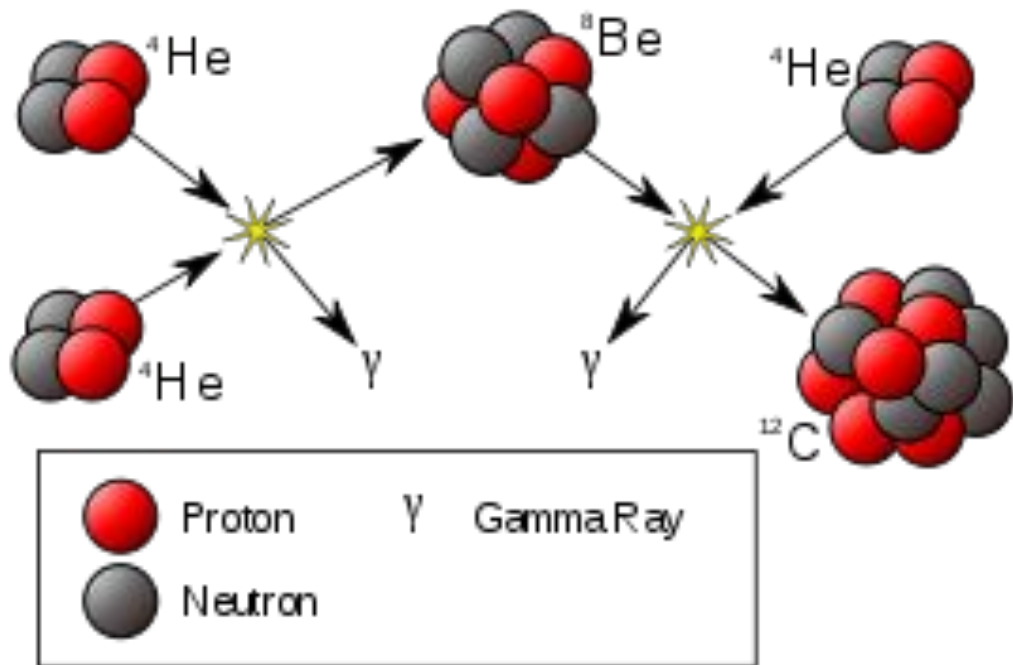


Протон-протонный цикл (слева) и CNO-цикл (вверху)

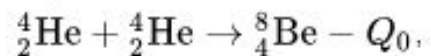
	Реакция	Энерговыделение, МэВ	$\sigma_{\text{макс}}$, барн (в области энергий ≤ 1 МэВ)	Энергия налетающей ч-цы, соответствующая $\sigma_{\text{макс}}$, МэВ
1	$p+p \rightarrow d+e^+ + \nu$	2,2	10^{-28}	—
2	$p+d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,5	10^{-6}	—
3	$p+t \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19,7	10^{-6}	—
4	$d+d \rightarrow t+p$	4,0	0,16 (при 2 МэВ)	2,0
5	$d+d \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3,3	0,09	1,0
6	$d+d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	24,0	—	—
7	$d+t \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	5,0	0,13
8	$t+d \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17,6	5,0	0,195
9	$t+t \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$	11,3	0,10	1,0
10	$d+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18,4	0,71	0,47
11	${}^3\text{He}+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	12,8	—	—
12	$n+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + t$	4,8	2,6	0,26
13	$p+{}^8\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	4,0	10^{-4}	0,3
14	$p+{}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He} + \gamma$	17,3	$6 \cdot 10^{-3}$	0,44
15	$d+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + p$	5,0	0,01	1,0
16	$d+{}^6\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He}$	22,4	0,026	0,60
17	$d+{}^7\text{Li} \rightarrow 2{}^4\text{He} + n$	15,0	10^{-3}	0,2
18	$p+{}^9\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He} + d$	0,56	0,46	0,33
19	$p+{}^9\text{Be} \rightarrow {}^6\text{Li} + {}^4\text{He}$	2,1	0,35	0,33
20	$p+{}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He}$	8,7	0,6	0,675
21	$p+{}^{15}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	5,0	0,69 (при 1,2 МэВ)	1,2

p — протон, d — дейтрон (ядро дейтерия ${}^2\text{H}$), t — тритон (ядро трития ${}^3\text{H}$), n — нейтрон, e^+ — позитрон, ν — нейтрино, γ — фотон.

- Совокупность термоядерных реакций с участием гелия, имеющая место в красных гигантах и сверхгигантах, называется **тройной гелиевой реакцией (вспышкой)**.

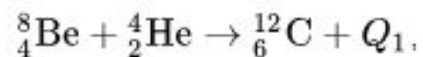


- образование нестабильного ядра бериллия-8 (период полураспада 10^{-16} с)

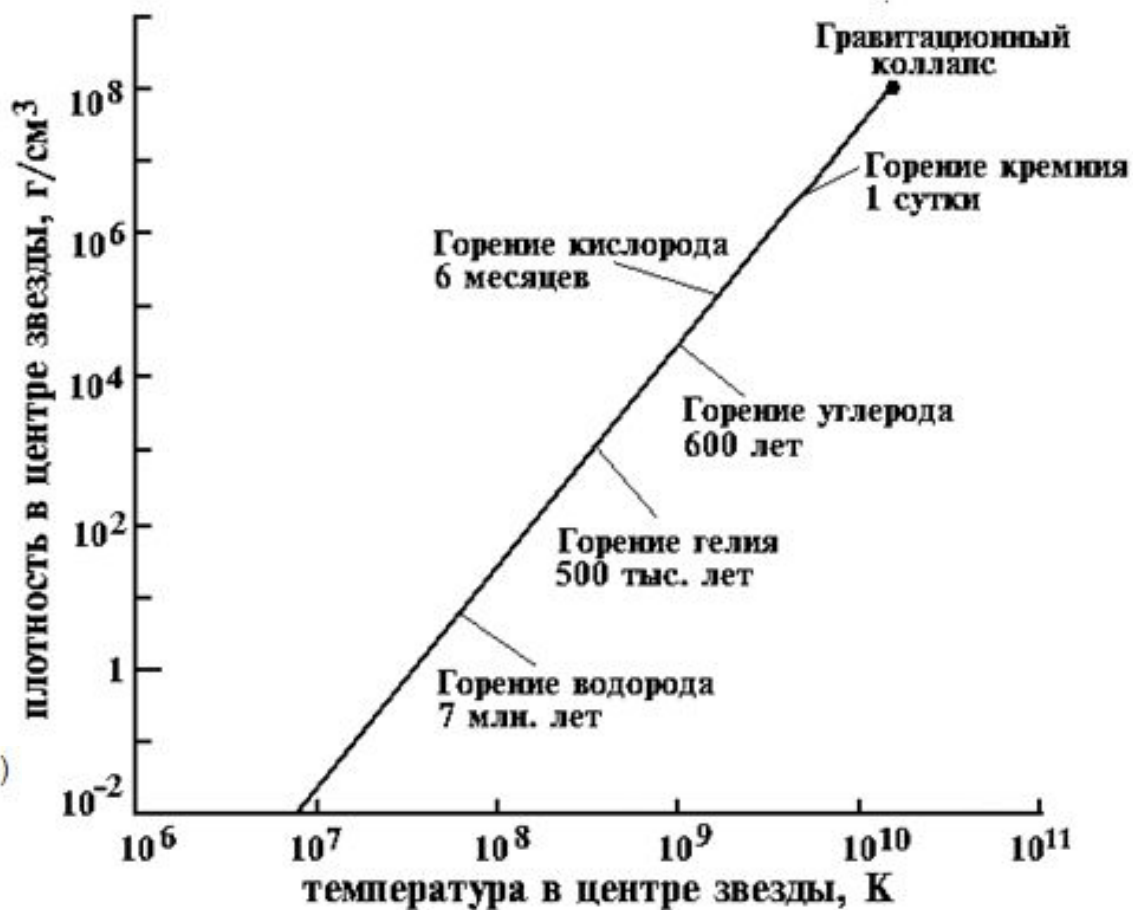


$$Q_0 = 0,092 \text{ МэВ}$$

- образование возбуждённого ядра углерода-12



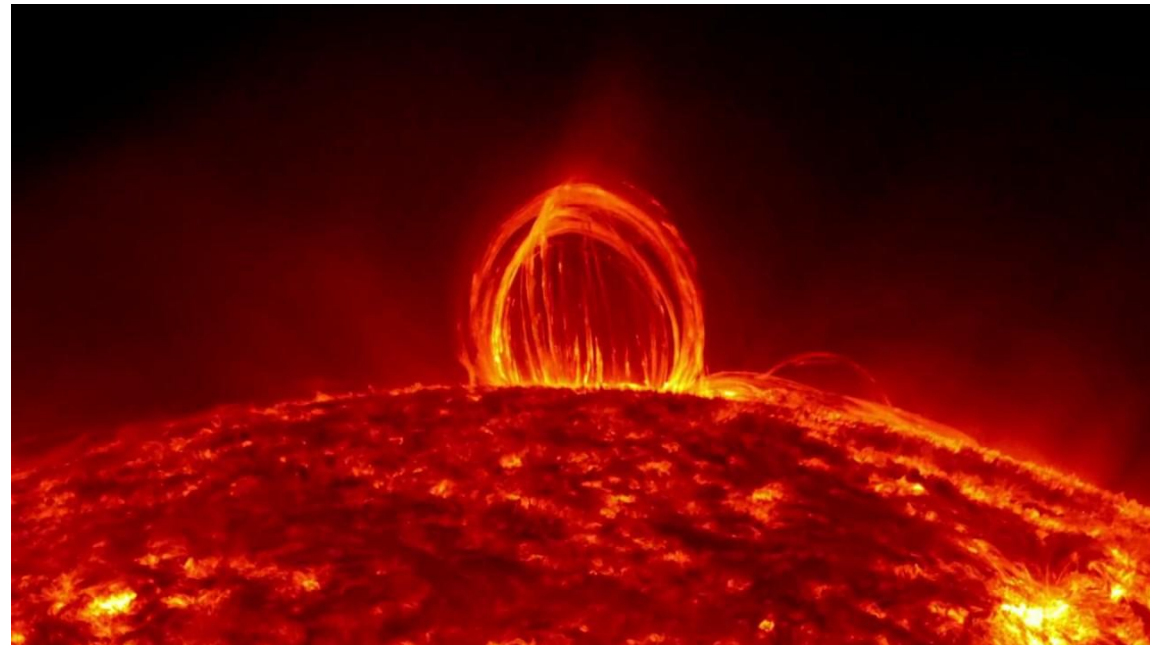
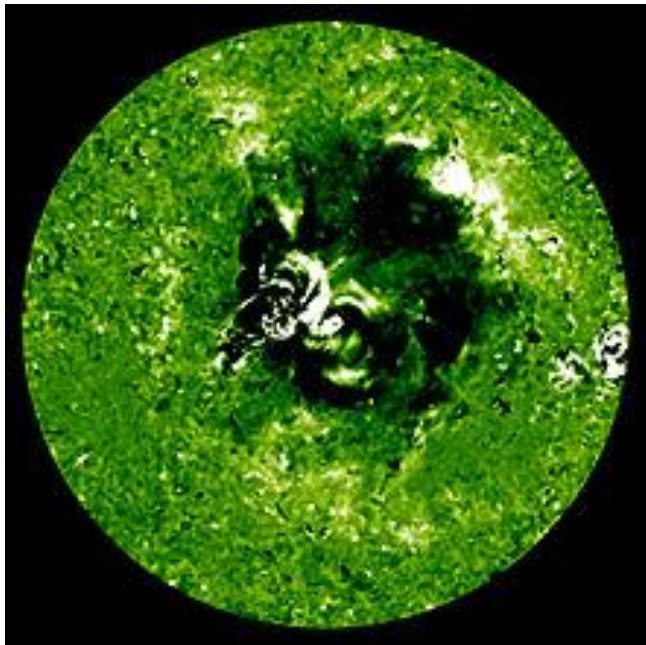
$$Q_1 = 7,367 \text{ МэВ}$$



Лекция 5. Звездная активность

- **Звездная активность** — совокупность процессов и явлений, связанных с образованием и распадом в атмосфере сильных магнитных полей.
- **Звездные циклы** — периодические изменения звездной активности.
- **Звездное пятно** — область более темная, чем окружающая фотосфера, в связи с локальным подавлением процессов конвекции магнитным полем звезды.
- **Звездная вспышка** — взрывной процесс выделения кинетической, световой и тепловой энергии в атмосфере звезды.
- **Протуберанцы (спокойные, активные, эруптивные, корональные)** — плотные конденсации относительно холодного звездного вещества, которые поднимаются и удерживаются над поверхностью звезды магнитным полем.
- **Звездная радиация (звездный ветер)** — электромагнитное и корпускулярное излучение звезды.
- **Корональные дыры** — области атмосферы звезды с пониженным давлением и температурой плазмы.
- **Факелы** — яркие области, окружающие звездные пятна.
- **Гранулы** — образования в фотосфере звезд, вызванные конвекцией плазмы.
- **Флоккулы и спикулы** — волокнистые и спиралевидные образования в хромосфере звезд.

- **Супергрануляция** — структура из конвективных ячеек, существующая на поверхности звезды.
- **Эффект Эвершеда** — явление в атмосфере звезды, суть которого в том, что на уровне фотосферы газ со скоростью порядка 2 км/с движется по направлению от центра солнечного пятна наружу, тогда как в хромосфере над пятном происходит движение газа к центру пятна со скоростью до 5 км/с.
- **Волна Мортон** — «звездное цунами», ударная волна, распространяющаяся в звездной короне со скоростью 500—1500 км/с, наблюдаемая в основном в спектральной линии $H\alpha$ и видимая в виде движущейся дуги.

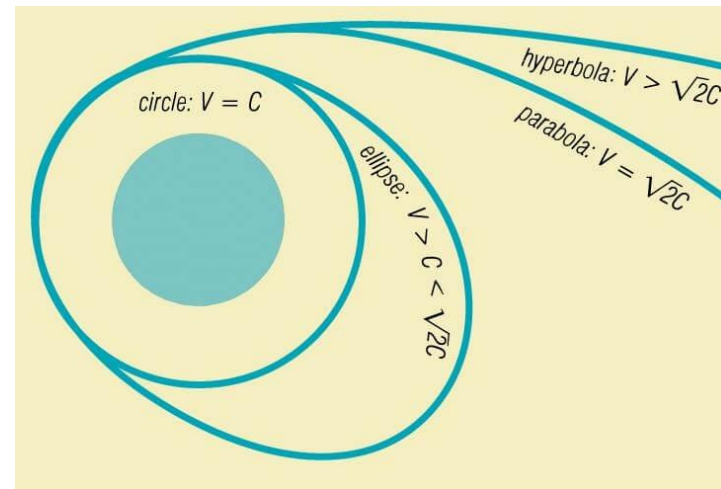


Лекция 6. Механика звездных систем.

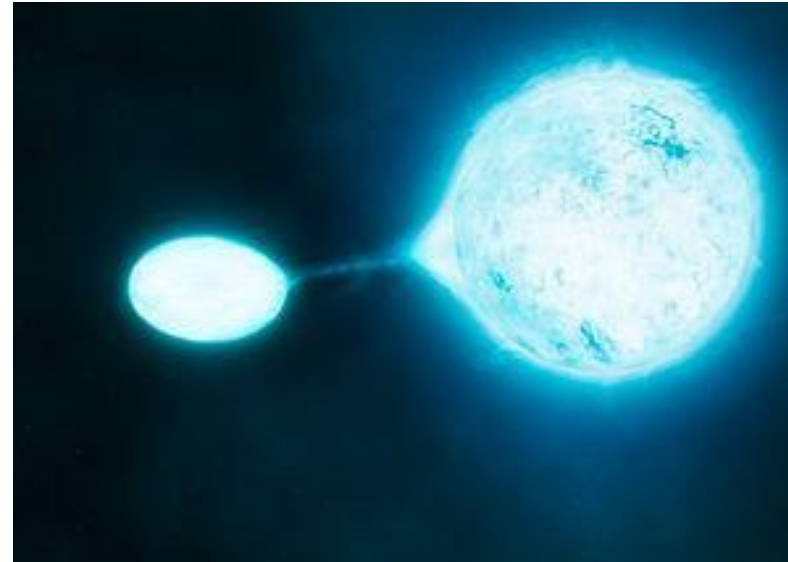
Звездные ассоциации

- **Гравитационная задача N тел:** в вакууме имеется N материальных точек, попарно взаимодействующих друг с другом силами гравитации. Известны координаты и скорости точек в начальный момент времени. Определить координаты точек в любой момент времени.
- Эта задача решается аналитически в простых случаях ($N=1$, $N=2$). **При $N>3$ в общем виде возможно только численное решение, причем не для всех N в данный момент имеются точные методы.**
- С помощью задачи N тел можно **определить положение планеты на орбите** (с условием отсутствия возмущений от других объектов), **положения двойных и тройных звезд при вращении относительно барицентра системы.**
- **При исследовании реальных систем используются как методы аналитической механики, так и методы статистической физики,** ибо взаимное влияние объектов даже только с помощью гравитации велико и сложно, и численное решение задачи не является возможным.

- **Космические скорости** — характерные критические скорости движения космических объектов в гравитационных полях небесных тел.
- **Первая космическая скорость** (круговая скорость относительно тела): чтобы объект стал искусственным спутником центрального тела (например, планеты);
- **Вторая космическая скорость** (параболическая скорость относительно тела): чтобы объект удалился от тела на бесконечно большое состояние (например, чтобы стал спутником звезды в планетной системе);
- **Третья космическая скорость** (гиперболическая скорость относительно тела): чтобы объект покинул планетную систему;
- **Четвертая космическая скорость** (параболическая скорость относительно центра галактики) — чтобы объект покинул галактику, в которой расположена планетная система.

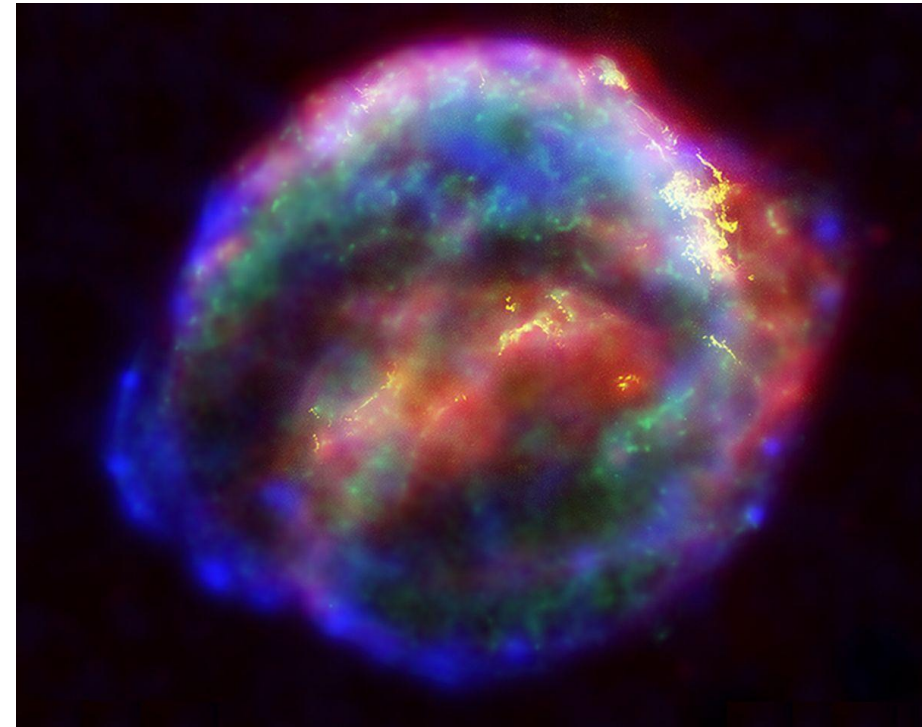
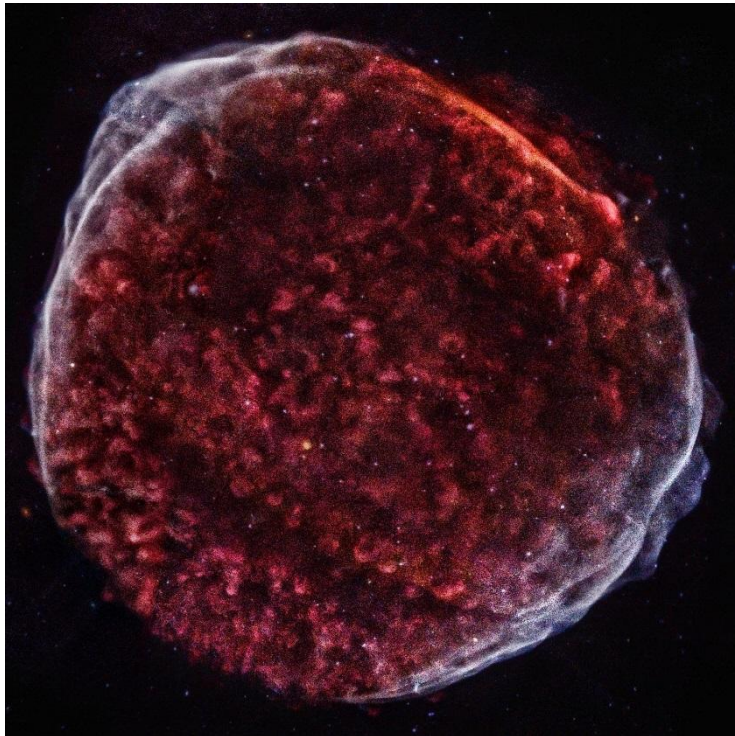


- **Звездные ассоциации** — группировки звезд, связанные общим происхождением, но не связанные гравитационным взаимодействием.
- **Звездные скопления** — группировки звезд, связанные общим происхождением и гравитационным взаимодействием. Различают шаровые и рассеянные скопления.
- **Созвездия** — группировки звезд в виде геометрического изображения.
- **Система кратных звезд** — система звезд, связанная гравитационным взаимодействием, элементы которой движутся относительно общего центра масс. Распространены двойные и тройные звезды. **Более 70% звезд Млечного Пути — кратные.**
- **Тесные звезды** — кратные звезды, обменивающиеся друг с другом веществом.
- **Галактики** — крупные скопления звезд, пыли, газа и темной материи.



Лекция 7. Сверхновые и гиперновые

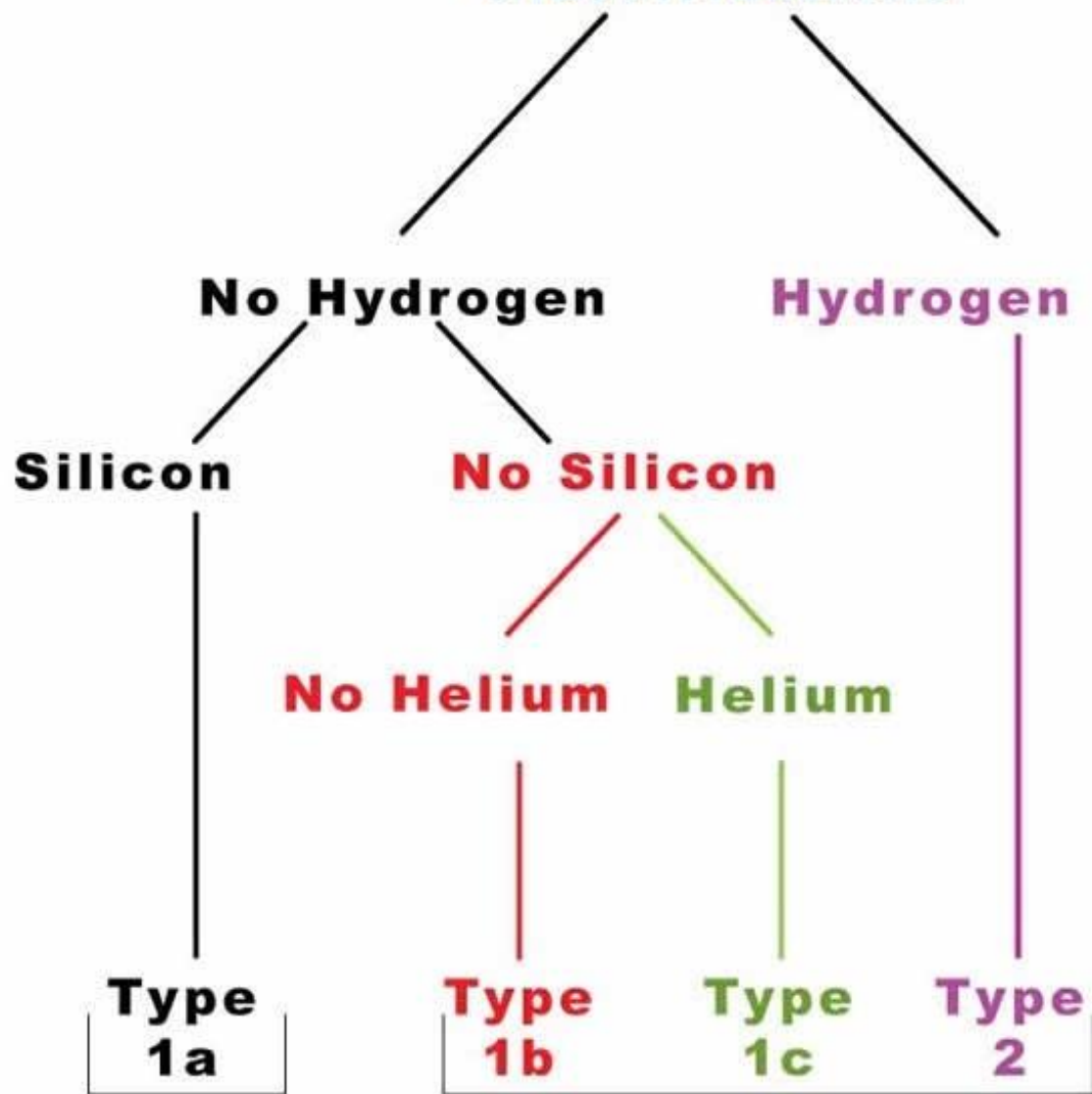
- **Новые звезды** — звезды, светимость которых внезапно увеличивается в 10^4 раз. Различают **быстрые, медленные, предельно медленные и повторные новые**.
- **Взрыв сверхновой (сверхновая звезда)** — резкое увеличение яркости звезды с выделением огромной энергии. **Элементы, образовавшиеся в ходе звездного нуклеосинтеза, попадают в космическое пространство по большей части в результате этого явления** (звездным ветром переносится относительно малая часть)



Современная классификация сверхновых

Класс	Подкласс		Механизм	
I Линии водорода отсутствуют	Сильные линии ионизированного кремния (Si II) на 6150 Å	Ia	Термоядерный взрыв	
		Iax ^[4] В максимуме блеска имеют меньшую светимость и меньшую же в сравнении Ia		
	Линии кремния слабые или отсутствуют	Ib Присутствуют линии гелия (He I).		
		Ic Линии гелия слабые или отсутствуют		
II Присутствуют линии водорода	II-P/L/N Спектр постоянен	II-P/L Нет узких линий	II-P Кривая блеска имеет плато	Гравитационный коллапс
			II-L Звёздная величина линейно уменьшается со временем ^[5]	
		IIn Присутствуют узкие линии		
	IIb Спектр со временем меняется и становится похожим на спектр Ib.			

Supernovae Classifications



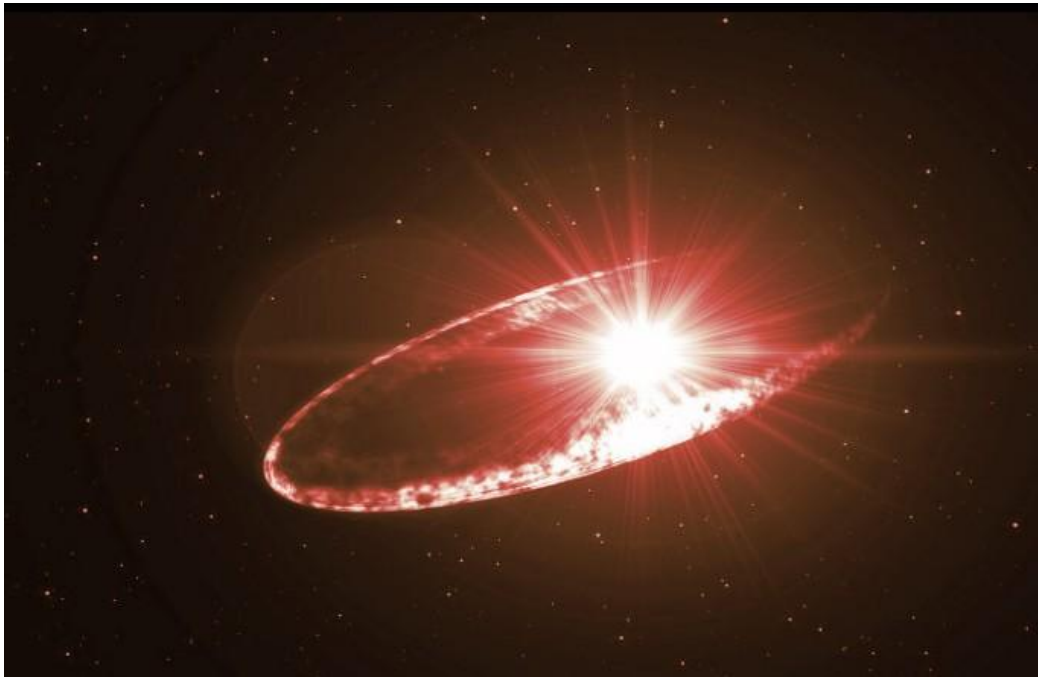
Thermonuclear
reaction trigger
by accretion from
companion star

Core Collapse



Гиперновые и черные дыры

- **Гиперновые** — взрывы очень больших сверхновых.
- **Коллапсары** — сверхновые и гиперновые, взрыв которых сопровождается образованием вращающейся **черной дыры**.
- **Черные дыры** — области пространства-времени с настолько мощным гравитационным полем, что его воздействие не могут преодолеть даже объекты, движущиеся со скоростью света.
- **Гамма-всплеск** — катастрофический взрывной выброс огромного количества энергии.



Спасибо за внимание!