

Белые карлики,  
нейтронные  
звёзды,  
чёрные дыры.  
Двойные, кратные  
и

# Нейтронные

**Нейтронная звезда** — астрономическое тело, один из конечных продуктов эволюции звёзд, состоит из нейтронной сердцевины и тонкой коры вырожденного вещества с преобладанием ядер железа и никеля.

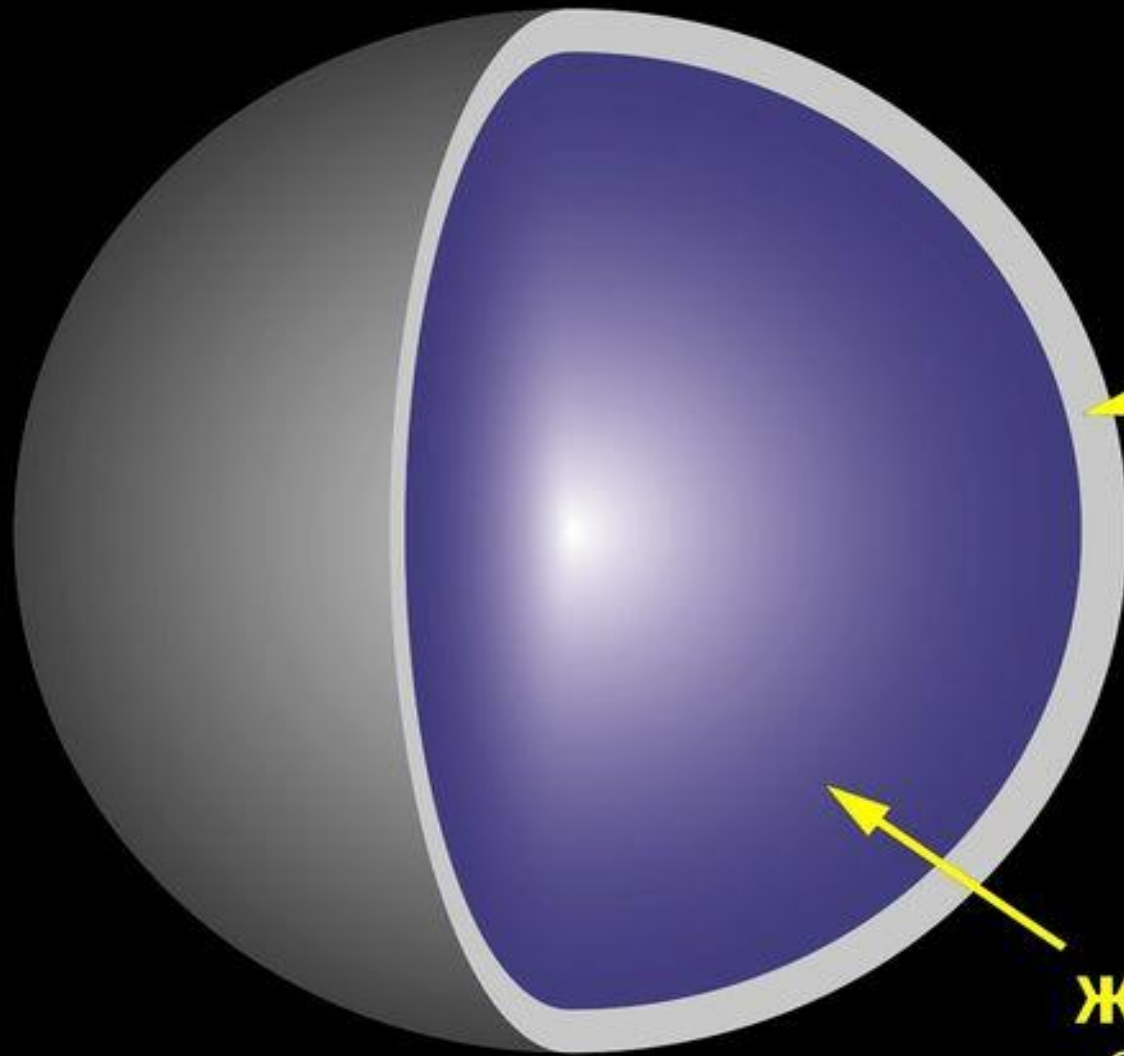
Нейтронные звёзды имеют очень малый размер — 10—20 км в диаметре, плотность вещества приближается к плотности атомного ядра ( $10^{16}$ — $10^{18}$  кг/м<sup>3</sup>). Массы большинства известных нейтронных звёзд близки к 1,4 массы Солнца (теоретически же допустимы нейтронные звёзды с массами от 0,1 до примерно 2,5 солнечных масс). Самая массивная нейтронная звезда из открытых Vela X-1 имеет массу 1,88 солнечных масс. Силы тяготения в нейтронных звёздах уравниваются давлением вырожденного нейтронного газа, максимальное значение массы нейтронной звезды задаётся

Нейтронные звёзды — одни из немногих астрономических объектов, которые были теоретически предсказаны до открытия наблюдателями. Ещё в 1934 году В. Бааде и Ф. Цвикки высказали предположение, что в результате взрыва сверхновой образуется нейтронная звезда. Но первое общепризнанное наблюдение нейтронной звезды состоялось только в 1968, с открытием пульсаров.



# Нейтронная звезда

1,5 массы Солнца  
~ 20 км в диаметре



**Твердая оболочка**

~ 2 км

**Жидкая середина**

Состоящая в основном из нейтронов, а также из других частиц

# Нейтронные звезды

Магнитное поле на поверхности нейтронных звёзд достигает значения  $10^{12}—10^{13}$  Гс. (для сравнения — у Земли около 1 Гс), именно процессы в магнитосферах нейтронных звёзд ответственны за радиоизлучение пульсаров.



**Фриц  
Цвикки**

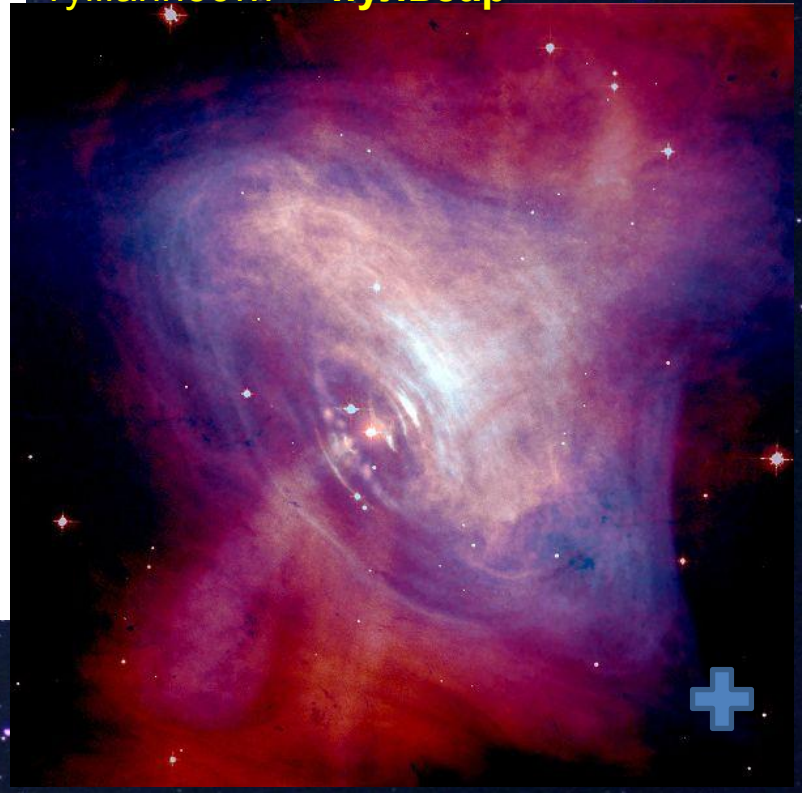
Нейтронные звёзды — одни из немногих астрономических объектов, которые были теоретически предсказаны до открытия наблюдателями. Ещё в 1934 году В. Бааде и Ф. Цвикки высказали предположение, что в результате взрыва сверхновой образуется нейтронная звезда. Но первое общепризнанное наблюдение нейтронной звезды состоялось только в 1968, с

открытием пульсаров.  
нейтронной звезде произошло только в 1968 с  
звезд. Но первое общепризнанное наблюдение  
в результате взрыва сверхновой образуется нейтронная

# Пульсар

**Пульсар** — космический источник радио-, оптического, рентгеновского, гамма-излучений, приходящих на Землю в виде периодически повторяющихся всплесков (импульсов). Пульсар представляет собой нейтронную звезду. Она испускает узконаправленный поток радиоизлучения. В результате вращения нейтронной звезды поток попадает в поле зрения внешнего наблюдателя через равные промежутки времени — так образуются импульсы пульсара. Сегодня известны сотни пульсаров. Ближайшие из них расположены на расстоянии около 100 световых лет от Солнца. Открытие пульсаров было связано с новой волной мифов о внеземных цивилизациях, поскольку до этого не были известны звёзды, излучение которых носило бы дискретный характер.

Изображение Крабовидной туманности в псевдоцвете (синий — рентгеновский, красный — оптический диапазон). В центре туманности — **пульсар**



# Пульсар

ы



Изображение пульсара Vela показывает драматические события краю туманности, где произошел взрыв сверхновой звезды. Стрелкой показано, что джеты движутся в том же направлении, что и пульсар. Подобные формы являются следствием движения пульсара через остаток сверхновой звезды. Последние несколько кадров этой анимации показывают область пространства вокруг быстровращающихся нейтронных звезд в туманности Краба (слева) по сравнению с Vela (справа). Внутреннее кольцо Краба - 1 световой год в диаметре;

у Vela это кольцо равно 0,1 светового года.



# Белые

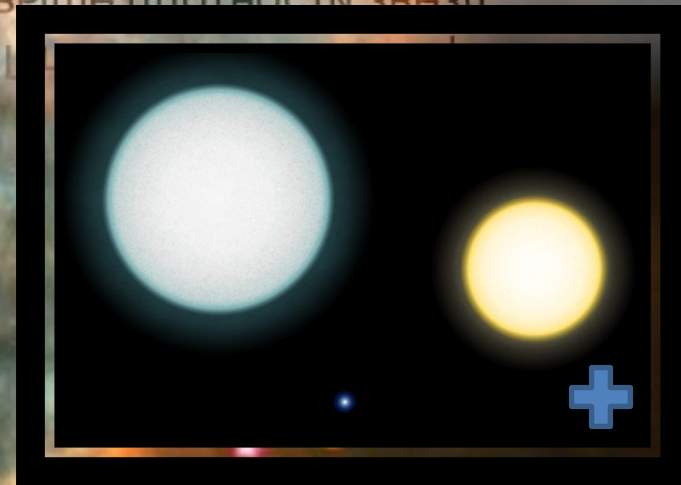
## карлики

**Белые карлики** — проэволюционировавшие звезды с массой, не превышающей предел Чандрасекара, лишённые собственных источников термоядерной энергии.

Белые карлики представляют собой компактные звёзды с массами, сравнимыми с массой Солнца, но с радиусами в  $\sim 100$  и, соответственно, светимостями в  $\sim 10\,000$  раз меньшими солнечной. Плотность белых карликов составляет порядка  $10^6$  г/см<sup>3</sup>, что в миллионы раз выше плотности звёзд

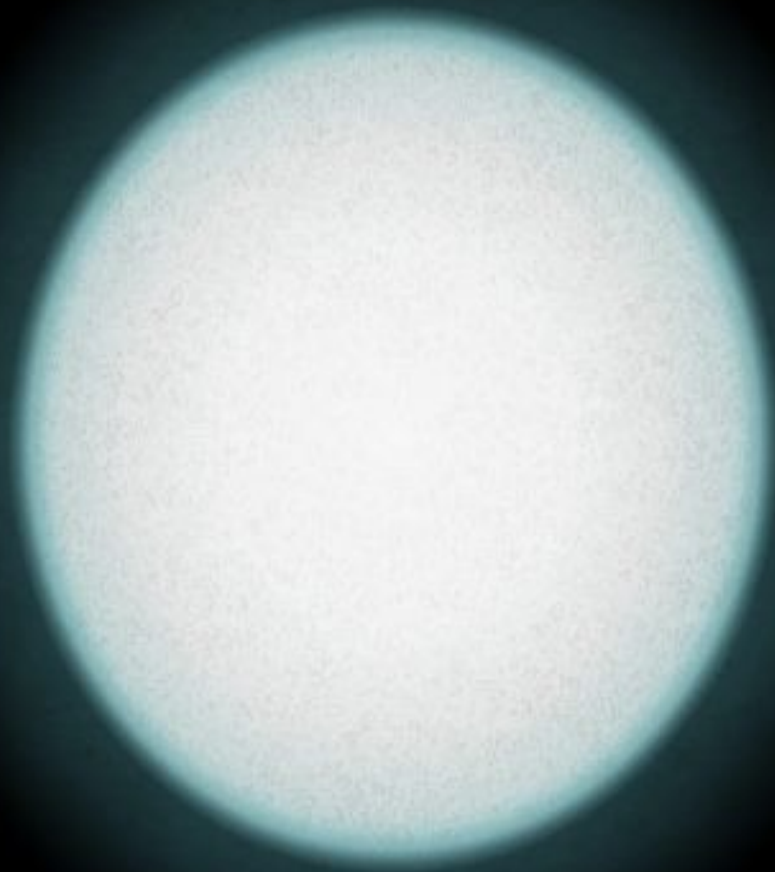
главной последовательности. По численности белые карлики составляют 3—10 % звёздного населения Галактики.

- Происхождение
- Открытие Белых карликов
- Парадокс плотности



Сравнительные размеры Солнце (справа) и двойной системы IK Пегаса компонент В - белый карлик с температурой поверхности 35,500 К (по центру) и компонент А - звезда спектрального типа



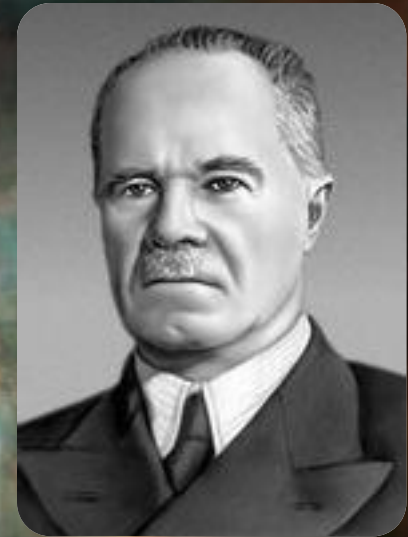


# Белые

## Происхождение карлики

Решение Фаулера объяснило внутреннее строение белых карликов, но не прояснило механизм их происхождения. В объяснении генезиса белых карликов ключевую роль сыграли две идеи: мысль Э. Эпика, что красные гиганты образуются из звёзд главной последовательности в результате выгорания ядерного горючего и предположение В. Г. Фесенкова, сделанное вскоре после Второй мировой войны, что звёзды главной последовательности должны терять массу, и такая потеря массы должна оказывать существенное влияние на эволюцию звёзд. Эти

предположения полностью подтвердились. Существенное влияние на эволюцию звёзд. Эпика такая потеря массы должна оказывать последовательности должны терять массу, и Второй мировой войны, что звёзды главной последовательности должны терять массу, и такая потеря массы должна оказывать существенное влияние на эволюцию звёзд. Эти



**Васи́лий Григо́рьевич Фесе́нков** (1 (13) января 1889, Новочеркасск — 12 марта 1972, Москва) — советский астроном, один из основоположников астрофизики, академик АН СССР (1935), академик АН КазССР (1946)

# Белые карлики

В 1844 г. директор Кёнигсбергской обсерватории Фридрих Бессель обнаружил, что Сириус, ярчайшая звезда северного неба, периодически, хотя и весьма слабо, отклоняется от прямолинейной траектории движения по небесной сфере. Бессель пришёл к выводу, что у Сириуса должен быть невидимый «тёмный» спутник, причём период обращения обеих звёзд вокруг общего центра масс должен быть порядка 50 лет. Сообщение было встречено скептически, поскольку тёмный спутник оставался ненаблюдаемым, а его масса должна была быть достаточно велика — сравнимой с массой Сириуса.



**Фридрих Вильгельм Бессель**  
22 июля 1784 — 17 марта 1846)  
— немецкий математик и  
астроном XIX века.

Бремен. Памятник Бесселю.





# Белые

## Парадокс карлики плотности

Высокая плотность белых карликов оставалась необъяснимой в рамках классической физики и астрономии и нашла объяснение лишь в рамках квантовой механики после появления статистики Ферми-Дирака. В 1926 г. Фаулер в статье «Плотная материя» показал, что, в отличие от звёзд главной последовательности, для которых уравнение состояния основывается на модели идеального газа (стандартная модель Эддингтона), для белых карликов плотность и давление вещества определяются свойствами вырожденного электронного газа (Ферми-газа).

Следующим этапом в объяснении природы белых карликов стали работы Я. И. Френкеля и Чандрасекара. В 1928 г. Френкель указал, что для белых карликов должен существовать верхний предел массы, и в 1930 г. Чандрасекар в работе «Максимальная масса идеального белого карлика» показал, что белые карлики с массой выше 1,4 солнечных неустойчивы (предел Чандрасекара) и должны коллапсировать.

# «Новые»

«**Нóвые звёзды**», в астрономической литературе обычно просто «**Новые**» — звёзды, светимость которых внезапно увеличивается в  $\sim 10^3$ - $10^6$  раз (в среднем увеличение светимости в  $\sim 10^4$ , блеска  $\sim 12$  звёздных величин).

Водовороты газа и пыли в области формирования новой звезды, снятые космическим телескопом Hubble. Эта красотища с названием LH 95 расположена в “Большом Магеллановом Облаке”, она показывает нам области “низкой массы” - младенческие звезды, а так же несколько их более массивных соседей. Изображение получено в марте 2006 года с помощью камеры “Hubble Advanced Camera” телескопа Hubble.



Механизм вспышки

Типы «Новых» звезд

Интересные факты,

прочее

# «Новые»

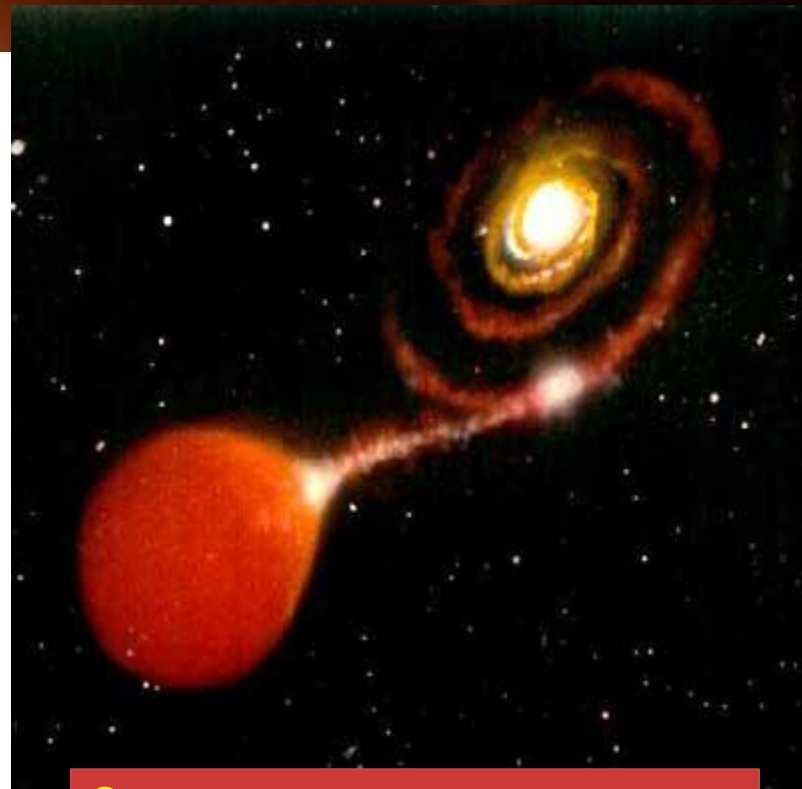
## Механизм вспышки :: Звезды


Все новые звёзды являются тесными двойными системами, состоящими из белого карлика и звезды-компаньона, находящейся на главной последовательности, либо достигшей в ходе эволюции стадии красного гиганта и заполнившей свою полость Роша. В таких системах происходит перетекание вещества внешних слоев звезды-компаньона на белый карлик через окрестности точки Лагранжа L1, перетекающее вещество образует вокруг белого карлика аккреционный диск, скорость аккреции на белый карлик постоянна и определяется параметрами звезды-компаньона и отношением масс звёзд-компонентов двойной системы; состав падающего на белый карлик газа типичен для внешних слоёв красных гигантов и звёзд главной последовательности - более 90% водорода.

Зависимость давления вырожденного газа от температуры: вспышка новой (реакции CNO-цикла) развивается на горизонтальном участке

Зависимость давления вырожденного газа от температуры: вспышка новой (реакции CNO-цикла) развивается на горизонтальном участке

развивается на горизонтальном участке.



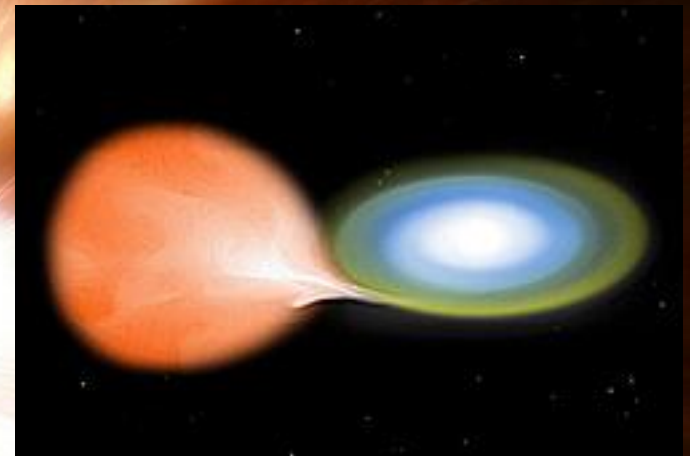
**Слева** - массивная теряющая вещество звезда 

**Справа** - звезда спектрального класса белый карлик. Поток газа устремляется к белому карлику и образует аккреционный диск вокруг него

# «Новые»

## Механизм вспышки :: Звезды Часть 2

Белые карлики представляют собой «выгоревшие» ядра красных гигантов, в ходе эволюции сбросивших свою оболочку; их состав зависит от массы исходной звезды: эволюция менее массивных звёзд ведёт к гелиевым белым карликам, в результате эволюции звёзд с большей массой, в ядре которых шла тройная гелиевая реакция образуются углеродные белые карлики. В любом случае для развития вспышки новой ключевыми являются два фактора: крайне низкое содержание водорода и вырожденное состояние вещества белого карлика.



Аккреция на белый карлик в тесной двойной системе.  
(в представлении художника)



# «Новые»

## Механизм вспышки :: Звёзды

Аккрецируемый газ накапливается на поверхности белого карлика, образуя обогащённый водородом слой, из-за крайне высокого ускорения свободного падения на поверхности белого карлика ( $\sim 10^8$  см/с<sup>2</sup>) этот слой находится в вырожденном состоянии и дополнительно разогревается потоком из аккреционного диска, скорость падения которого составляет  $\sim 1000$  км/с. По мере накопления в поверхностном слое водорода и повышения температуры в обогащённом водородом слое начинают идти термоядерные реакции CNO-цикла, этому способствует и проникновение в вырожденный поверхностный слой углерода из нижележащих слоёв белого карлика. В невырожденных условиях энерговыделение идущих в веществе термоядерных реакций, приводящее к повышению температуры, приводит к росту давления и, соответственно, расширению, понижению плотности и снижению скорости ядерных реакций (пропорциональной плотности и температуре) - т.е. установлению саморегулирующегося гидростатического равновесия, как это происходит в недрах звёзд главной последовательности. Однако особенностью нерелятивистского вырожденного газа является крайне слабая зависимость давления от температуры:  $P \sim K\rho^{5/3}$ . Результатом является взрывоподобное ускорение реакций термоядерного синтеза в богатой водородом оболочке, температура резко возрастает до снятия вырождения при данной плотности и формируется ударная волна, сбрасывающая верхний слой водородной оболочки белого карлика в окружающее пространство. Такое взрывное нарастание скорости термоядерных реакций в вырожденном звёздном веществе является достаточно типичным явлением: сходную природу имеют гелиевые вспышки красных гигантов и углеродная детонация в вырожденных ядрах массивных звёзд и массивных белых карликов при превышении предела Чандрасекара.

Вскоре после вспышки начинается новый цикл аккреции на белый карлик и накопления водородного слоя и, через некоторое время, определяемое темпами аккреции и свойствами белого карлика, вспышка повторяется. Интервал между вспышками составляет от десятков лет у повторных новых до тысяч лет у классических новых звёзд.

# «Новые»

## Номенклатура, типы и классификация звёзды

До 1925 г. новые звёзды именовались в соответствии с номенклатурой переменных звёзд Фридриха Аргеландера 1862 г., то есть имя состояло из буквенного индекса, соответствующего по порядку их открытия в созвездии и названия созвездия, так, например, в этой номенклатуре новая 1901 г. в созвездии Персея обозначалась как **GK Per**. С 1925 г. новые именуются как переменные звёзды, то есть индексом V, порядковым номером открытия в созвездии и названием созвездия: так, например, новая 1975 г. в созвездии Лебеда обозначается как **V1500 Cyg**

Новые звёзды являются подклассом катаклизмических переменных. Выделяют классические новые с большим периодом между вспышками и повторные новые с относительно частой повторяемостью вспышек.

- Na** — быстрые новые
- Nb** — медленные новые
- Nc** — предельно медленные новые
- NR** — повторные новые

# «Новые»

## Исторические звёзды значения

При наблюдении за сверхновой SN 1572 в созвездии Кассиопея астроном Тихо Браге, отразил это в своих записях как о *новой* звезде, дав тем самым рождение термину *новая*. В своих работах он утверждал, что так как движение близких объектов должно быть заметно относительно неподвижных звёзд, то новая должна находиться очень далеко

## Новые как индикаторы расстояния

Новые имеют хорошие шансы быть использованными в качестве стандартных свеч. Пусть, к примеру, распределение её абсолютной звёздной величины бимодально, с основной вершиной в  $-7,5$  и меньшей в  $-8,8$ . Кроме того, абсолютная звёздная величина новой остаётся приблизительно одинаковой ( $-5,5$ ) около 15 дней после взрыва. Определение расстояний галактик и скоплений галактик при помощи новых дают такую же точность, как и при использовании цефеид.

# Черная

**Чёрная дыра́** — область в пространстве-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света.

Граница этой области называется горизонтом событий, а её радиус (если она сферически симметрична) — *гравитационным радиусом*. В простейшем случае сферически симметричной чёрной дыры он равен радиусу Шварцшильда:



**Карл Шварцшильд** (нем. *Karl Schwarzschild*) (9 октября 1873, Франкфурт-на-Майне — 11 мая 1916, Потсдам) — немецкий астроном и физик.

Одна из его работ по теории относительности содержала первые точные решения полевых уравнений общей теории относительности со сферической симметрией — так называемое внутренне решение Шварцшильда для невращающегося шарообразного тела из однородной жидкости и внешнее решение Шварцшильда для статического пустого пространства вокруг сферически-симметричного тела (второе сейчас именуют обычно просто решением Шварцшильда). Решение Шварцшильда было первым решением уравнений Эйнштейна с классической чёрной дырой. Поэтому несколько терминов из физики чёрных дыр получили его имя, например радиус Шварцшильда, Шварцшильдовы координаты и так далее.

# Черная

Существование чёрных дыр следует из точных решений уравнений Эйнштейна, первое из которых было получено Карлом Шварцшильдом в 1916 году. Сам термин был придуман Джоном Арчибалдом Уилером в конце 1967 года и впервые употреблён в публичной лекции "Наша Вселенная: известное и неизвестное (Our Universe: the Known and Unknown)" 29 декабря 1967 года. Ранее подобные астрофизические объекты называли в англоязычной научной литературе «сколлапсировавшие звёзды», а в русскоязычной — «застывшие звёзды» или «коллапсары».





Изображение, полученное с помощью телескопа «Хаббл»: Активная галактика M87. В ядре галактики, предположительно, находится чёрная дыра. На снимке видна релятивистская струя длиной около 5 тысяч световых лет.



-- Lobe of hot gas --

Sgr A\*

-- Lobe of hot gas --

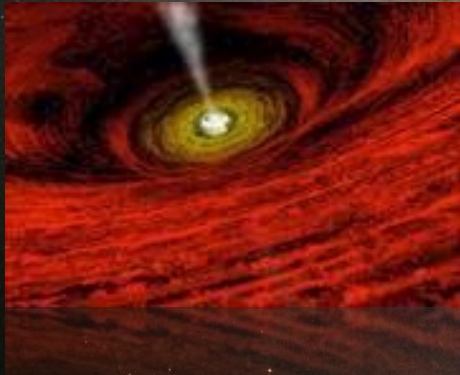
Galactic Plane

Данная черная дыра является одной из наибольших известных человечеству.  
На иллюстрации помечено место расположения источника рентгеновского излучения, которое ассоциируется именно с массивной черной дырой.

# Черная

## Схематическая дыра иллюстрация

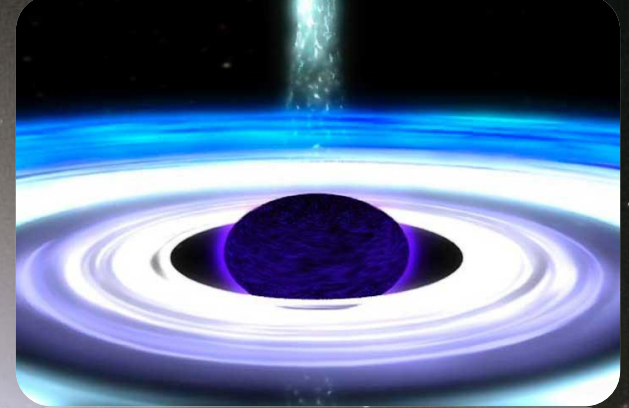
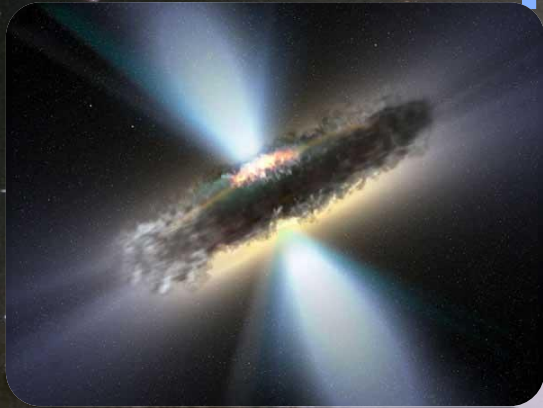
Ньютон открыл Закон Всемирного Тяготения и заставил астрономов задуматься над тем, что некоторые звезды могут сжиматься и становиться темными, потому что их гравитация могла быть такой сильной, что ничто, даже свет, не мог бы покинуть пределов такой звезды. Эти темные звезды были названы черными дырами и за последние тридцать лет астрономы накопили впечатляющее количество данных для доказательства существования двух типов черных дыр.



Масса черных дыр показывает, что они являются сжатыми остатками звезд, по крайней мере, в 20 раз больших, чем Солнце. Явные кандидаты в черные дыры обнаружены пока лишь на орбите вокруг нормальной звезды. По мере того, как вещество из нормальной звезды падает к черной дыре, оно выдает заметное рентгеновское излучение до того, как исчезнет в черной дыре, чтобы никогда уже не возвратиться оттуда. Число этих страшных гравитационных малюток в нашем Млечном Пути оценивается в несколько десятков или сотен миллионов.



# Черная Схематическая дыра



Радио, инфракрасные, оптические и рентгеновские лучи показывают, что значительно большие черные дыры, называемые супермассивными, существуют в центре большинства галактик. Эти черные дыры имеют массу, колеблющуюся от нескольких миллионов до нескольких миллиардов масс Солнца. Супермассивная черная дыра в центре Млечного Пути имеет массу только около 3 миллионов солнечных масс.

Как супермассивные черные дыры формируются, пока не понятно. Предполагают, что они могли сформироваться через прямой коллапс облака вещества в центре галактики, или через слияние черных дыр, или постепенным приростом окружающего газа из галактики, или комбинацией всего перечисленного выше. Их прирост мог бы зависеть от доступности окружающего газа, или от соседних черных дыр, которые могли бы захватываться при вращении галактики.

# Черная

## Схематическая дыра иллюстрация

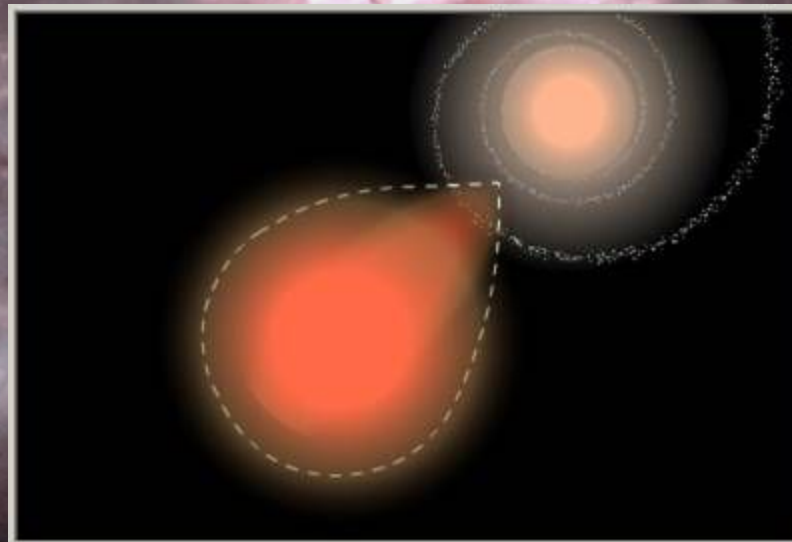
Один важный аспект, который был обнаружен несколько лет назад, состоит в том, что масса центральной супермассивной черной дыры галактики приблизительно соотносится с массой центральной части галактики. Например, Млечный Путь, в котором центр Галактики имеет сравнительно небольшое ядро, имеет и меньшую супермассивную черную дыру, чем в других галактиках. Любая успешная теория образования супермассивных черных дыр должна принять во внимание отношение дыра/ядро галактики.

Результаты с «Чандра» и других рентгеновских телескопов, и Телескопа Хаббл позволили рассмотреть возможность, которая все предполагает существование другого типа черной дыры. Эти черные дыры, чьи массы могли быть в районе несколько сот (до тысячи) солнечных масс, названы промежуточными черными дырами. Они могли быть остатками чрезвычайно огромных звезд, сформированных в начале эволюции Вселенной. Или они формировались бы через быстрое слияние многих меньших черных дыр в центрах плотных звездных групп (шаровых скоплений). Они могут быть необыкновенно мощными звездными черными дырами. Подтверждения этому нет, но все указывает на это.

# Двойная

## звезда

**Двойная звезда** — это две гравитационно связанные звезды, обращающиеся вокруг общего центра масс. Иногда встречаются системы из трёх и более звёзд; в таком общем случае система называется кратной звездой.



# Двойная

## звезда Виды двойных звезд и их обнаружение

Двойные звёзды, которые возможно увидеть отдельно (или, как говорят, которые могут быть *разрешены*), называются **видимыми двойными** или **визуально-двойными**, однако компоненты большинства двойных систем слишком близки друг к другу и находятся на слишком большом расстоянии, чтобы их можно было различить даже в самые мощные телескопы. Однако даже в этом случае их двойственность может быть обнаружена по некоторым другим признакам — колебаниям блеска, вызываемым периодическими затмениями одной звезды другою (**затменные переменные**), и периодическим смещениям спектральных линий (**спектрально-двойные**). В случае, если двойная звезда обладает достаточно большим собственным движением, можно наблюдать отклонение траектории движения по небесной сфере от прямой её главного компонента.

Иногда бывает, что две физически никак не связанные между собой звезды случайно проецируются на очень близкие друг к другу точки небесной сферы. Такие звёзды называются **оптически-двойными** — в противоположность «истинным», **физически-двойным**.

Двойные звёзды, компоненты которых активно взаимодействуют между собой, обмениваясь веществом называют **тесными двойными звёздами** или **тесными двойными системами**.

# Двойная

## звезда Гравитационное взаимодействие между компонентами

Двойные звёзды удерживаются вместе взаимным тяготением. Обе звезды двойной системы вращаются по эллиптическим орбитам вокруг некоторой точки, лежащей между ними и называемой центром масс этих звёзд. Если расстояние между партнёрами достаточно велико, орбитальный период может измеряться годами, а иногда целым столетием или даже больше. Для тесных систем орбитальный период может составлять всего несколько часов. В случае, когда две достаточно массивные звезды вращаются вокруг общего центра тяжести на близком расстоянии друг от друга, становятся заметными релятивистские эффекты, такие как смещение периастра и сокращение орбитального периода за счёт излучения системой гравитационных волн (последнее приводит к тому, что в конце концов две звезды сталкиваются).



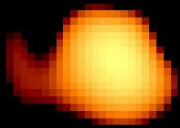
# Двойная

## звезда Компоненты двойных звезд

Существуют разные двойные звёзды: бывают две похожие звезды в паре, а бывают разные (как правило, это красный гигант и белый карлик). Но, вне зависимости от их типа, эти звёзды наиболее хорошо поддаются изучению: для них, в отличие от обычных звёзд, анализируя их взаимодействие, можно выяснить почти все параметры, включая массу, форму орбит и даже примерно выяснить характеристики близкорасположенных к ним звёзд. Как правило, эти звёзды имеют несколько вытянутую форму вследствие взаимного притяжения. Примерно половина всех звёзд нашей Галактики принадлежит к двойным системам, так что двойные звёзды, вращающиеся по орбитам одна вокруг другой, явление весьма распространенное.

Принадлежность к двойной системе очень сильно влияет на всю жизнь звезды, особенно когда напарники находятся близко друг к другу. Потoki вещества, устремляющиеся от одной звезды на другую, приводят к драматическим вспышкам, белых и сверхновых звёзд.

Изображение Переменной звезды Миры (омикрона Кита), сделанное космическим телескопом им. Хаббла в ультрафиолетовом диапазоне. На фотографии виден аккреционный "хвост", направленный от основного компонента - красного гиганта к компаньону - белому карлику



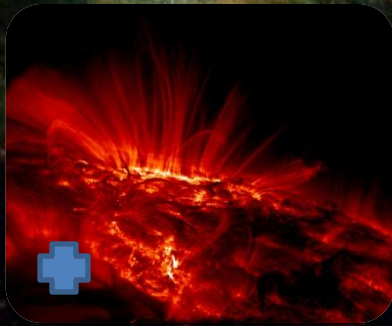
# Вспыхивающая

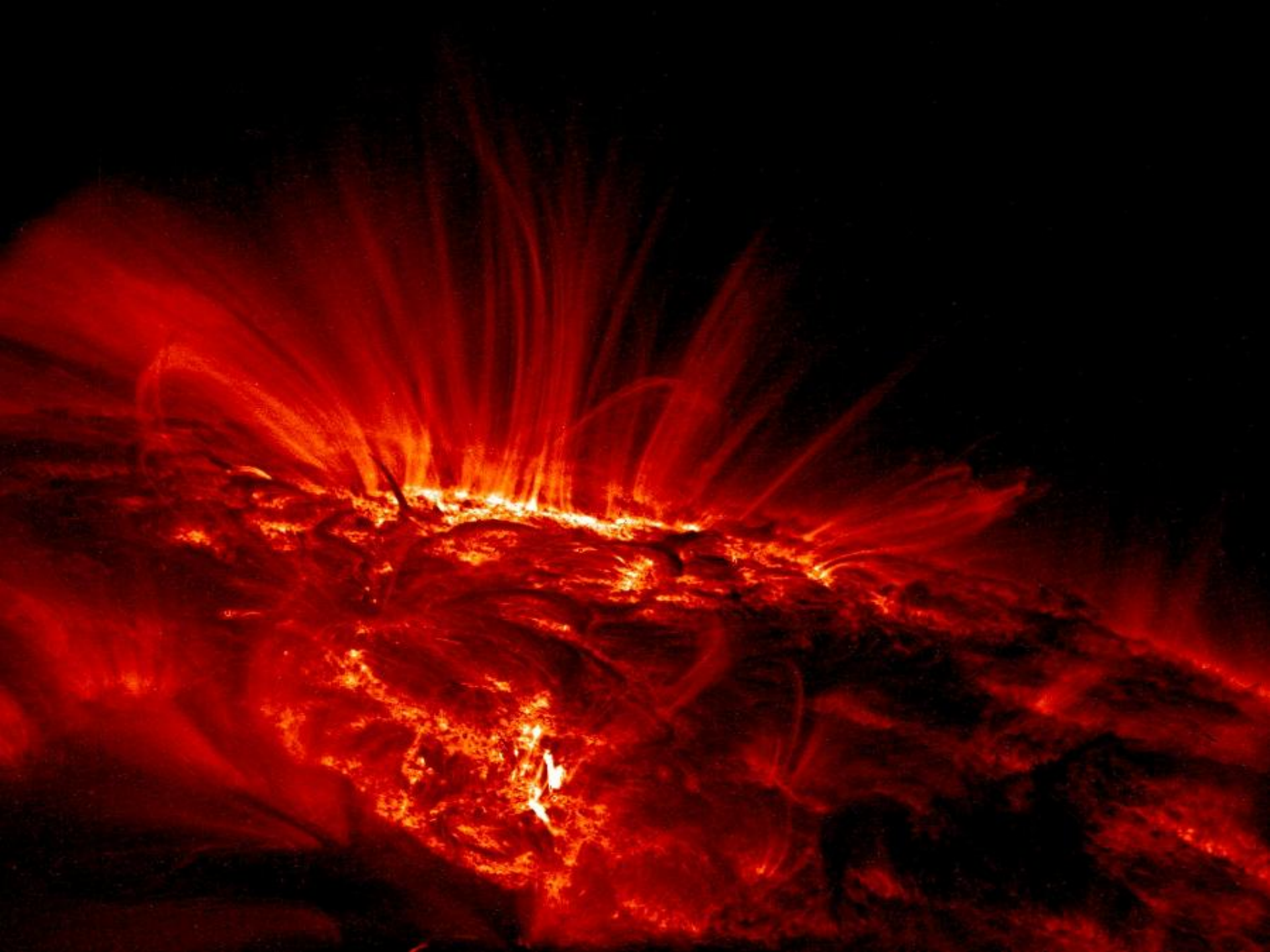
**Вспыхивающие звёзды** или **звёзды типа UV Кита** — переменные звёзды, резко и неперiodически увеличивающие свою светимость в несколько раз во всём диапазоне от радиоволн до рентгеновского излучения.

Вспыхивающие звёзды это тусклые красные карлики, иногда отмечаются вспышки на коричневых карликах. Это самый многочисленный класс переменных звёзд, но из-за тусклости их известно не очень много — все известные вспыхивающие звёзды находятся на расстоянии не более 60 световых лет. Многие ближайшие к Солнцу звёзды, в том числе, Проксима Центавра, ДХ Рака и Вольф 359 принадлежат к этому классу.

Вспышки могут длиться от минут до нескольких часов, средний интервал между вспышками — от 1 часа до десятков суток. Начало вспышки происходит гораздо быстрее, чем угасание, звезда может увеличить свой блеск вдвое всего за несколько секунд. Во время вспышки резко меняется спектр звезды, в синей и ультрафиолетовой областях появляется непрерывный спектр излучения.

Предполагается, что солнечные вспышки имеют примерно ту же природу, хотя и гораздо слабее. Причём вспышки на Солнце слабее не только по относительной величине (Солнце значительно ярче красных карликов, показывающих вспышки типа UV Кита), но и по количеству высвобождаемой во время вспышки энергии.







# Сверхновая

**Сверхновые звёзды** — звёзды, заканчивающие свою эволюцию в катастрофическом взрывном процессе.

Термином «сверхновые» были названы звёзды, которые вспыхивали гораздо (на порядки) сильнее так называемых «новых звёзд». На самом деле, ни те, ни другие физически новыми не являются, всегда вспыхивают уже существующие звёзды. Но в нескольких исторических случаях вспыхивали те звёзды, которые ранее были на небе практически или полностью не видны, что и создавало эффект появления новой звезды.



- Физика сверхновых звезд
- Место сверхновых во Вселенной
- Наблюдение сверхновых звезд

# Сверхновая

## Физика сверхновых звезд



### Сверхновые II типа

По современным представлениям, термоядерный синтез приводит со временем к обогащению состава внутренних областей звезды тяжёлыми элементами. В процессе термоядерного синтеза и образования тяжёлых элементов звезда сжимается, а температура в её центре растёт. (Эффект отрицательной теплоёмкости гравитирующего невырожденного вещества.) Если масса звезды достаточно велика, то процесс термоядерного синтеза доходит до логического завершения с образованием ядер железа и никеля, а сжатие продолжается. При этом термоядерные реакции будут продолжаться только в некотором слое звезды вокруг центрального ядра — там, где ещё осталось невыгоревшее термоядерное топливо.

# Сверхновая

## Физика сверхновых звезд



### Сверхновые II типа

Центральное ядро сжимается все сильнее, и в некоторый момент из-за давления в нем начинают идти реакции нейтронизации — протоны начинают поглощать электроны, превращаясь в нейтроны. Это вызывает быструю потерю энергии, уносимой образующимися нейтрино (т.н. нейтринное охлаждение), так что ядро звезды сжимается и охлаждается. Процесс коллапса центрального ядра настолько быстр, что вокруг него образуется волна разрежения. Тогда вслед за ядром к центру звезды устремляется и оболочка. Далее происходит отскок вещества оболочки от ядра и образуется распространяющаяся наружу ударная волна, инициирующая термоядерные реакции. При этом выделяется достаточная энергия для сброса оболочки сверхновой с большой скоростью. Важное значение имеет процесс подпитки ударной волны энергией выходящих из центральной области нейтрино. Такой механизм взрыва относится к сверхновым II типа (SN II). Как показывает численное моделирование, ударная волна отскока не приводит к взрыву сверхновой. Она останавливается на расстоянии примерно 100-200 км от центра звезды. Учёт вращения и наличия магнитного поля позволяет численно смоделировать взрыв сверхновой (магниторотационный механизм взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром). Считается, что образованием сверхновой II типа заканчивается эволюция всех звёзд, первоначальная масса которых превышает 8—10 масс Солнца. После взрыва остаётся нейтронная звезда или чёрная дыра, а вокруг этих объектов в пространстве некоторое время существуют остатки оболочек взорвавшейся звезды в виде расширяющейся газовой туманности.

# Сверхновая

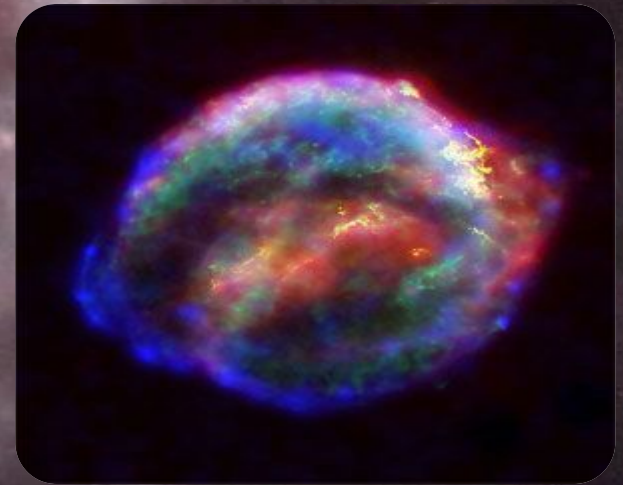
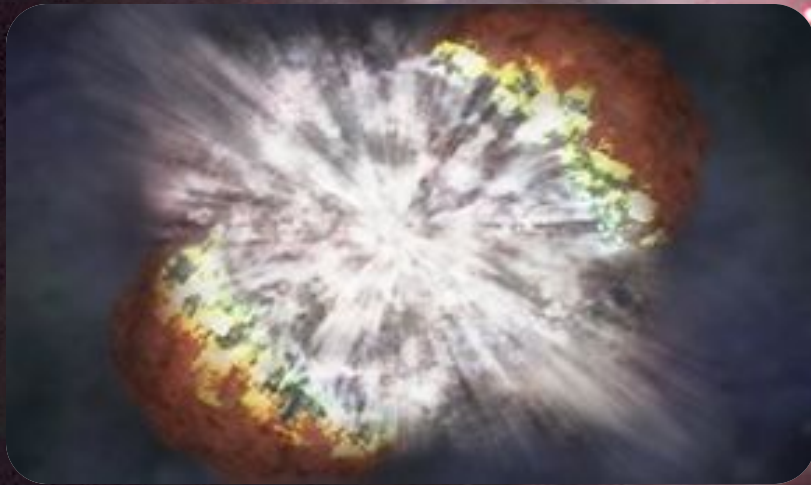
## Физика сверхновых звёзд

Несколько другим выглядит механизм вспышек сверхновых звёзд Ia типа (SN Ia). Это так называемая термоядерная сверхновая, в основе механизма взрыва которой лежит процесс термоядерного синтеза в плотном углеродно-кислородном ядре звезды. Предшественниками SN Ia являются белые карлики с массой, близкой к пределу Чандрасекара. Принято считать, что такие звезды могут образовываться при перетекании вещества от второй компоненты двойной звёздной системы. Это происходит, если вторая звезда системы выходит за пределы своей полости Роша или относится к классу звёзд со сверхинтенсивным звёздным ветром. При увеличении массы белого карлика постепенно увеличивается его плотность и температура. Наконец, при достижении температуры порядка  $3 \times 10^8$  К, возникают условия для термоядерного поджигания углеродно-кислородной смеси. От центра к внешним слоям начинает распространяться фронт горения, оставляя за собой продукты горения — ядра группы железа. Распространение фронта горения происходит в медленном дефлаграционном режиме и является неустойчивым к различным видам возмущений. Наибольшее значение имеет Релей-Тейлоровская неустойчивость, которая возникает из-за действия архимедовой силы на лёгкие и менее плотные продукты горения, по сравнению с плотной углеродно-кислородной оболочкой. Начинаются интенсивные крупномасштабные конвективные процессы, приводящие к ещё большему усилению термоядерных реакций и выделению необходимой для сброса оболочки сверхновой энергии ( $\sim 10^{51}$  эрг). Скорость фронта горения увеличивается, возможна турбулизация пламени и образование ударной волны

# Сверхновая

## Другие типы звезда сверхновых

Существуют также SN Ib и Ic, предшественниками которых являются массивные звезды в двойных системах, в отличие от SN II, предшественниками которых являются одиночные звезды.

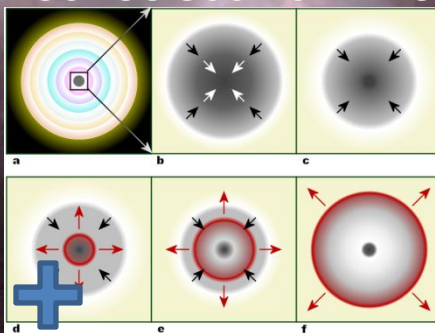


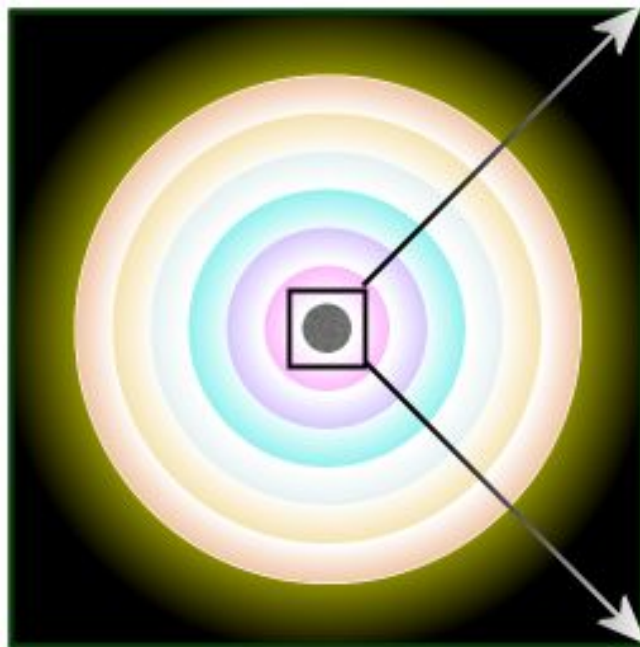
# Сверхновая

## Место сверхновых во звезда

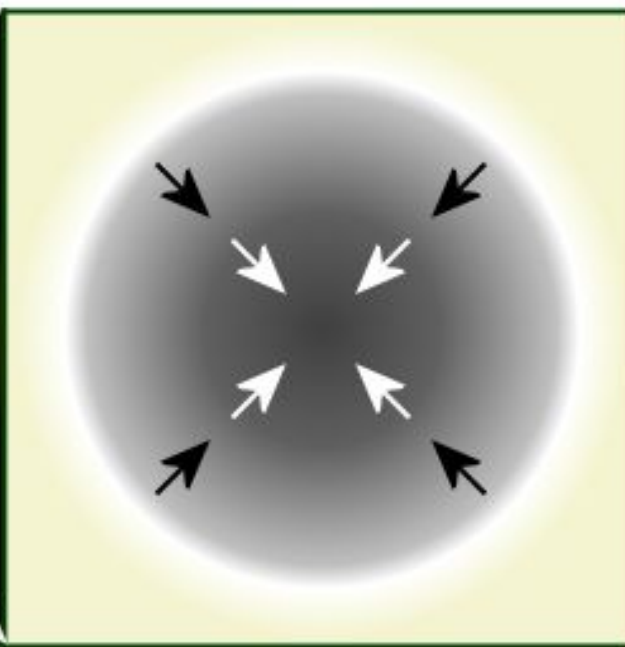
Согласно многочисленным исследованиям, после рождения Вселенной, она была заполнена только лёгкими веществами — водородом и гелием. Все остальные химические элементы могли образоваться только в процессе горения звёзд. Это означает, что наша планета (и мы с вами) состоим из вещества, образовавшегося в недрах доисторической звезды и выброшенного когда-то во взрыве сверхновой.

Взрыв сверхновой звезды — явление чрезвычайно редкое. По современным представлениям, в нашей Галактике должен происходить взрыв сверхновой примерно каждые 50 лет. Большая часть этих взрывов оказывается скрыта от нас непрозрачной пылевой подсистемой нашей Галактики. Поэтому большинство сверхновых наблюдаются в других галактиках. Глубокие обзоры неба на автоматических камерах, соединённых с телескопами сейчас астрономам открывают более 300 вспышек в год.

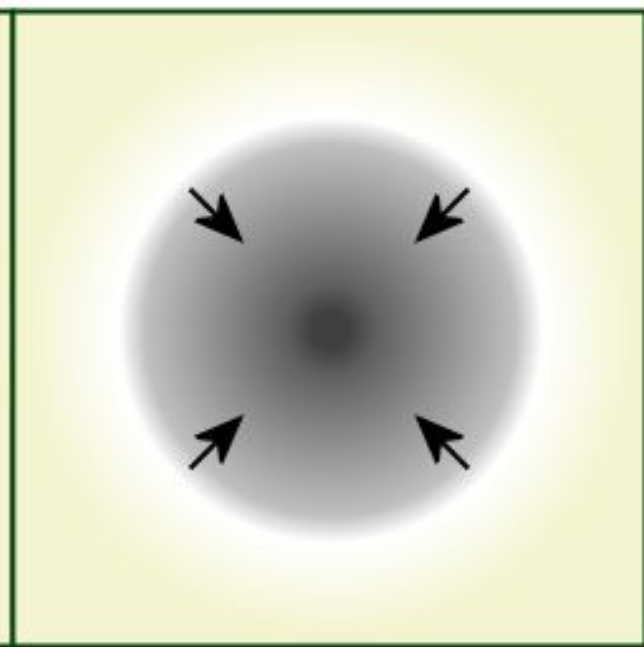




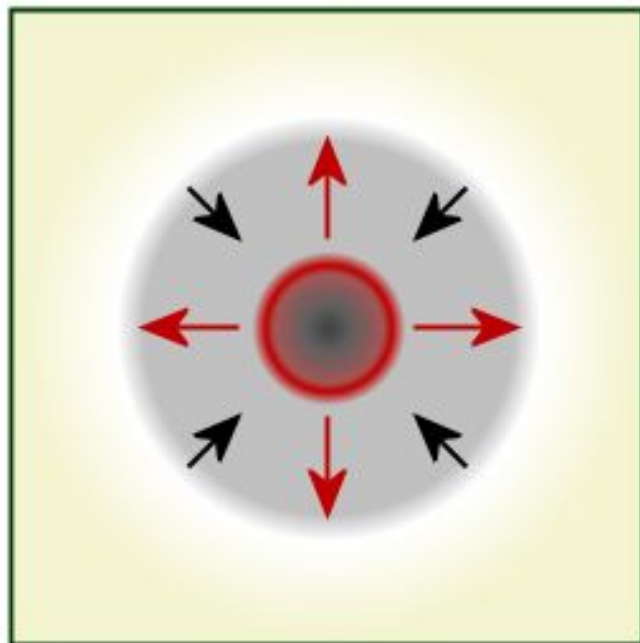
**a**



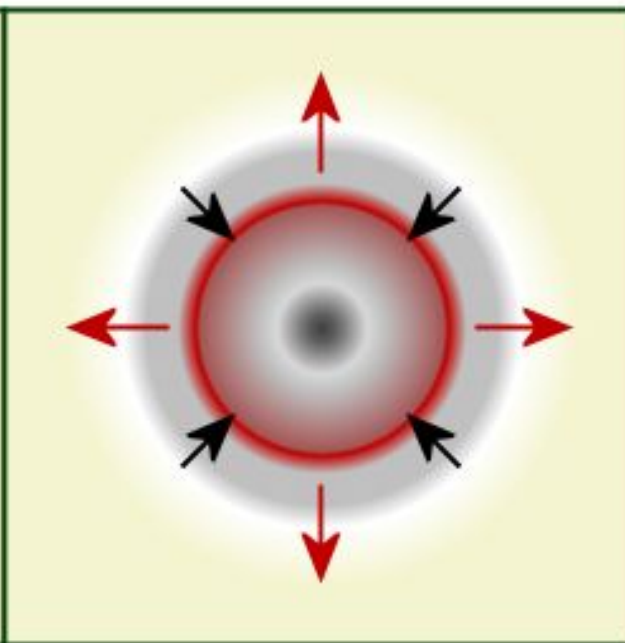
**b**



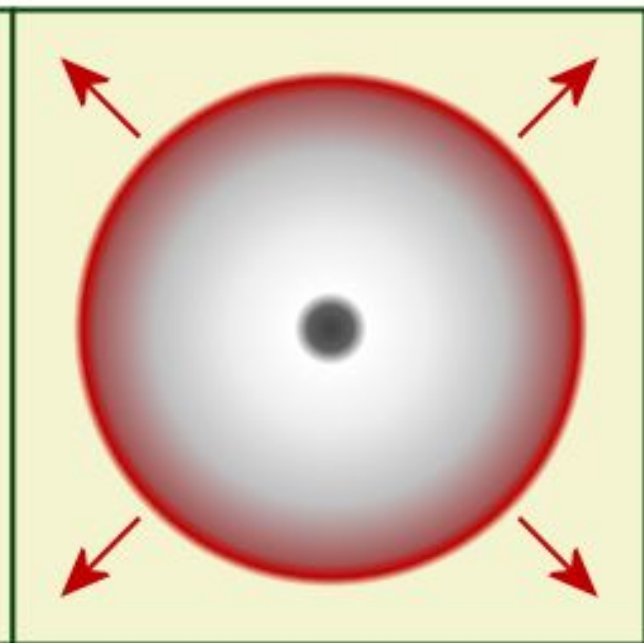
**c**



**d**



**e**

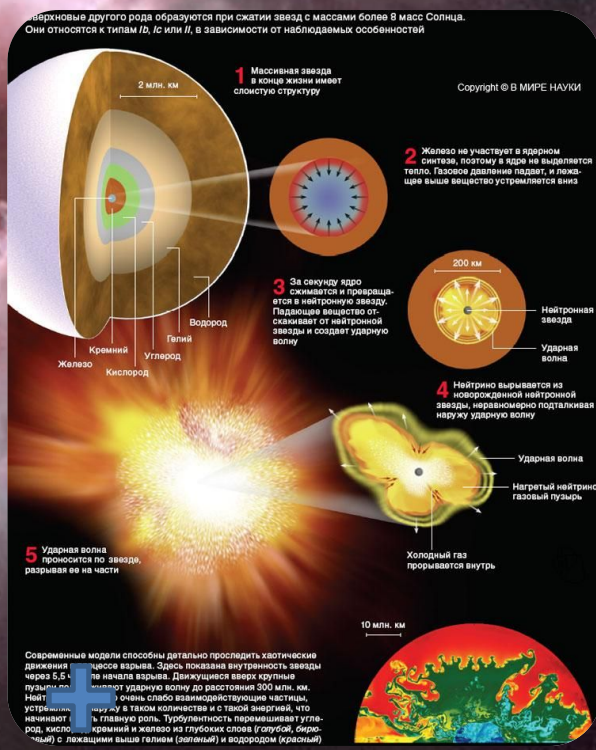
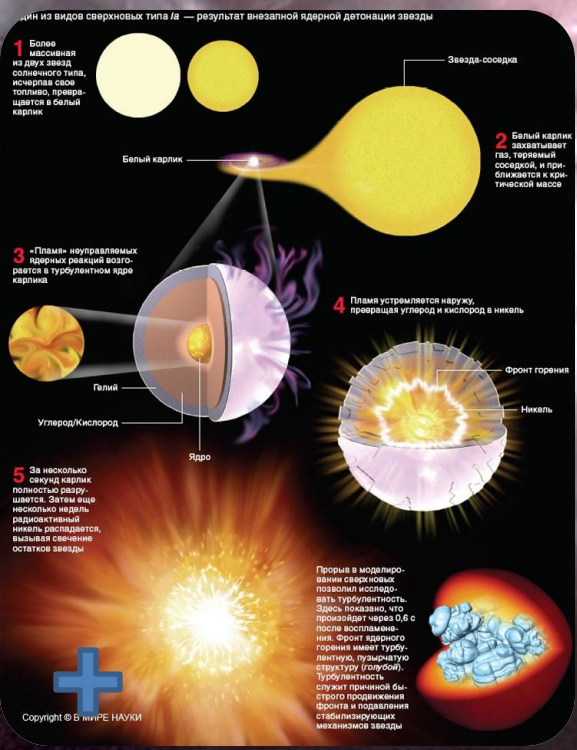


**f**

# Сверхновая

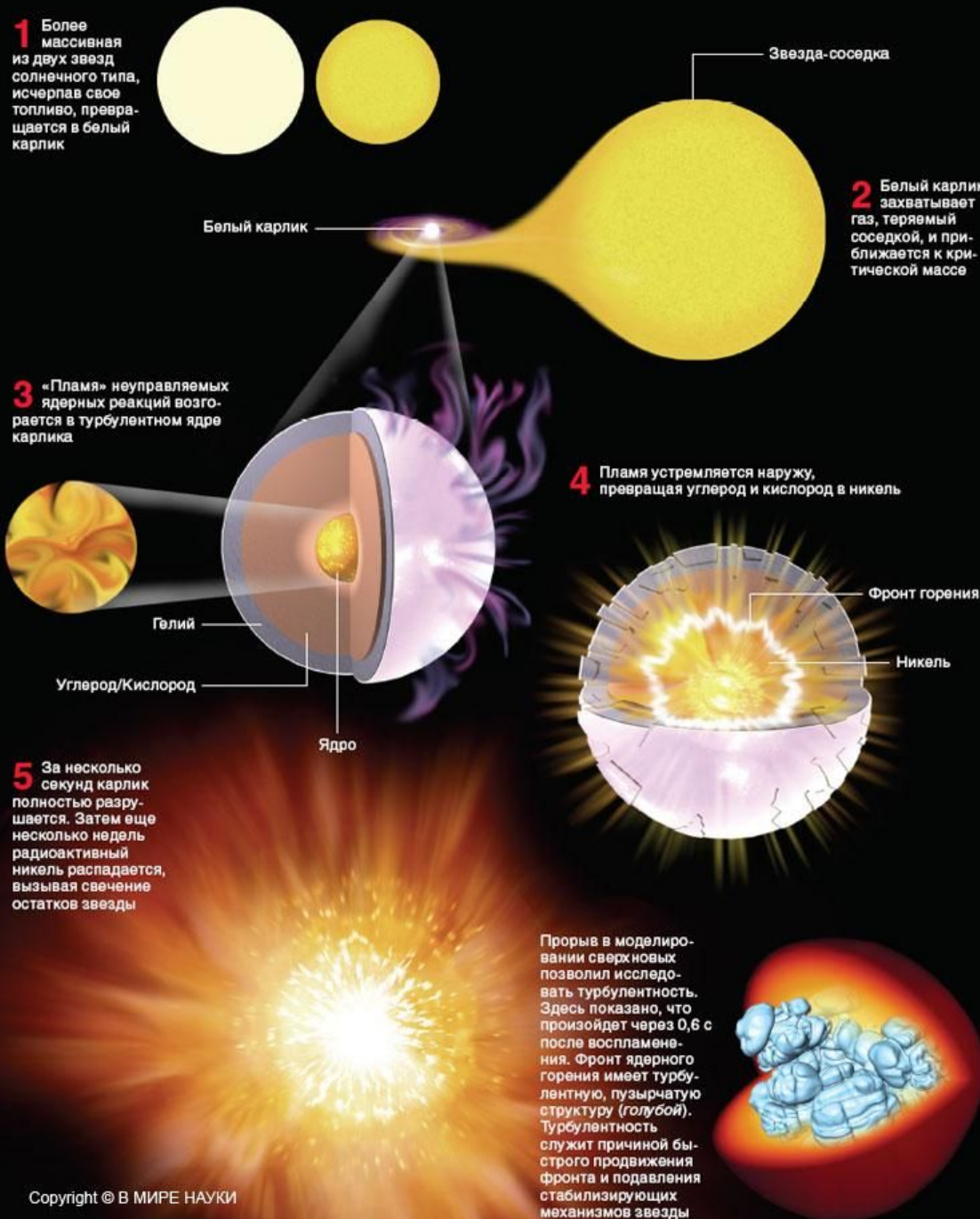
## Наблюдения сверхновых звезд

Для обозначения сверхновых астрономы используют следующую систему: сначала записываются буквы SN (от латинского SuperNova), затем год открытия, а затем латинскими буквами — порядковый номер сверхновой в году. Например, SN 1997cj обозначает сверхновую звезду, открытую 26 \* 3 (c) + 10 (j) = 88-ой по счету в 1997 году.

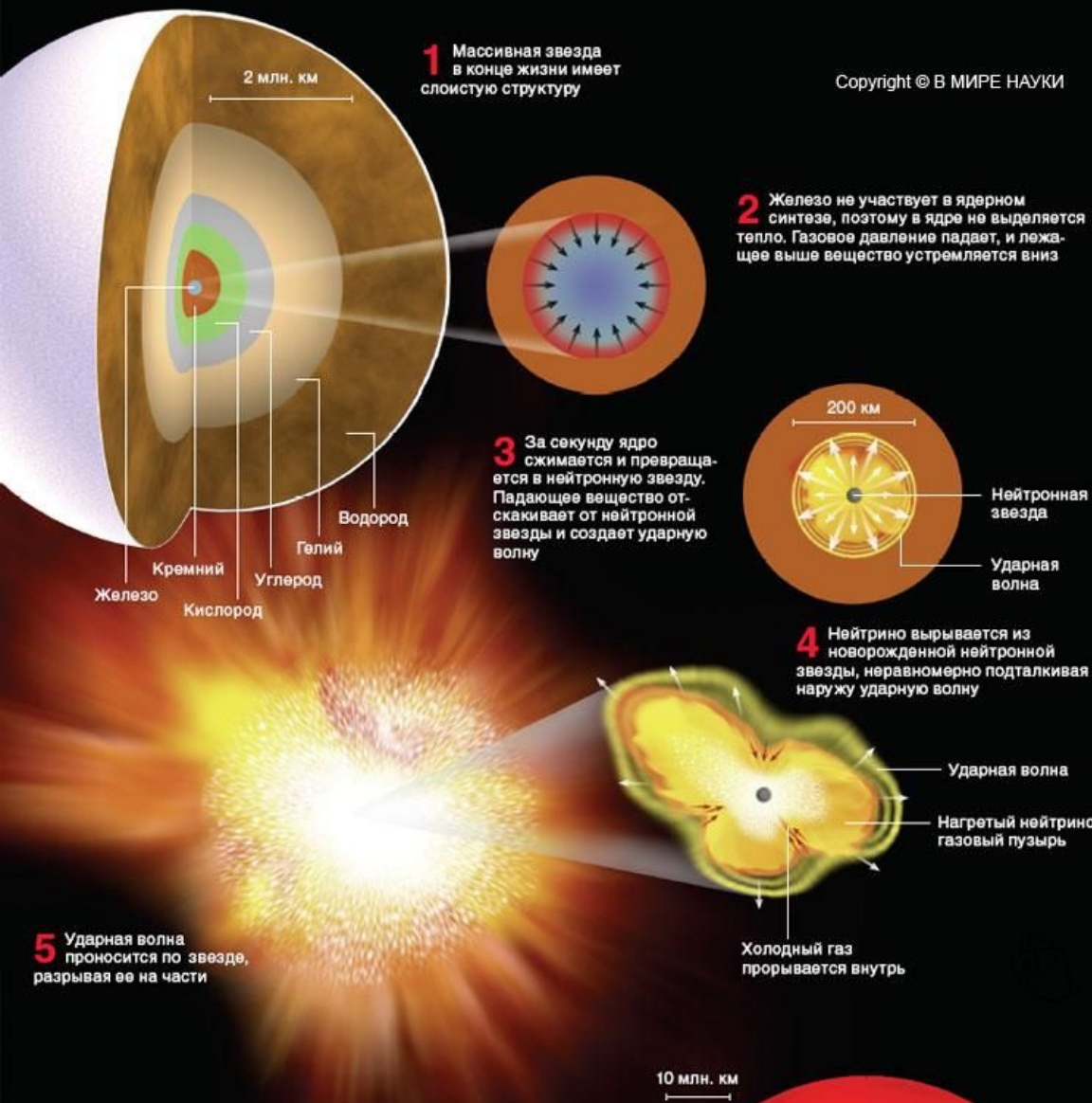




Прорыв в моделировании позволил исследовать турбулентность. Здесь показано, что произойдет через 0,6 с после воспламенения. Фронт ядерного горения имеет турбулентную, пузырьчатую структуру (голубой). Турбулентность служит причиной быстрого продвижения фронта и подавления звезды.

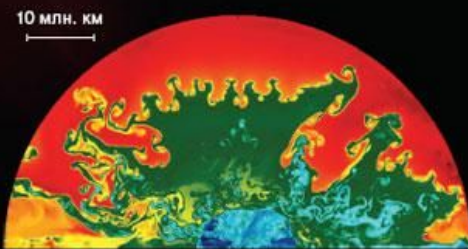


Сверхновые другого рода образуются при сжатии звезд с массами более 8 масс Солнца. Они относятся к типам *Ib*, *Ic* или *II*, в зависимости от наблюдаемых особенностей



Показана внутренность звезды через 5,5 ч после начала взрыва. Движущиеся вверх крупные пузыри поддерживают ударную волну до расстояния 300 млн. км. Турбулентность перемешивает углерод, кислород, кремний и железо из глубоких слоев (голубой, бирюзовый) с лежащими выше гелием (зеленый).

Современные модели способны детально проследить хаотические движения в процессе взрыва. Здесь показана внутренность звезды через 5,5 ч после начала взрыва. Движущиеся вверх крупные пузыри поддерживают ударную волну до расстояния 300 млн. км. Нейтрино, вообще-то очень слабо взаимодействующие частицы, устремляются наружу в таком количестве и с такой энергией, что начинают играть главную роль. Турбулентность перемешивает углерод, кислород, кремний и железо из глубоких слоев (голубой, бирюзовый) с лежащими выше гелием (зеленый) и водородом (красный)



Домашнее задание  
§ 24–25