

Сверхновые звезды: классификация и механизмы вспышек



Семенец Н.В. 23.08.2021г
Астроклуб СПАГО, г.СПетербург

Сверхновая звезда или **вспышка сверхновой** — явление, в ходе которого звезда резко увеличивает свою **яркость** на 4—8 порядков (на 10—20 **звёздных величин**) с последующим сравнительно медленным затуханием вспышки¹

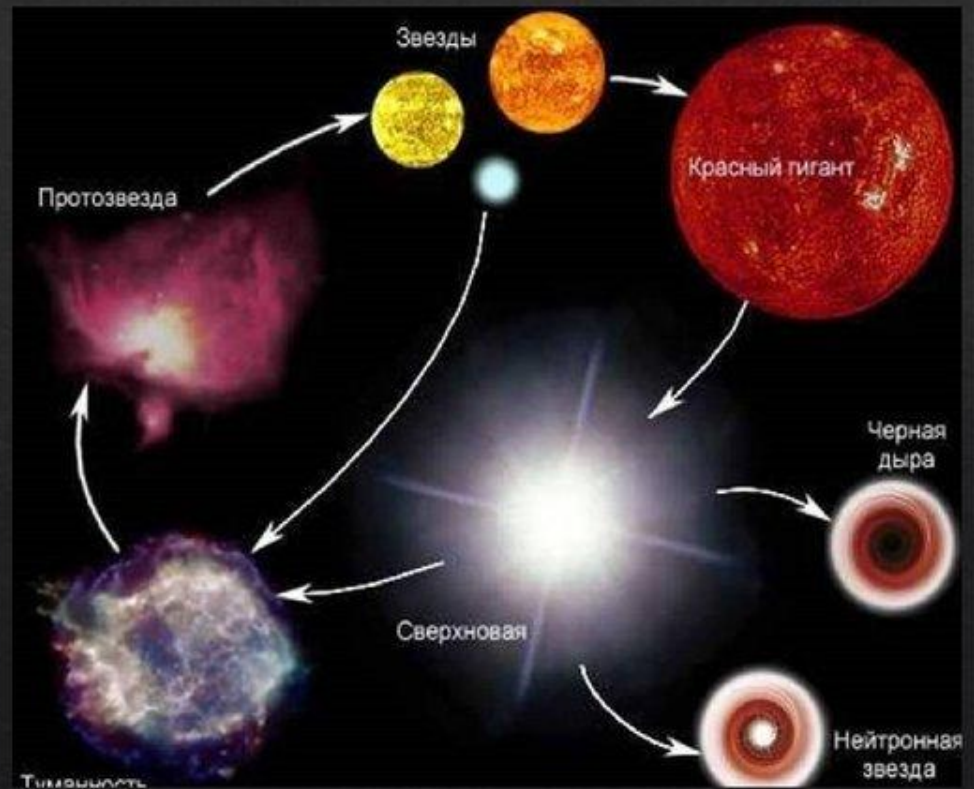
Взрыв сопровождается выбросом значительной массы вещества из внешней оболочки звезды в межзвёздное пространство, а из оставшейся части вещества ядра взорвавшейся звезды, как правило, образуется компактный объект — **нейтронная звезда**, если масса звезды до взрыва составляла более 8 **солнечных масс** (M_{\odot}), либо **чёрная дыра** при массе звезды свыше 40 M_{\odot} (масса оставшегося после взрыва ядра — свыше 5 M_{\odot}). Вместе они образуют остаток сверхновой



Остаток сверхновой **RCW 103** с **нейтронной звездой 1E 161348-5055** в центре

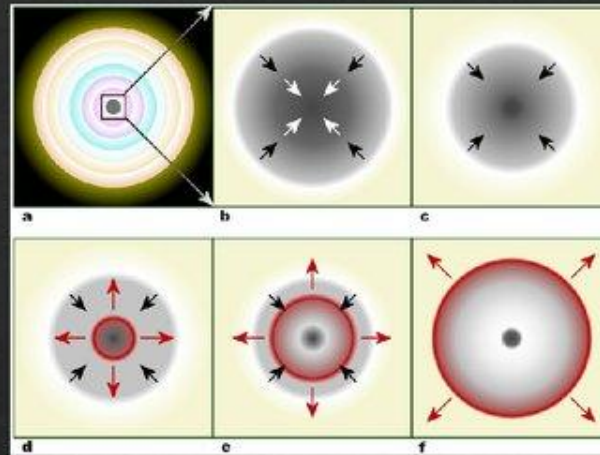
Сверхновые звёзды

Сверхновые похожи по принципу действия на новые, но в результате взрыва звезда преобразуется сильнее.

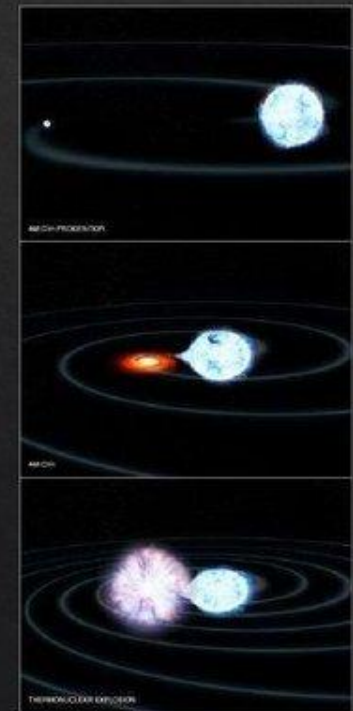


Причины возникновения сверхновые звёзд

Гравитационный коллапс ядра - быстрое сжатие и распад межзвездного облака или звезды под действием собственной силы тяготения.



Термоядерный взрыв – резкое увеличение массы вещества, участвующего в термоядерном горении. Происходит в двойных системах в результате поглощения одной звезды другой.



Современная классификация сверхновых

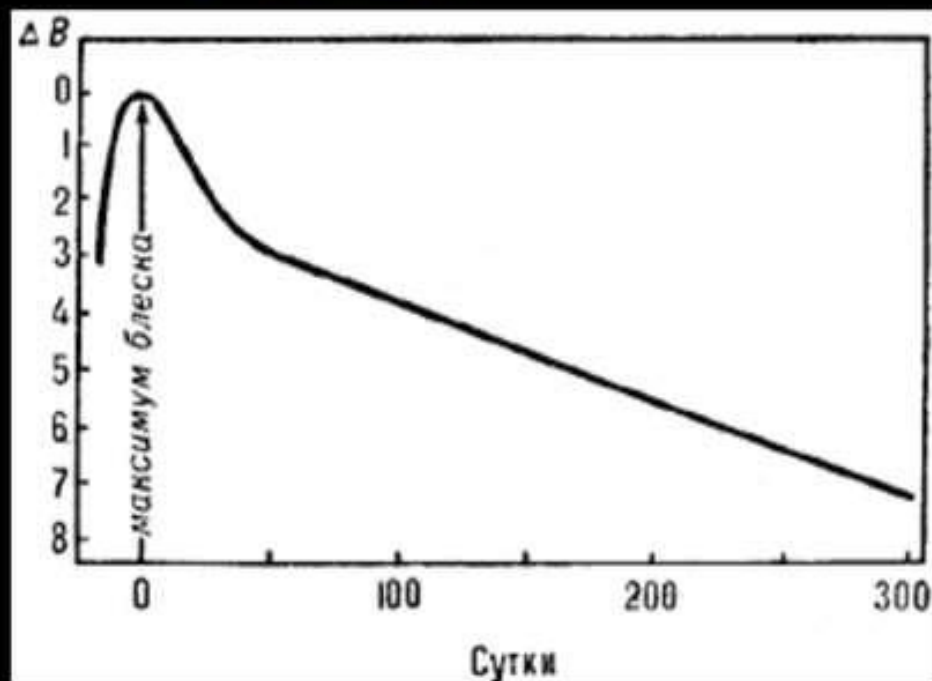
| Класс | Подкласс | | Механизм |
|-----------------------------------|---|--|------------------------|
| I Линии водорода отсутствуют | Сильные линии ионизированного кремния (Si II) на 6150 | Ia | Термоядерный взрыв |
| | | Iax В максимуме блеска имеют меньшую светимость и меньшую же в сравнении Ia | |
| | 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 Кривая блеска имеет плато | Гравитационный коллапс |
| | | II-L Звёздная величина линейно уменьшается со временем | |
| | IIн Присутствуют узкие линии | | |
| | IIб Спектр со временем меняется и становится похожим на спектр Ib. | | |

Классификация.

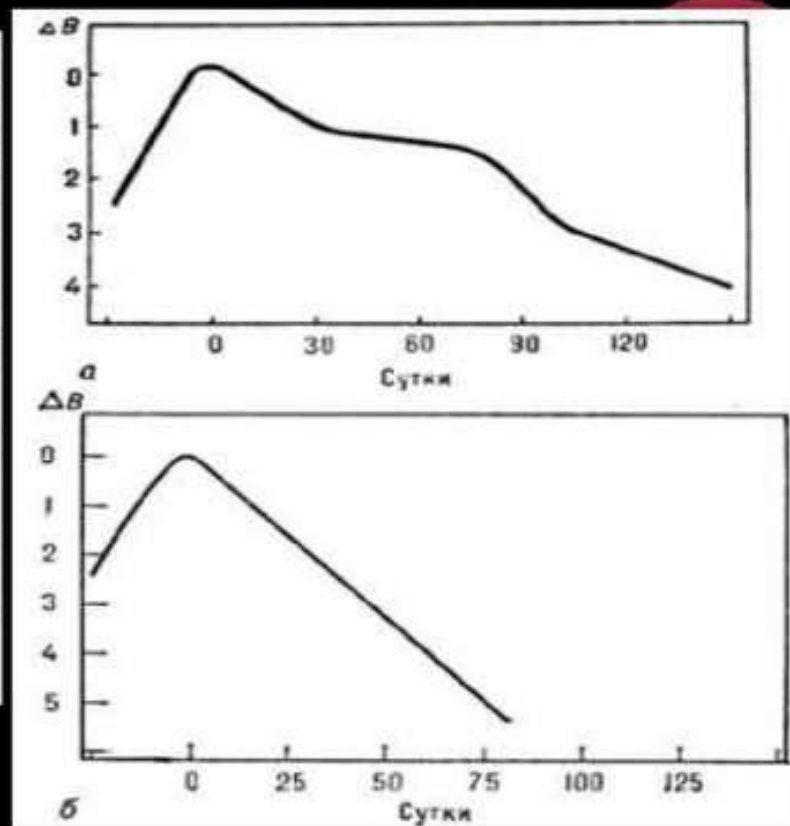
Кривые блеска.



I тип:



II тип:



Кривые блеска для I типа в высокой степени сходны: 2—3 суток идёт резкий рост, затем его сменяет значительное падение (на 3 звёздные величины) 25—40 суток с последующим медленным ослаблением, практически линейным в шкале звёздных величин. Абсолютная звёздная величина максимума в среднем для вспышек Ia составляет $M\{V\}=-19.5m$, для Ib/c — $M\{V\}=-18m$.

Кривые блеска типа II достаточно разнообразны. Для некоторых кривые напоминали оные для I типа, только с более медленным и продолжительным падением блеска до начала линейной стадии. Другие, достигнув пика, держались на нём до 100 суток, а затем блеск резко падал и выходил на линейный «хвост». Абсолютная звёздная величина максимума варьируется в широком диапазоне от $-20m$ до $-13m$. Среднее значение для IIp — $M\{V\}=-18m$, для II-L $M\{V\}=-17m$.

Природа сверхновых Ia отлична от природы остальных вспышек. Об этом ясно свидетельствует отсутствие вспышек Ib\c и II типов в эллиптических галактиках. Из общих сведений о последних известно, что там мало газа и голубых звёзд, а **звездообразование** закончилось 10^{10} лет назад. Это значит, что все массивные звёзды уже завершили свою эволюцию, и из непроэволюционировавших остались только звёзды с массой меньше солнечной. Из теории эволюции звёзд известно, что звёзды подобного типа взорвать невозможно, и, следовательно, нужен механизм продления жизни для звёзд масс $1-2M_{\odot}$.

Отсутствие линий водорода в спектрах Ia\Iax говорит о том, что в атмосфере исходной звезды его крайне мало. Масса выброшенного вещества достаточно велика — $1M_{\odot}$, преимущественно содержит углерод, кислород и прочие тяжёлые элементы. А смещённые линии Si II указывают на то, что во время выброса активно идут ядерные реакции. Всё это убеждает в том, что в качестве звезды-предшественника выступает белый карлик, скорее всего углеродно-кислородный. Тяготение к спиральным рукавам сверхновых Ib\c и II типов свидетельствует, что звездой-прародителем являются короткоживущие O-звёзды с массой $8-10M_{\odot}$.



NGC 4666 in Virgo

Сверхновая типа Ia

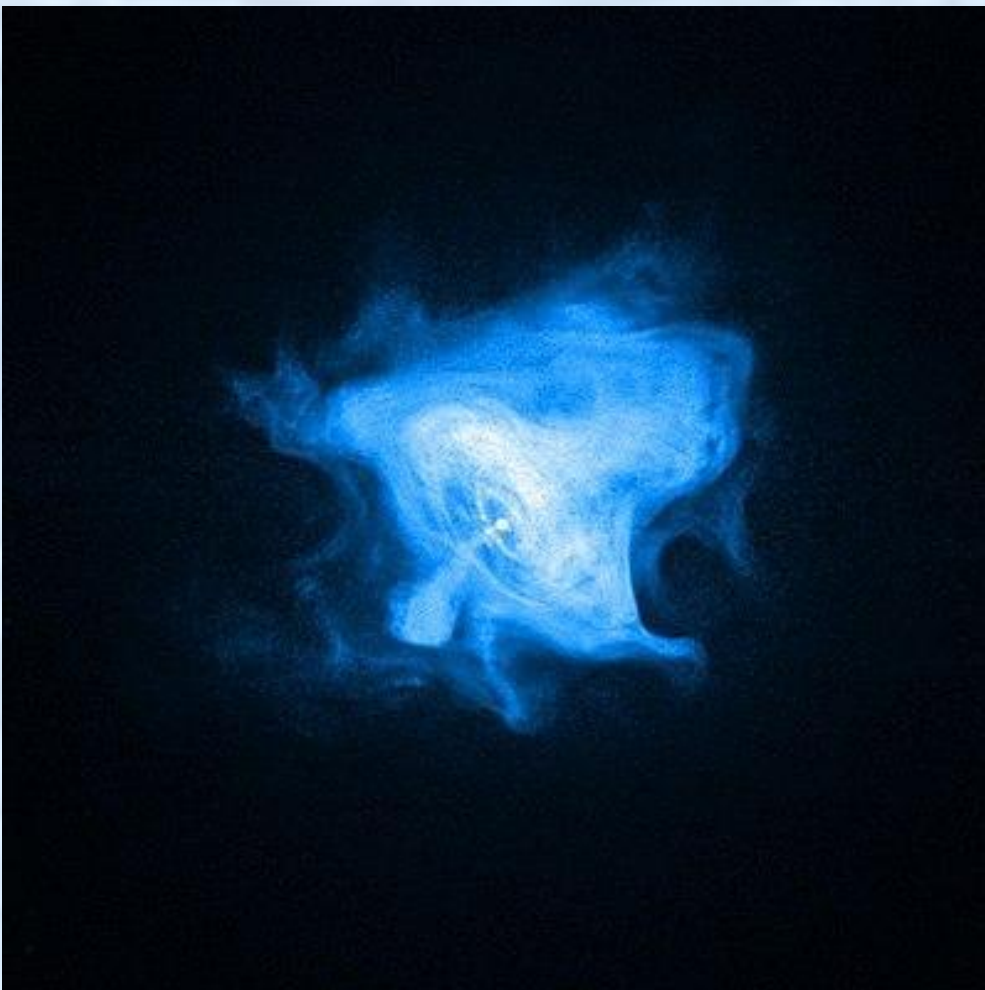
Частота вспышек

| Тип галактики | Ia | Ib/c | II |
|----------------------|------|------|------|
| <u>спиральные</u> | 0,2 | 0,25 | 0,65 |
| <u>эллиптические</u> | 0,31 | нет | нет |

сверхновые Ib/c и II чаще встречаются в спиральных рукавах.

Каноническая схема молодого остатка следующая:

- .Возможный компактный остаток; обычно это **пульсар**, но возможно и **чёрная дыра**.
- .Внешняя ударная волна, распространяющаяся в **межзвёздном веществе**.
- .Возвратная волна, распространяющаяся в веществе выброса сверхновой.
- .Вторичная, распространяющаяся в сгустках межзвёздной среды и в плотных выбросах сверхновой.



Крабовидная туманность (изображение в рентгеновских лучах), хорошо видна внутренняя ударная волна, свободно распространяющийся ветер, а также **полярное струйное течение** (джет)

За фронтом внешней ударной волны газ нагрет до температур $T_s \geq 10^7$ К и излучает в рентгеновском диапазоне с энергией фотонов в 0,1—20 кэВ, аналогично газ за фронтом возвратной волны образует вторую область рентгеновского излучения. Линии высокоионизированных Fe, Si, S и других элементов указывают на тепловую природу излучения из обоих слоёв.

Оптическое излучение молодого остатка создаёт газ в сгустках за фронтом вторичной волны. Так как в них скорость распространения выше, а, значит, газ остывает быстрее, и излучение переходит из рентгеновского диапазона в оптический. Ударное происхождение оптического излучения подтверждает относительная интенсивность линий.

Волокна в [Кассиопее А](#) дают понять, что происхождение сгустков вещества может быть двояким. Так называемые быстрые волокна разлетаются со скоростью 5000—9000 км/с и излучают только в линиях O, S, Si — то есть это сгустки, сформированные в момент взрыва сверхновой. Стационарные конденсации же имеют скорость 100—400 км/с, и в них наблюдается нормальная концентрация H, N, O. Вместе это свидетельствует, что это вещество было выброшено задолго до вспышки сверхновой и позже было нагрето внешней ударной волной.

[Синхротронное радиоизлучение](#) релятивистских частиц в сильном магнитном поле является основным наблюдательным признаком для всего остатка. Область его локализации — прифронтовые области внешней и возвратной волн. Наблюдается синхротронное излучение и в рентгеновском диапазоне

Типы сверхновых звезд

Сверхновые первого типа

Взрыв белого карлика, входящего в двойную систему за счет нарушения баланса из-за перетекания вещества.

Карлик быстро сжимается (КОЛЛАПС) до размеров нейтронной звезды.

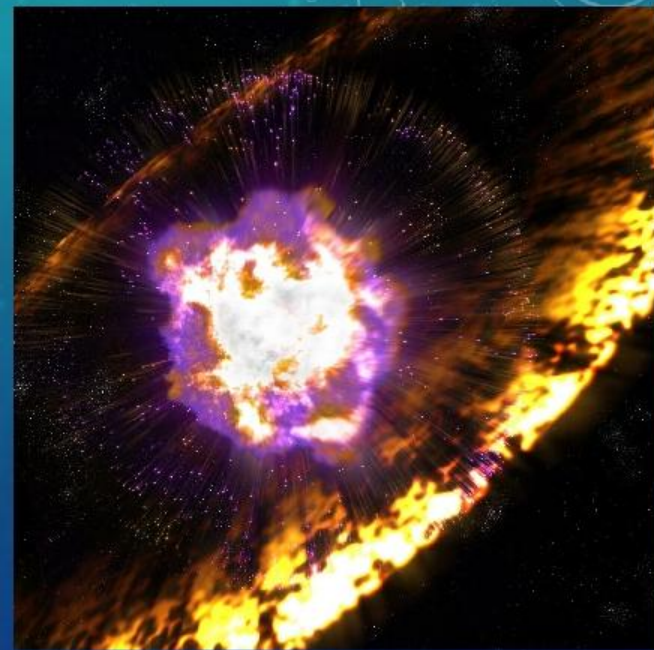
Сверхновые второго типа

Взрыв массивной звезды на стадии гигантов и сверхгигантов, в результате чего происходит коллапс ядра и «разброс» частей звезды с большими скоростями



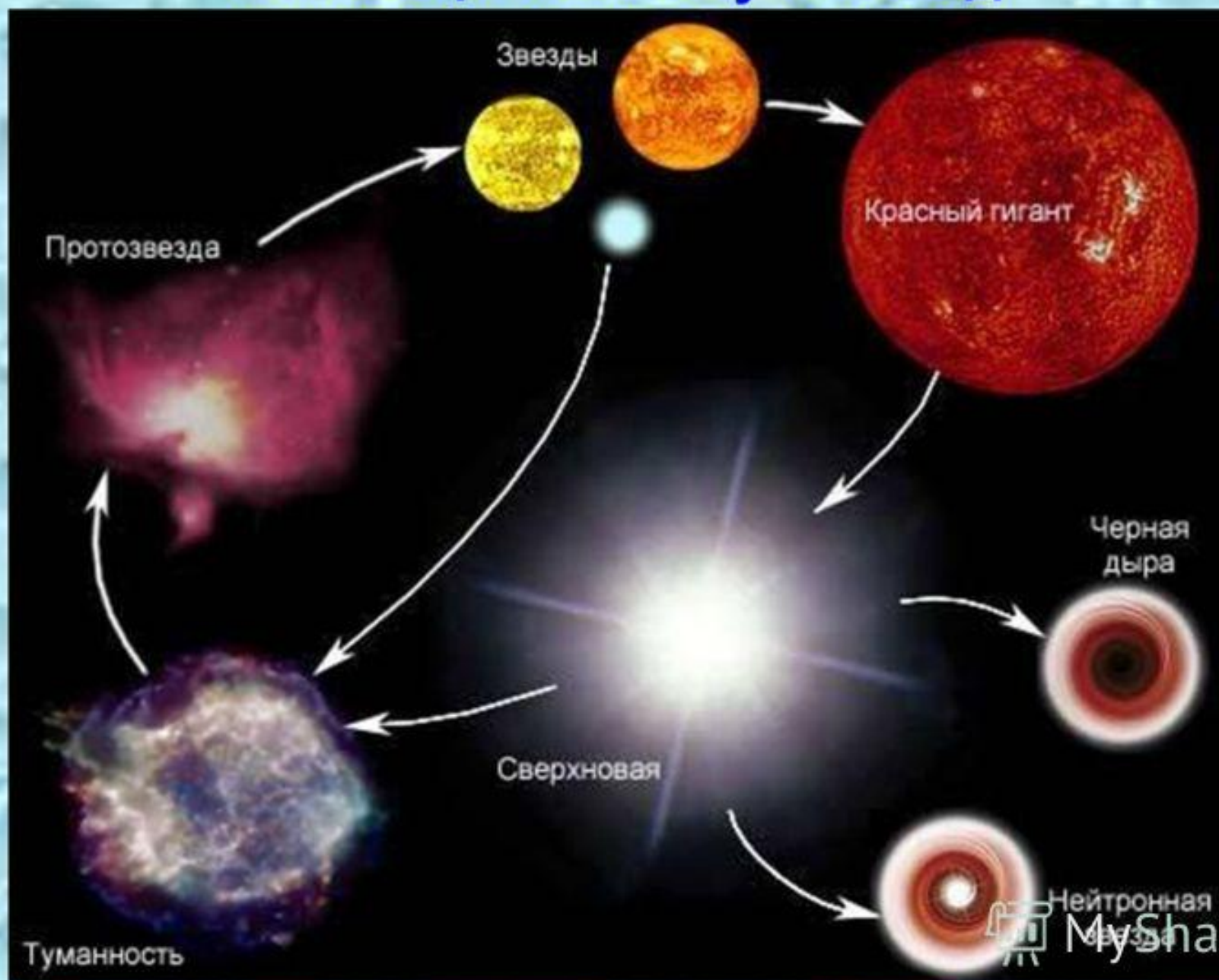
«механизм» взрыва сверхновой звезды

- Звезда живет за счет энергии термоядерных реакций (водород превращается в гелий);
- При окончании водорода верхние слои звезды начинают обрушиваться к центру;
- При достижении критической отметки вещество взрывается сильно сжимая ядро;
- Оболочка звезды разносится ударной волной и выбрасывается в космос, образуя туманность;
- Ядро становится либо нейтронной звездой, либо черной дырой.



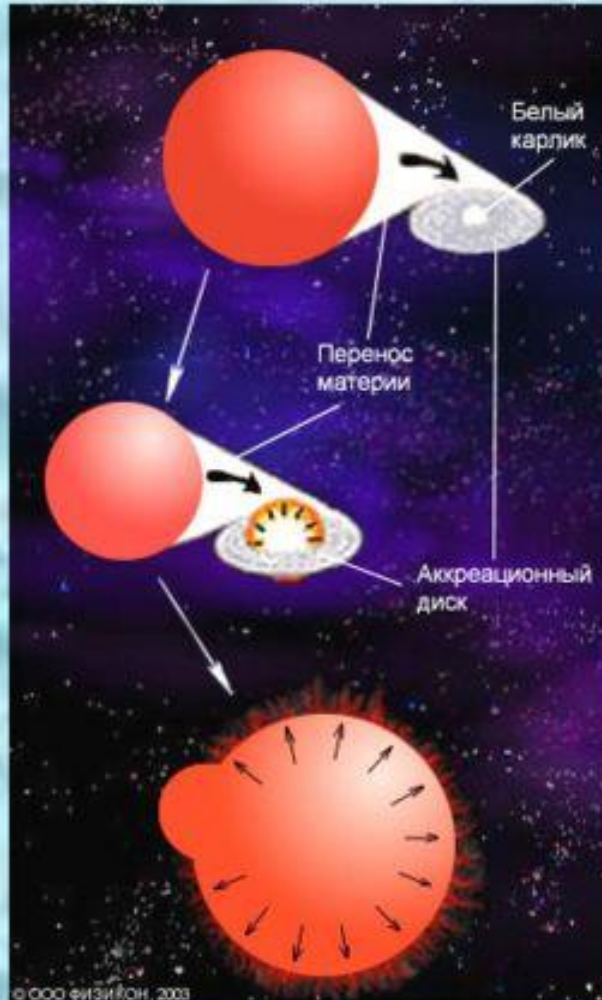


Эволюционные пути звезд



Типы сверхновых

По характеру спектра вблизи эпохи максимума различают два типа сверхновых. Только четверть всех сверхновых связана с коллапсом ядер массивных звезд (вспышки II типа и типа Ib). Многие сверхновые образуются при коллапсе (или взрыве) белых карликов (вспышки Ia).



Сверхновые I типа

Сверхновые I типа вблизи максимума отличаются непрерывным спектром, в котором не видно никаких линий. Позднее появляются в спектре линии поглощения, сильно расширенные.

Сверхновые II типа характеризуются спектром, богатым водородными линиями. Их светимость меняется в широких пределах, а после максимума падает более резко, чем у сверхновых I типа.

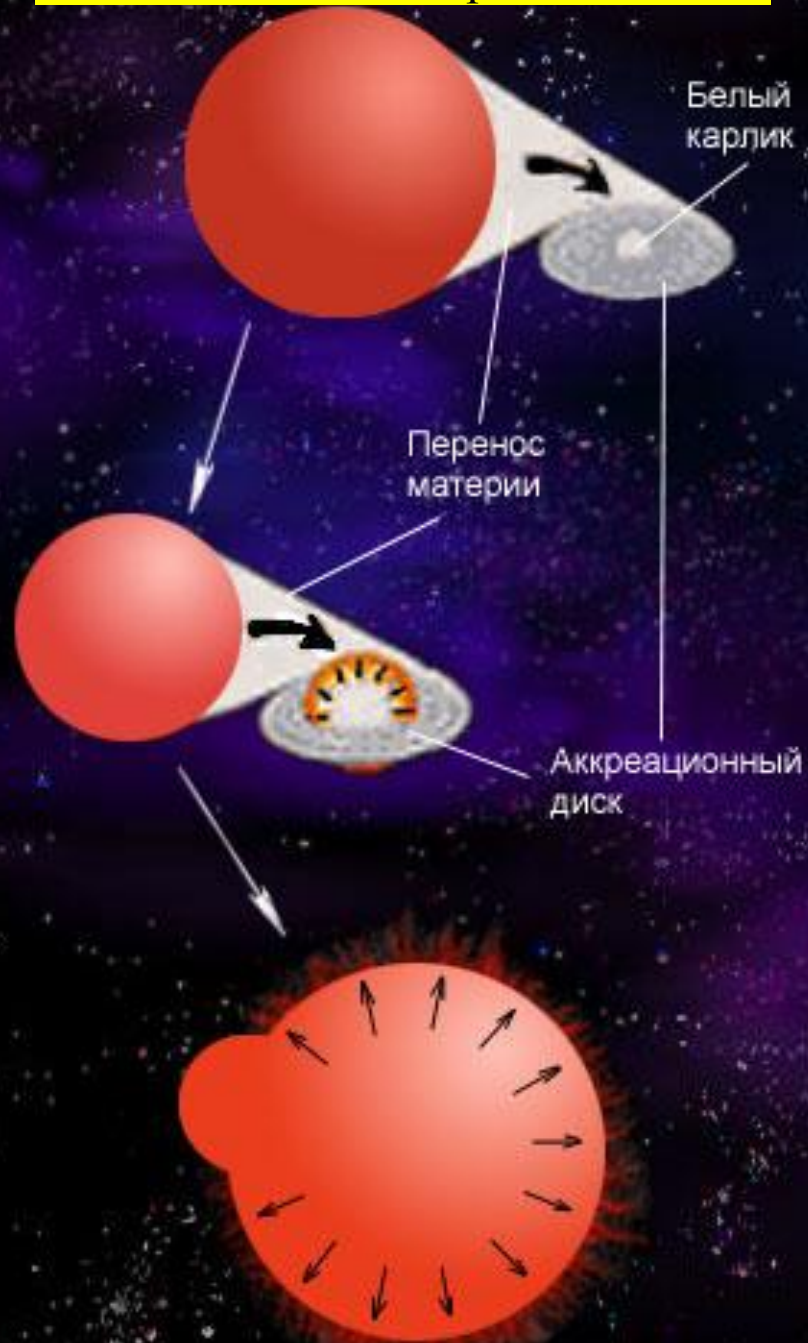
В эллиптических галактиках, состоящих из небольших красных звезд, вспыхивают сверхновые I типа, а в спиральных, где в рукавах много молодых массивных горячих сверхгигантов, вспыхивают

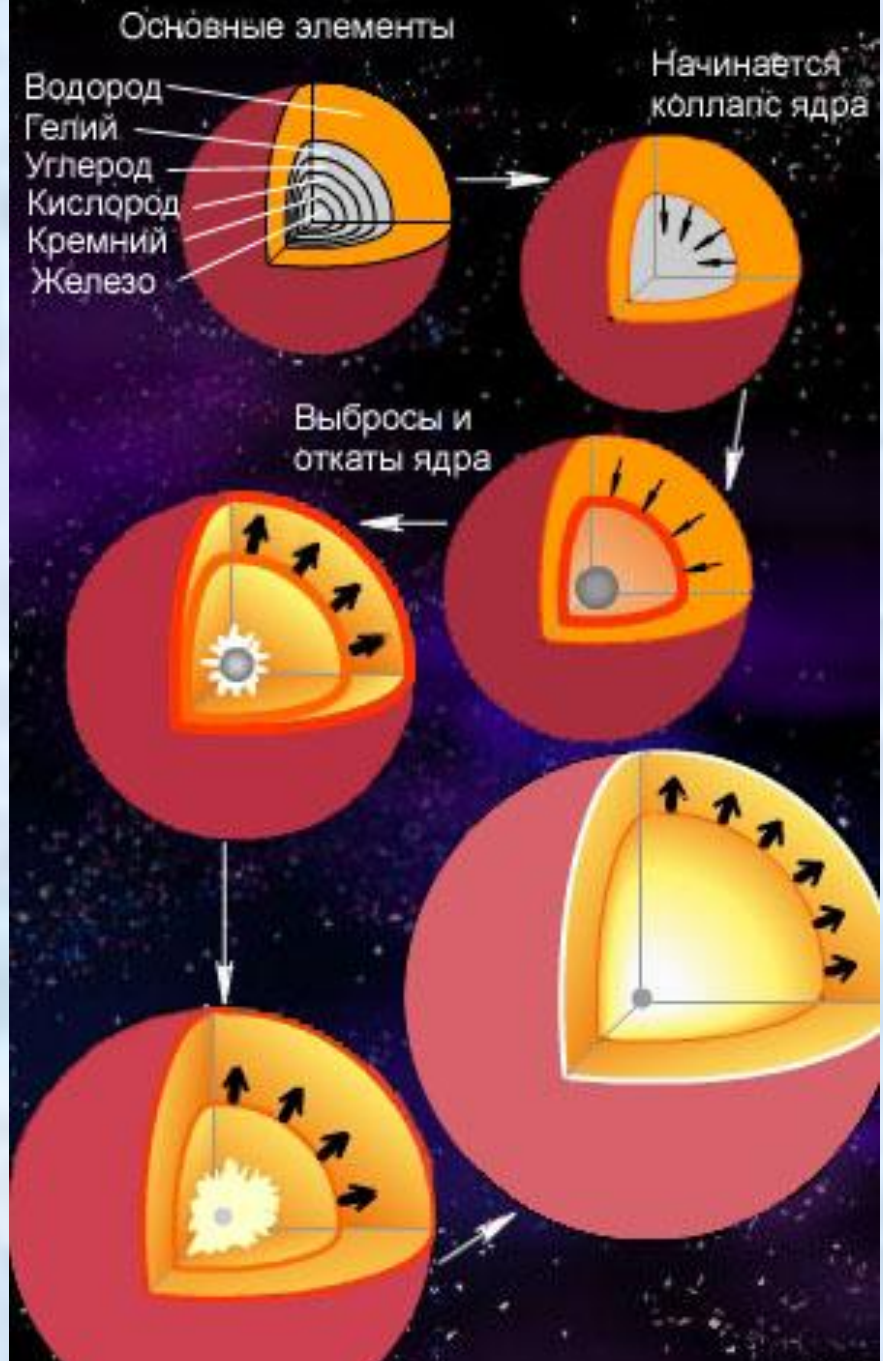
сверхновые II типа



Сверхновые II типа

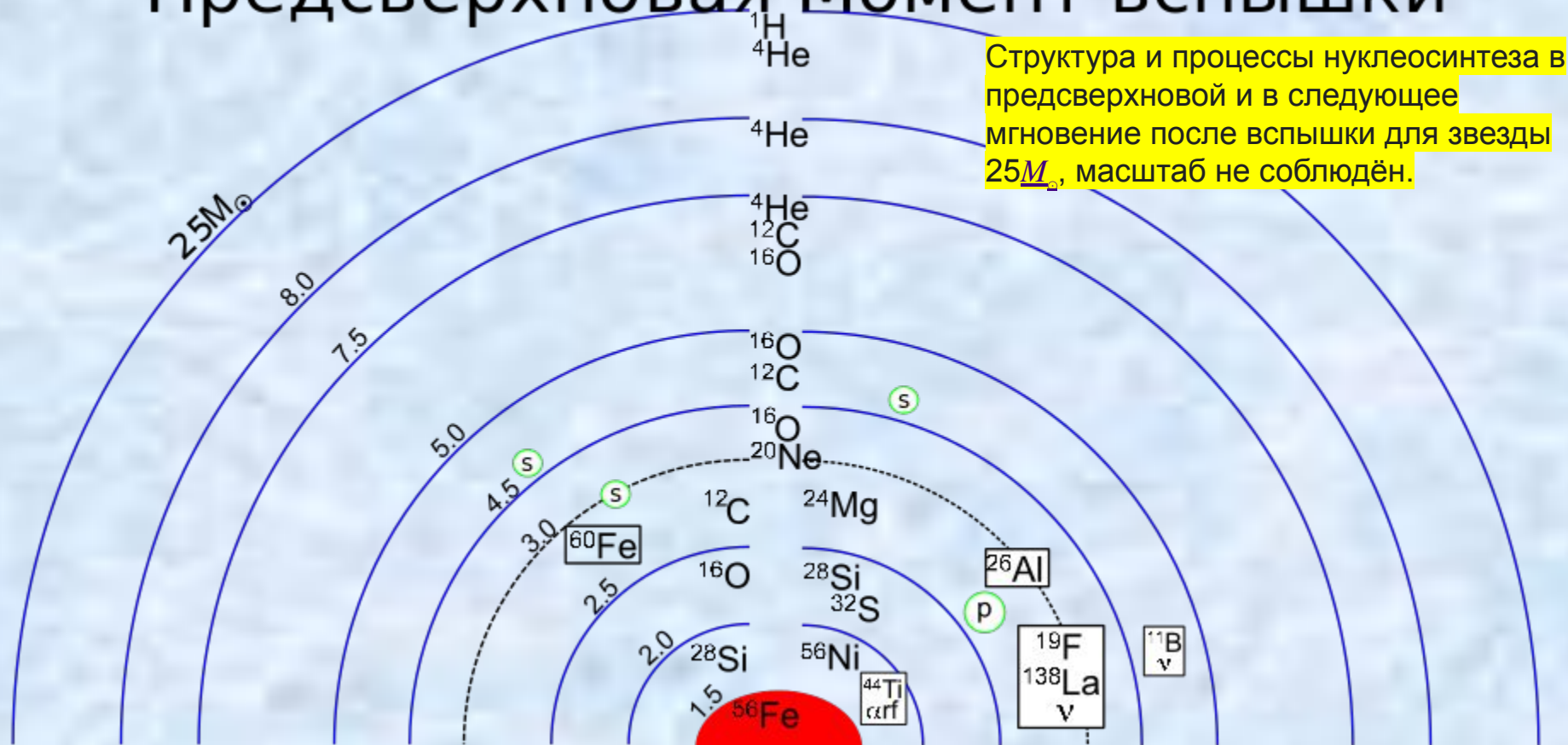
Модель вспышки сверхновой I типа





Модель вспышки сверхновой II типа

Предсверхновая Момент вспышки



Структура и процессы нуклеосинтеза в предсверхновой и в следующее мгновение после вспышки для звезды $25M_{\odot}$, масштаб не соблюден.

Взрывы сверхновых — основной источник пополнения межзвёздной среды элементами с атомными номерами больше (или, как говорят, *тяжелее*) He. Однако процессы, их породившие, для различных групп элементов и даже изотопов свои.

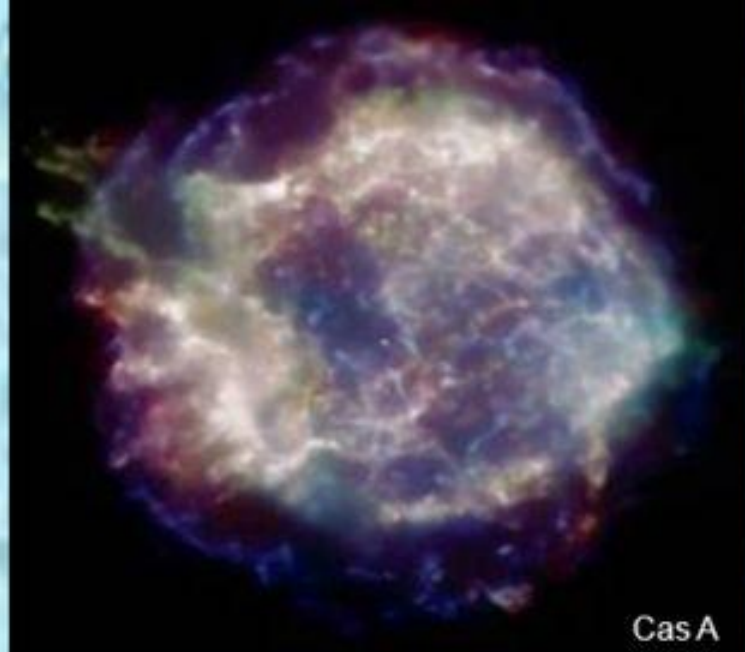
.Практически все элементы тяжелее He и до Fe — результат классического термоядерного синтеза, протекающего, например, в недрах звёзд или при взрыве сверхновых в ходе **p-процесса**. Тут стоит оговориться, что крайне малая часть всё же была получена в ходе первичного нуклеосинтеза.

.Все элементы тяжелее ^{209}Bi — это результат r-процесса.

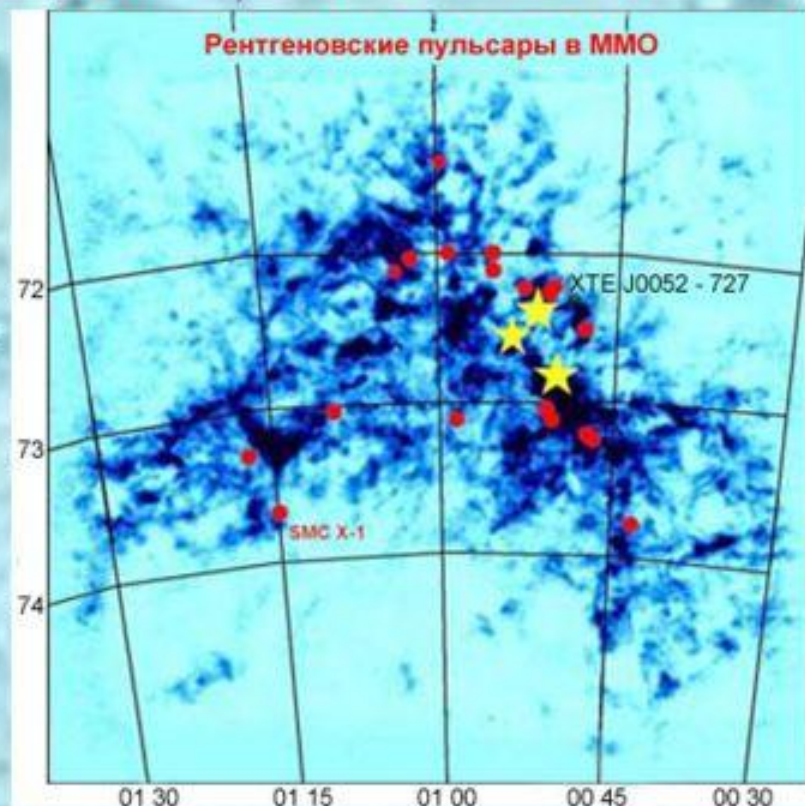
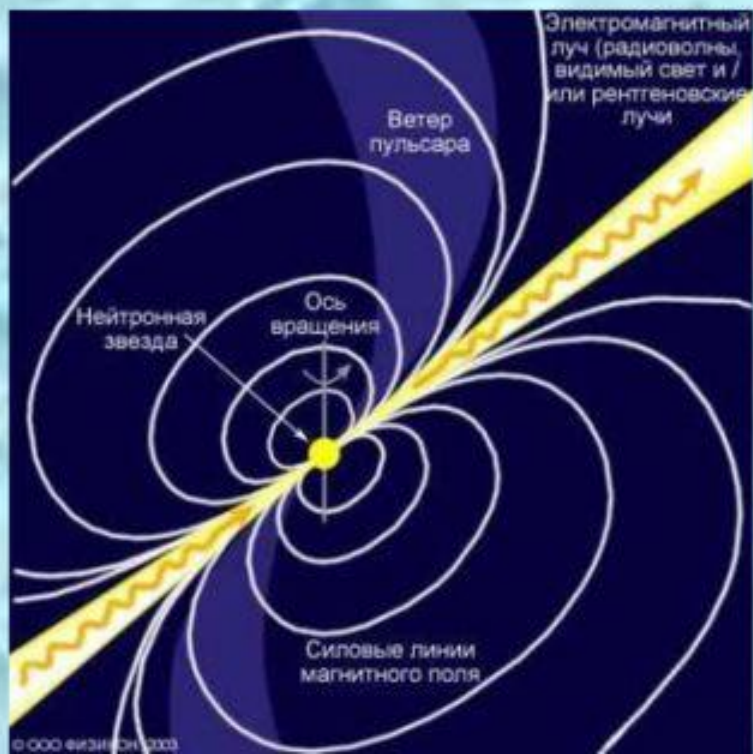
.Происхождение же прочих является предметом дискуссии, в качестве возможных механизмов предлагаются **s**-, r-, v-, и **rp-процессы**

Пульсар

Остаток сверхновой в центре образованной туманности - нейтронная звезда (**пульсар**), обнаруживаемый по его радиоизлучению. Массы не превосходящей трех солнечных и размером в 20-30 км, плотность $\sim 2 \times 10^{14}$ г/см³



Cas A – Кассиопея А туманность, мощный источник радиоизлучения. Внутри пульсар.

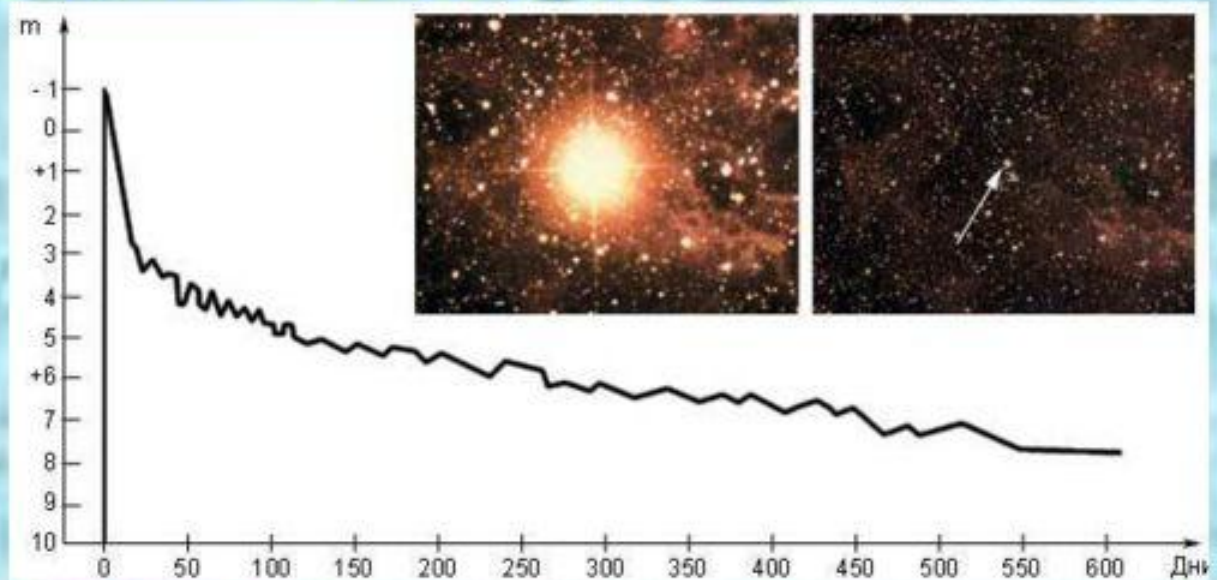


Нейтронные звезды рентгеновских пульсаров обладают очень сильным магнитным полем, достигающим значений 10^8 – 10^9 Тл (в 10^{11} – 10^9 раз больше магнитного поля Солнца). Рентгеновские пульсары располагаются преимущественно в диске Галактики.

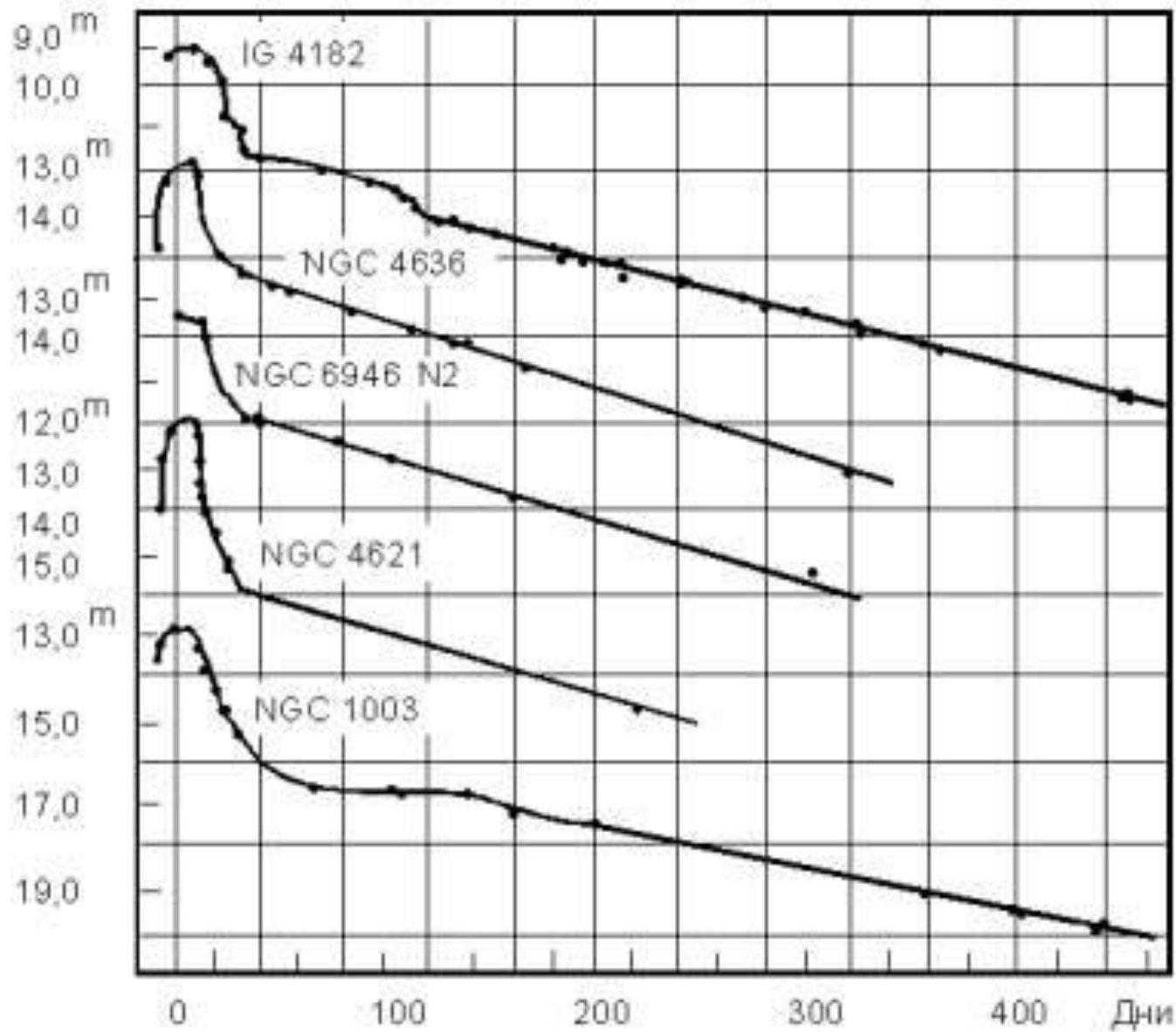
Сверхновая 1987А



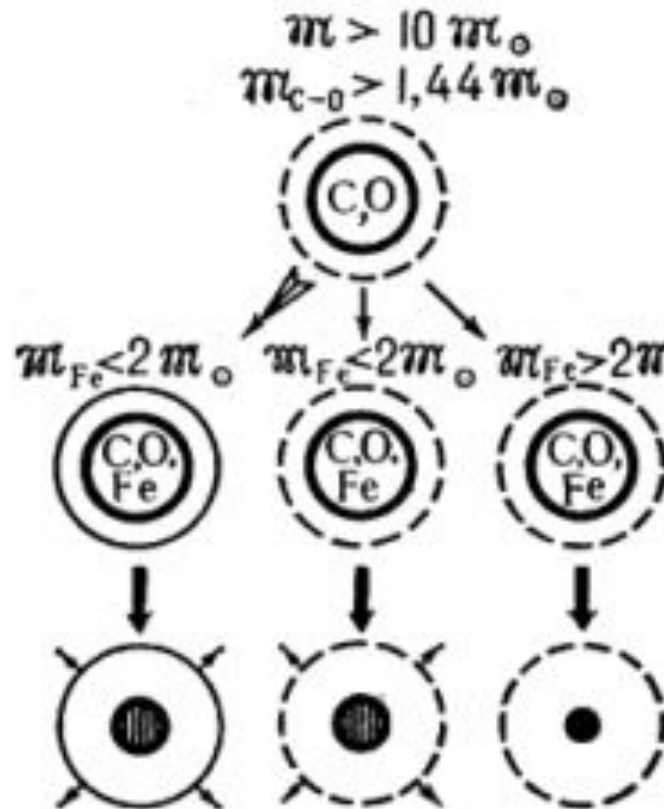
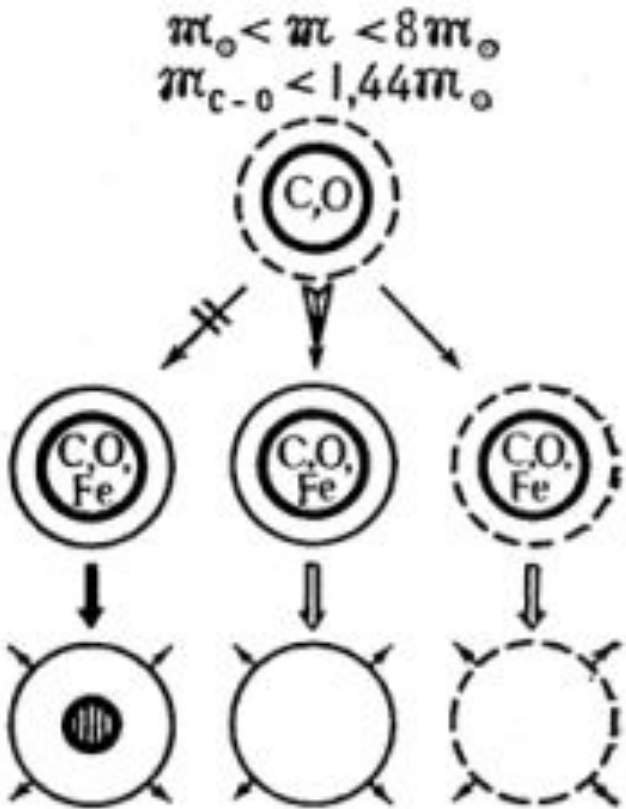
Сверхновая 1987А через 4 года после вспышки. Кольцо светящегося газа в 1991 году достигло 1,37 светового года в поперечнике. Внизу через 12 лет.



Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке расположена там, где на старых фотографиях была лишь звездочка 12-й величины. Ее величина в максимуме достигла $2,9^m$, что позволяло легко наблюдать сверхновую невооруженным глазом



Изменение блеска сверхновых I типа. (Из книги И.С. Шкловского "Сверхновые звезды и связанные с ними проблемы").



- оболочка с водородом
- оболочка без водорода
- нейтронная звезда
- термоядерный взрыв
- гравитационный коллапс
- чёрная дыра
- вспышка сверхновой I типа

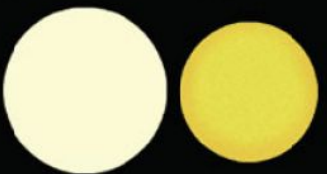
- эволюция в тесной двойной системе
- эволюция с интенсивной потерей массы
- эволюция с умеренной потерей массы
- вспышка сверхновой II типа

Схема возможных путей образования сверхновых звезд.

m - масса звезды на главной последовательности,
 m_{C-O} - масса углеродно-кислородного ядра,
 m_{Fe} - масса железного ядра.

Механизм взрыва сверхновых Ia типа

1 Более массивная из двух звезд солнечного типа, исчерпав свое топливо, превращается в белый карлик

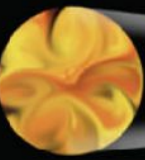


Звезда-соседка

Белый карлик

2 Белый карлик захватывает газ, теряемый соседкой, и приближается к критической массе

3 «Пламя» неуправляемых ядерных реакций возгорается в турбулентном ядре карлика



4 Пламя устремляется наружу, превращая углерод и кислород в никель

Гелий

Углерод/Кислород

Ядро

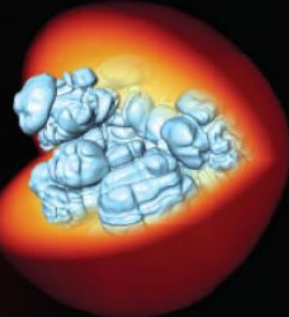
Фронт горения

Никель

5 За несколько секунд карлик полностью разрушается. Затем еще несколько недель радиоактивный никель распадается, вызывая свечение остатков звезды

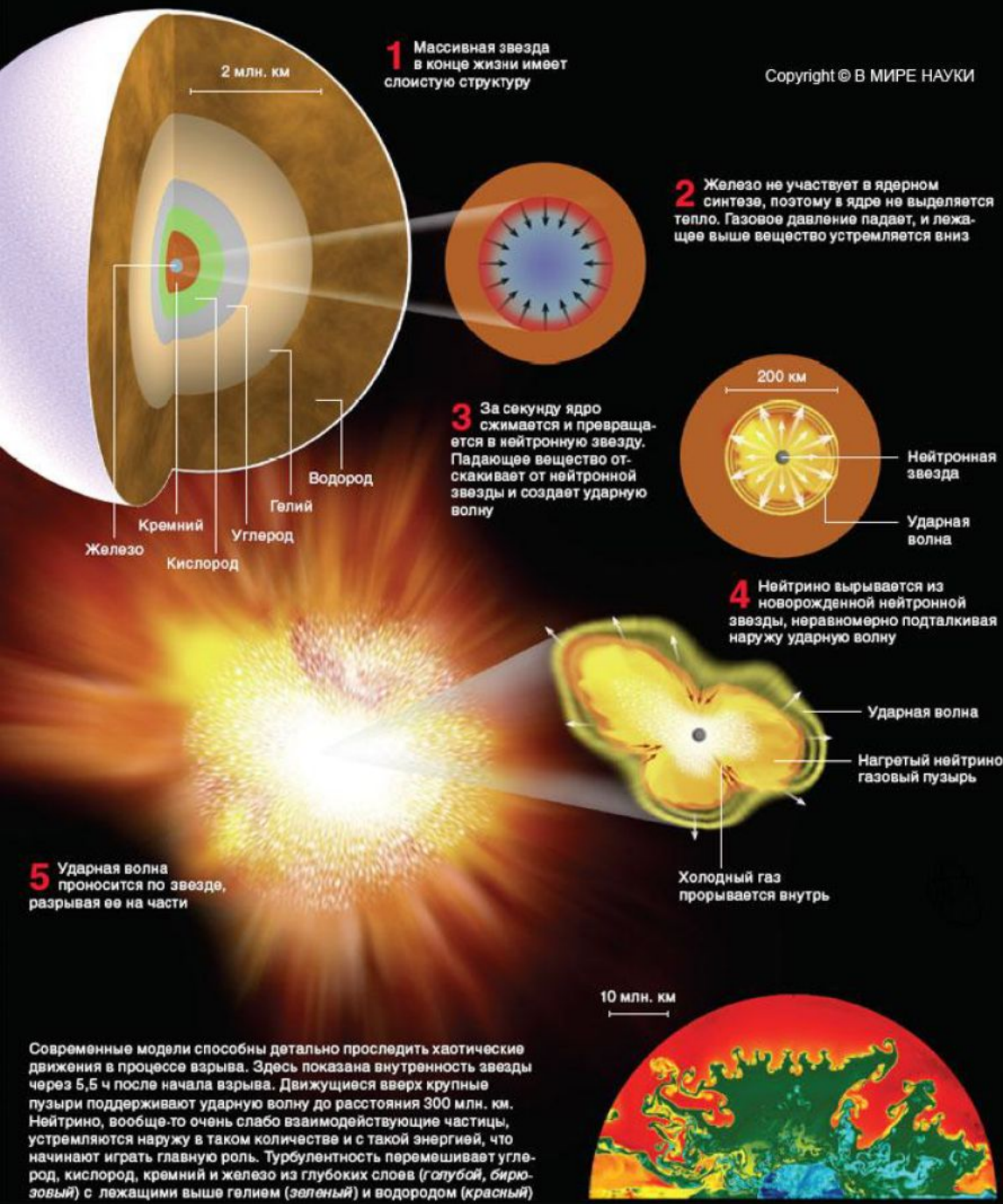


Прорыв в моделировании сверхновых позволил исследовать турбулентность. Здесь показано, что произойдет через 0,6 с после воспламенения. Фронт ядерного горения имеет турбулентную, пузырчатую структуру (голубой). Турбулентность служит причиной быстрого продвижения фронта и подавления стабилизирующих механизмов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



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

Механизм взрыва сверхновых II, Ib/c типов

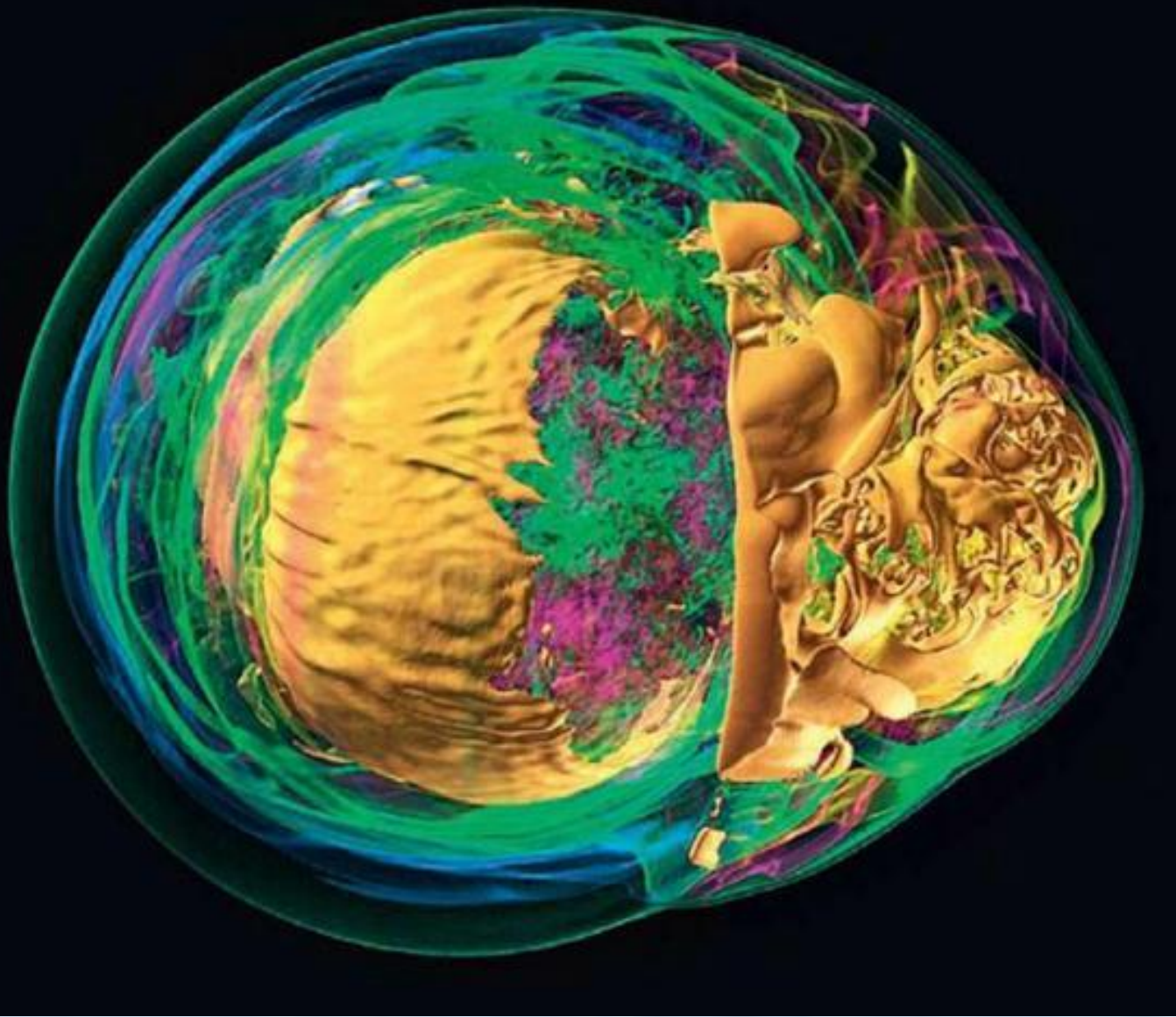






Взрывы сверхновых звезд это движущая сила круговорота материи. Они извергают «галактические фонтаны» потоки газа, из которого формируются новые звезды.





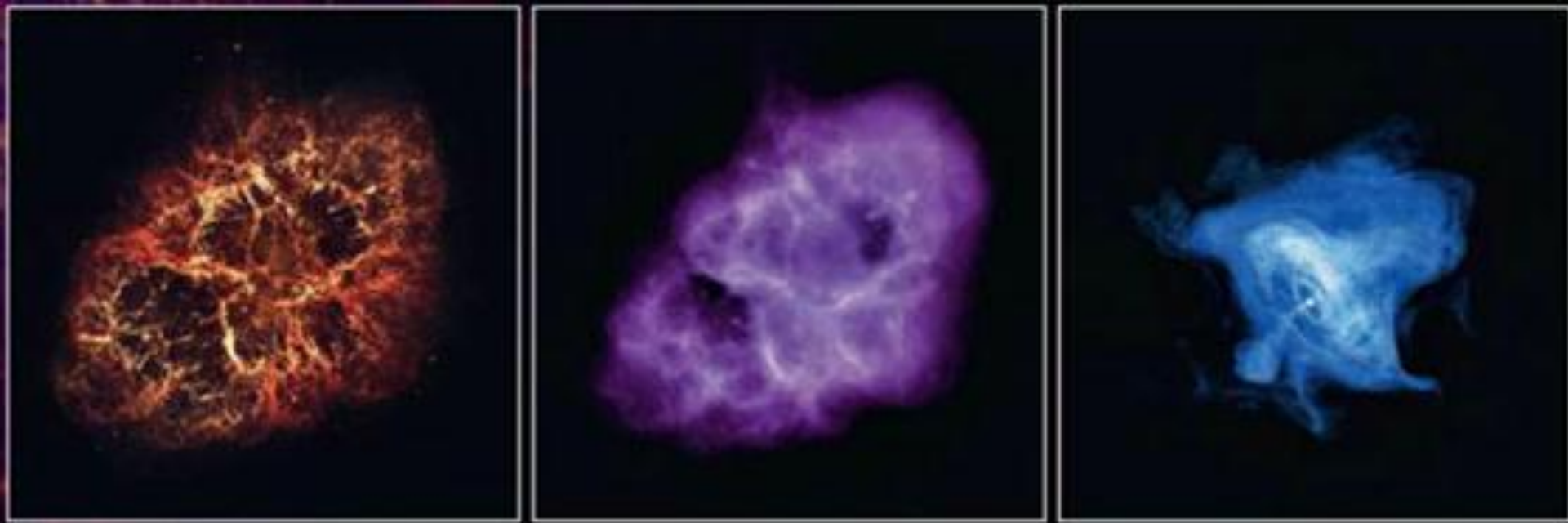
как показывают компьютерные модели, вещество внутри взрывающейся звезды бурлит и перемешивается, разогревая ее до 50 млрд градусов по шкале Кельвина.

много споров вызывает механизм взрыва.

Чаще всего модели можно разделить по следующим группам:

- Мгновенная детонация.
- Отложенная детонация.
- Пульсирующая отложенная детонация.
- Турбулентное быстрое горение.

По крайней мере для каждой комбинации начальных условий перечисленные механизмы можно встретить в той или иной вариации. Но этим круг предложенных моделей не ограничивается. В качестве примера можно привести модели, когда детонируют сразу два белых карлика. Естественно, это возможно только в тех сценариях, когда оба компонента проэволюционировали.



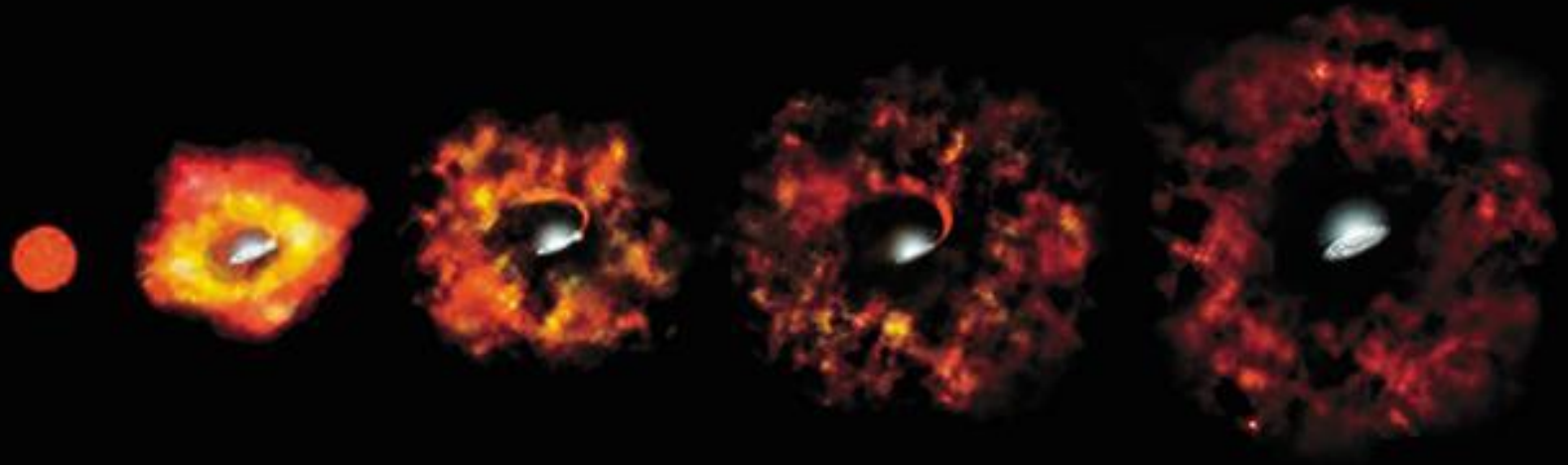
Гигантская Крабовидная туманность в созвездии Тельца образовалась в результате взрыва сверхновой. Ее вспышка наблюдалась в 1054 году даже днем. Это газовое облако, расширяющееся со скоростью 1500 километров в секунду, светится в двух диапазонах: оптическом (фото слева) и инфракрасном (в середине). В его центре находится нейтронная звезда - сжатое ядро первоначального светила. Оно испускает энергонасыщенное рентгеновское излучение (справа).



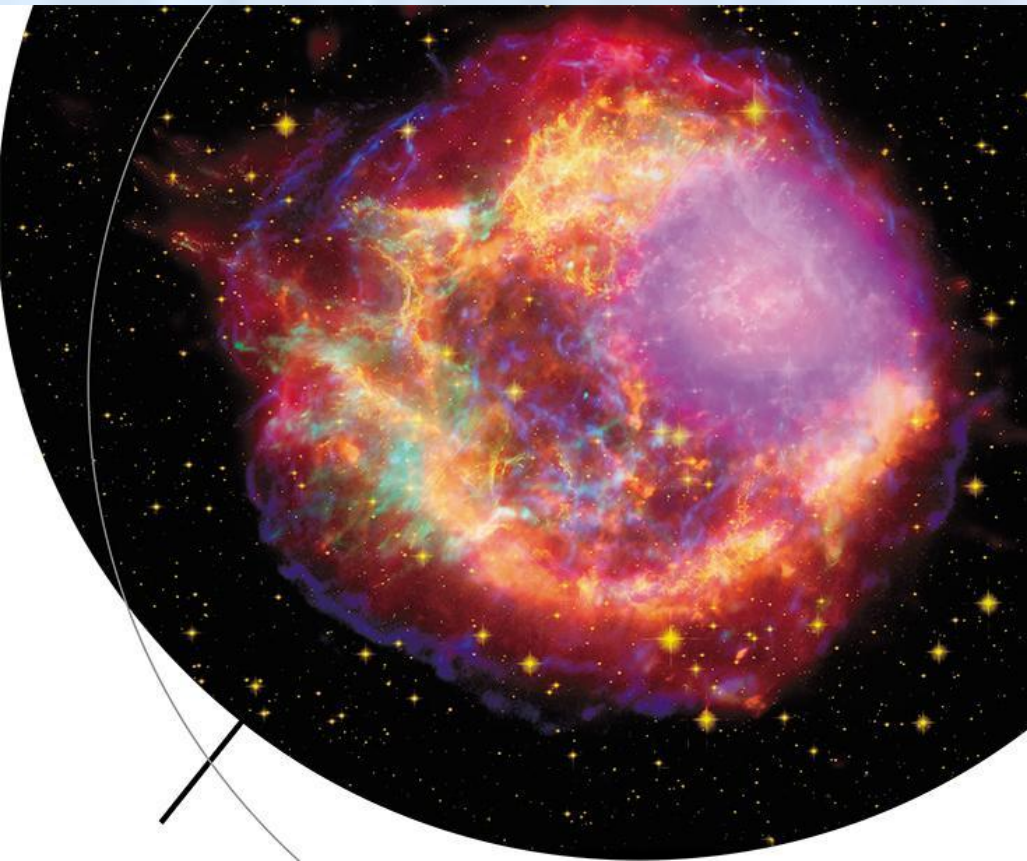
КРАБОВИДНАЯ ТУМАННОСТЬ



В спиральных
рукавах галактики
Южное Цевочное
Колесо (M83)
мириады
новорожденных
звезд
«вылупляются» из
пылевых коконов,
вызывая красное
свечение
окружающих
облаков водорода.
При взрывах
сверхновых в
пространстве вокруг
них
распространяется
ударная волна,
которая уплотняет
межзвездный газ и
ускоряет
формирование
новых звезд.

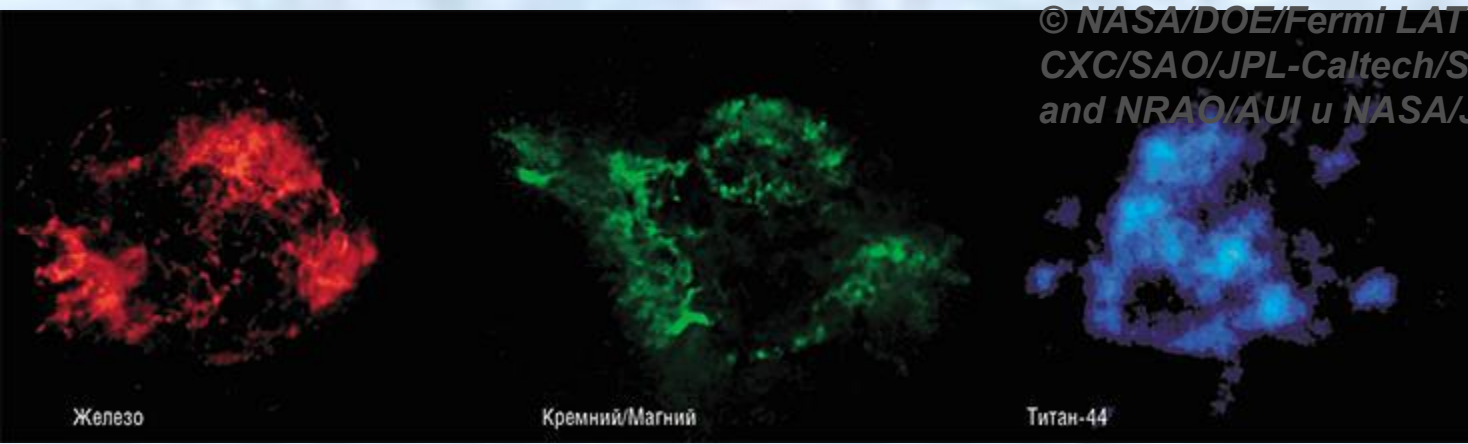


Каждые две секунды во Вселенной взрывается сверхновая. Но некоторые чрезвычайно массивные звезды не могут взорваться как сверхновая: взрываясь, они заканчивают свою жизнь с образованием черной дыры. На рисунке показаны последние этапы жизни такой сверхмассивной звезды. Пример – звезда N6946-BH1, которая была в 25 раз массивнее нашего Солнца. В 2009 г. она начала слабо светиться, но уже в 2015 г. ее не удалось обнаружить. В итоге исследователи пришли к выводу, что она должна стать черной дырой. Такая судьба ожидает во Вселенной многие слишком массивные звезды. © NASA/ESA/P. Jeffries (STScI)



Остатки сверхновых испускают излучение в миллиард раз более сильное, чем видимый свет. Изучение их изображений в различных диапазонах приближает астрономов к пониманию источника космических лучей. В композитном изображении (вверху) остатка сверхновой Кассиопеи А объединены данные по всему электромагнитному спектру: гамма-лучи (пурпурный цвет), рентгеновское излучение (синий и зеленый), видимый свет (желтый), инфракрасное излучение (красный) и радиоизлучение (оранжевый). Карты радиоактивного излучения элементов, составляющих раздробленные остатки звезды, как сверхновая, дают нам новые свидетельства того, почему взорвались Кассиопея А и другие массивные звезды. Радиоактивный материал, такой как титан-44, светится в рентгеновских лучах постоянно, тогда как железо и другие элементы светятся только после нагрева ударными волнами, порождаемыми взрывом.

© NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration, CXC/SAO/JPL-Caltech/Steward/O. Krause et al., and NRAO/AUI и NASA/JPL-Caltech/CXC/SAO



Железо

Кремний/Магний

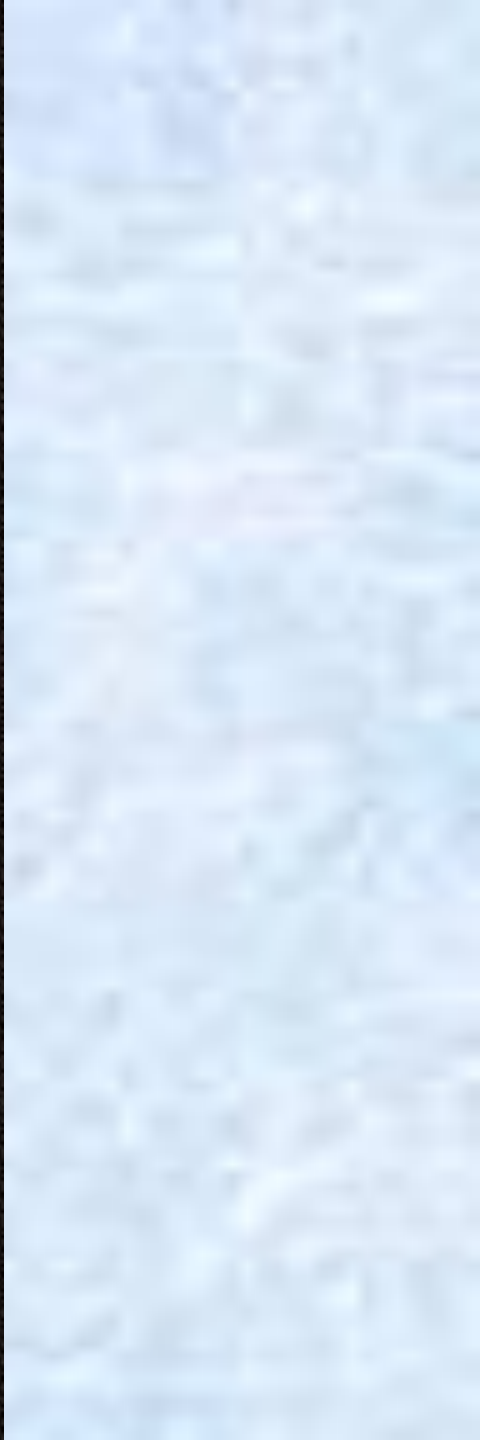
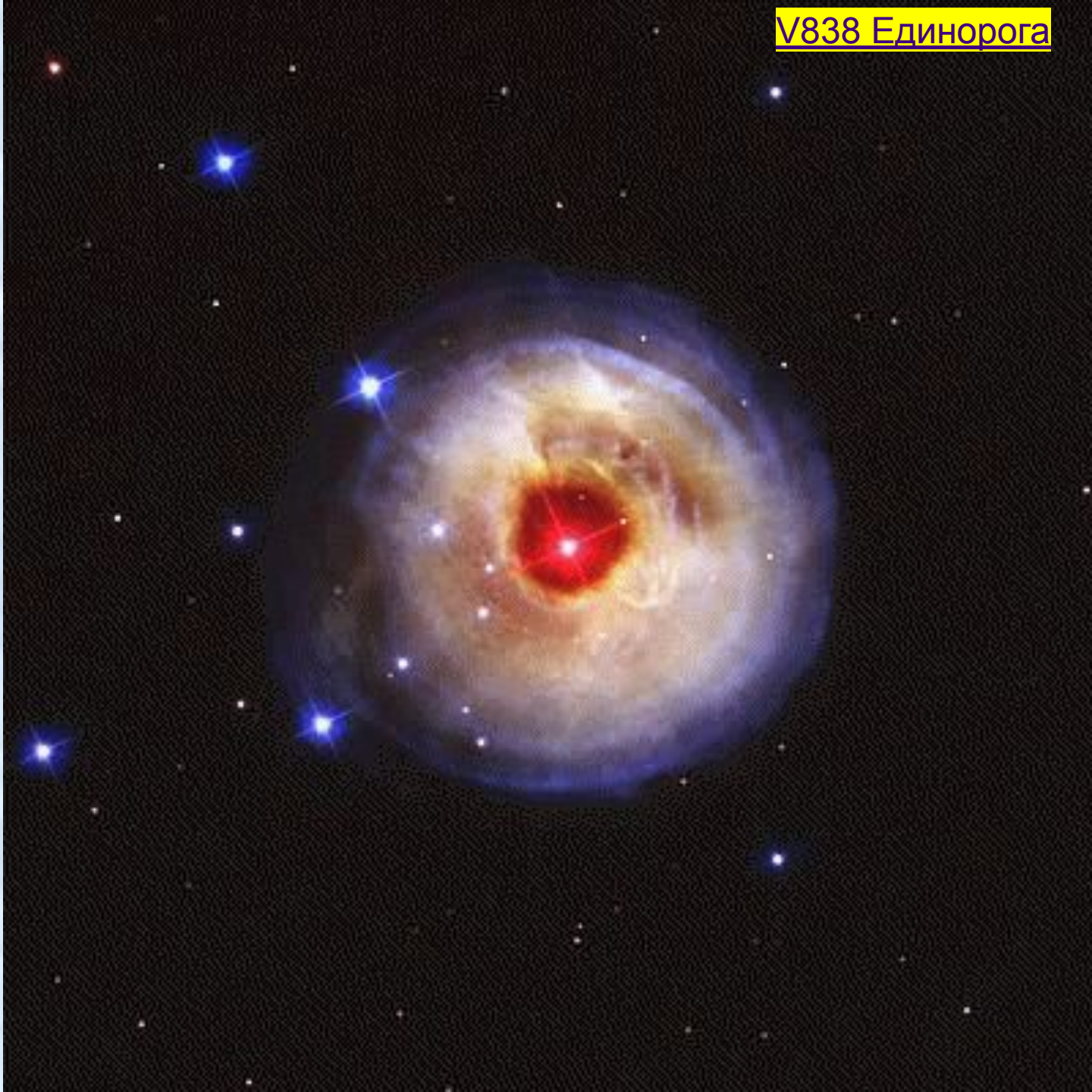
Титан-44



Feb 1994

Hubble Chronicles Brightening of Ring
around Supernova 1987A (1994-2016)

V838 Единорога



https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D0%B7%D0%B4%D0%B0

<https://ppt-online.org/45977>

<https://spacegid.com/sverhnovyie-zvezdyi.html>

<https://infourok.ru/prezentaciya-po-astronomii-na-temu-novie-i-sverhnovie-zvezdi-klass-3271415.html>

<http://www.myshared.ru/slide/217022/>

<http://www.astronet.ru/db/msg/1196579/node1.html>

<http://www.astronet.ru/db/msg/1188703>

http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/Doronina_SN_Mech-2013.pdf

<http://galspace.spb.ru/indvop.file/72.html>

<https://scfh.ru/papers/zvezdnye-vzryvy-ili-rozhdenie-novykh/>