

ЗВЕЗДНЫЕ ВЗРЫВЫ,

ИЛИ ИЛИ ИЛИ ИЛИ

Рождение «НОВЫХ»

А. Е. ЛЕВИН

Туманность Тарантул в Большом Магеллановом Облаке — одна из крупнейших звездообразующих областей вблизи Млечного Пути. На снимке объединены данные космической рентгеновской обсерватории «Чандра» (синий цвет), космических телескопов «Хаббл» (зеленый) и «Спитцер» (красный). Рентгеновские лучи обнаруживают газ с температурой в миллионы градусов, зеленым светят массивные звезды, излучающие свет в видимой части спектра, а инфракрасное излучение обнаруживает области с относительно более холодными газом и пылью. © X-ray: NASA/CXC/PSU/L. Townsley et al.; optical: NASA/STScI; Infrared: NASA/JPL/PSU/L. Townsley et al.

Свет этой сверхновой достиг Земли 23 февраля 1987 г., хотя сам взрыв произошел около 160 тыс. лет назад. Звезда, названная SN 1987A, вспыхнула на окраине туманности Тарантул в Большом Магеллановом Облаке, карликовой галактике-спутнике Млечного Пути. В мае 1987 г. она была видна невооруженным глазом — это самая близкая вспышка сверхновой, наблюдавшаяся со времен изобретения телескопа. На снимке, сделанном космическим телескопом «Хаббл» 28 ноября 2003 г. (слева), видно много ярких пятен вдоль кольца, как жемчужины на ожерелье. Это след взрывных ударных волн, врезающихся в газовое кольцо с огромной скоростью. Газ нагревается, вызывая свечение. Первую из этих горячих точек обнаружили в 1996 г., и с тех пор их число все растет — спустя годы кольцо станет непрерывным. Удлиненный и расширяющийся объект в центре — осколки, оставшиеся после взрыва звезды, «подогреваемые» главным образом титаном-44, образовавшимся при вспышке. © NASA and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

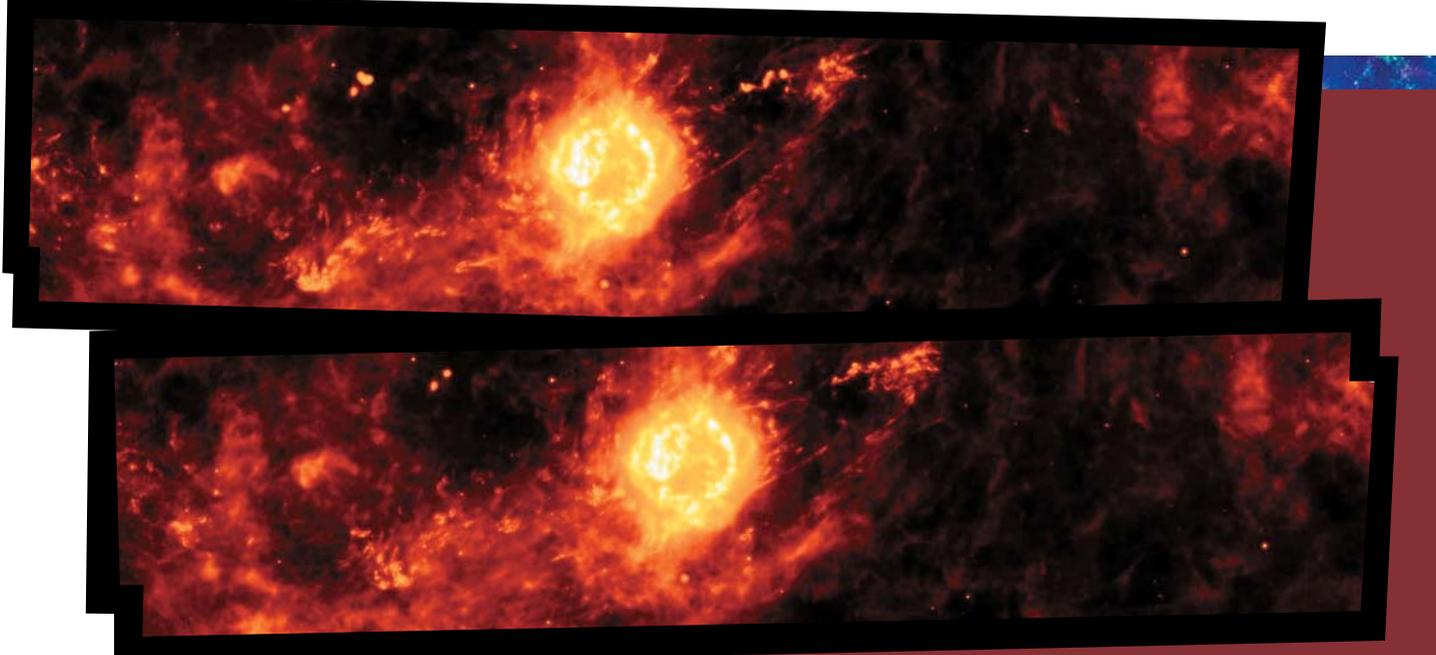


ЛЕВИН Алексей Ефимович — кандидат философских наук, историк науки, науковед, научный журналист. Выпускник физфака Московского государственного университета (1968). В 1987 г. переехал в США. Много лет был научным обозревателем вашингтонской редакции радио «Свобода», затем «Голоса Америки». С 2005 г. пишет для известных российских научно-популярных ресурсов, последнее время сотрудничает преимущественно с популярным электронным ресурсом «Элементы большой науки»

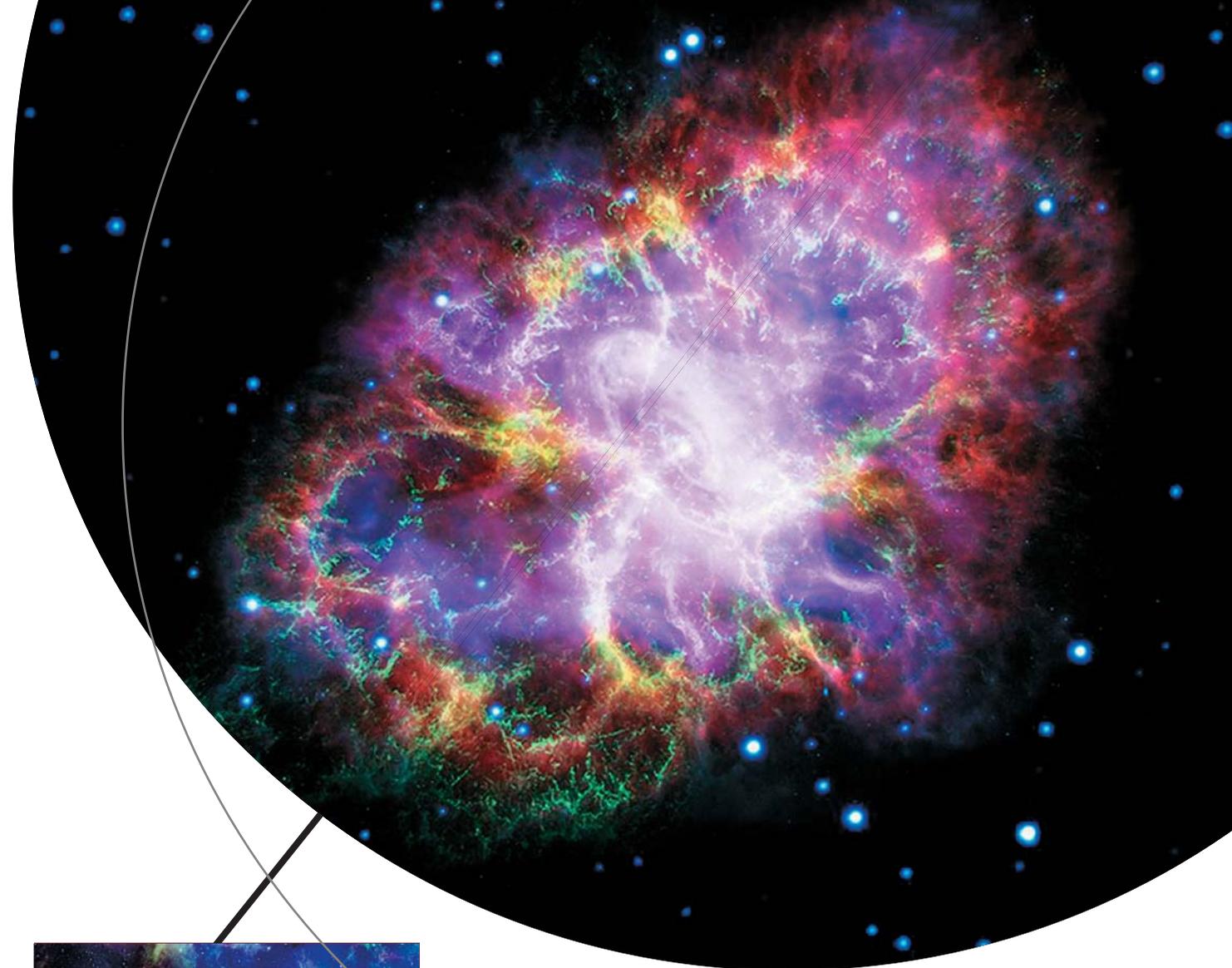
«Ведь, если звезды зажигают — значит — это кому-нибудь нужно?» Этот вопрос с точки зрения астрономии допускает двойное толкование, о котором юный Маяковский, конечно, не думал. Под зажиганием можно понимать как рождение звезды, так и практически мгновенное (за месяцы, дни или даже секунды) увеличение ее яркости — подчас на много порядков. Такие вспышки могут закончиться гибелью звезды, но могут и неоднократно повторяться без ее разрушения. Эти внезапно вспыхивающие звезды называют «новыми»

Ключевые слова: звезды, взрывы звезд, эволюция звезд, новая звезда, сверхновая, гиперновая, красные карлики, звездное ядро, аккреция, коллапс, излучение, Вселенная.
Key words: stars, explosions of stars, evolution of stars, new stars, supernova, hypernova, red dwarf, stellar core, accretion, collapse, radiation, Universe

© А. Е. Левин, 2019



Кассиопея А – это остаток некогда массивной звезды, погибшей в результате взрыва сверхновой 325 лет назад. Снимки с космического телескопа «Спитцер», сделанные с интервалом в один год в 2003–2004 гг., показывают, как в окружающих Кассиопею А пыльных облаках гаснет свет от вспышки, случившейся около 50 лет назад. Такое явление – «инфракрасное эхо» – возникает, когда свет, проникая сквозь скопления пыли, нагревает их, заставляя последовательно светиться в инфракрасном диапазоне подобно цепочке рождественских лампочек. Результат – оптическая иллюзия, что пыль разлетается со скоростью света. Это инфракрасное эхо, простирающееся более чем на 50 световых лет от Кассиопеи А, – самое большое из когда-либо виденных.
© NASA/JPL-Caltech/University of Arizona



Летом 1054 г. китайские и арабские астрономы увидели на небе новую звезду, такую яркую, что несколько месяцев ее было видно на дневном небе. Спустя 700 лет английский астроном Д. Бевис заметил на ее месте туманность в виде клешни краба. Сегодня мы знаем, что газообразная Крабовидная туманность в созвездии Тельца – это остаток сверхновой SN 1054, взорвавшейся на расстоянии 6,5 тыс. световых лет от Земли. В конце 1960-х гг. астрономы обнаружили «сердце», питающее туманность, – ультраплотную нейтронную звезду, источник интенсивного электромагнитного излучения. © NASA, ESA, NRAO/AUI/NSF and G. Dubner (University of Buenos Aires)

элементов и твердых пылевых частиц. Коллапс завершается рождением протозвезды, которая имеет шанс превратиться в полноправное светило. Для этого в ее ядре должно начаться устойчивое термоядерное горение водорода, способное полностью компенсировать потери энергии, уносимой в космос излучением звезды (гелий в этом процессе не участвует, поскольку для его поджога требуются куда большие температуры). Минимальная температура, необходимая для воспламенения водорода, составляет около 3 млн К. Согласно модельным вычислениям, для достижения этого порога масса протозвезды должна превысить 0,075 массы Солнца.

Существуют и «недоразвившиеся» светила, возникшие из протозвезд с массой от 0,07 до 0,075 массы Солнца, их называют *коричневыми карликами*. Как это нередко случается в астрономии, они были открыты «на кончике пера»: в 1962 г. их существование предсказал Шив Кумар, двадцатитрехлетний американский астроном индийского происхождения, только что защитивший докторскую диссертацию в Мичиганском университете. Первый коричневый карлик был обнаружен спустя треть столетия, в 1995 г. Считается, что общая масса коричневых карликов составляет десятую часть от массы всех звезд нашей Галактики.

В ядрах коричневых карликов идут реакции синтеза гелия из водорода, но их интенсивность очень низка, и выделившаяся энергия покрывает не более половины потерь на излучение. Поэтому коричневый карлик

Термином «новая звезда» наука обязана великому датчанину Тихо Браге, астроному и астрологу Возрождения. 11 ноября 1572 г. он увидел в созвездии Кассиопеи внезапно вспыхнувшую звезду и долго следил за изменением ее блеска. Звезду заметили, и даже раньше, многие другие европейские астрономы. Но только Браге детально описал свои наблюдения в монографии *De Nova Stella* («О новой звезде») (1573), первом астрономическом труде на эту тему, который принес его автору европейскую известность. В декабре 2008 г. международная группа астрофизиков подтвердила, что Браге наблюдал сверхновую типа Ia, о чем еще в 1945 г. догадался работавший в США немецкий астроном Вальтер Бааде.

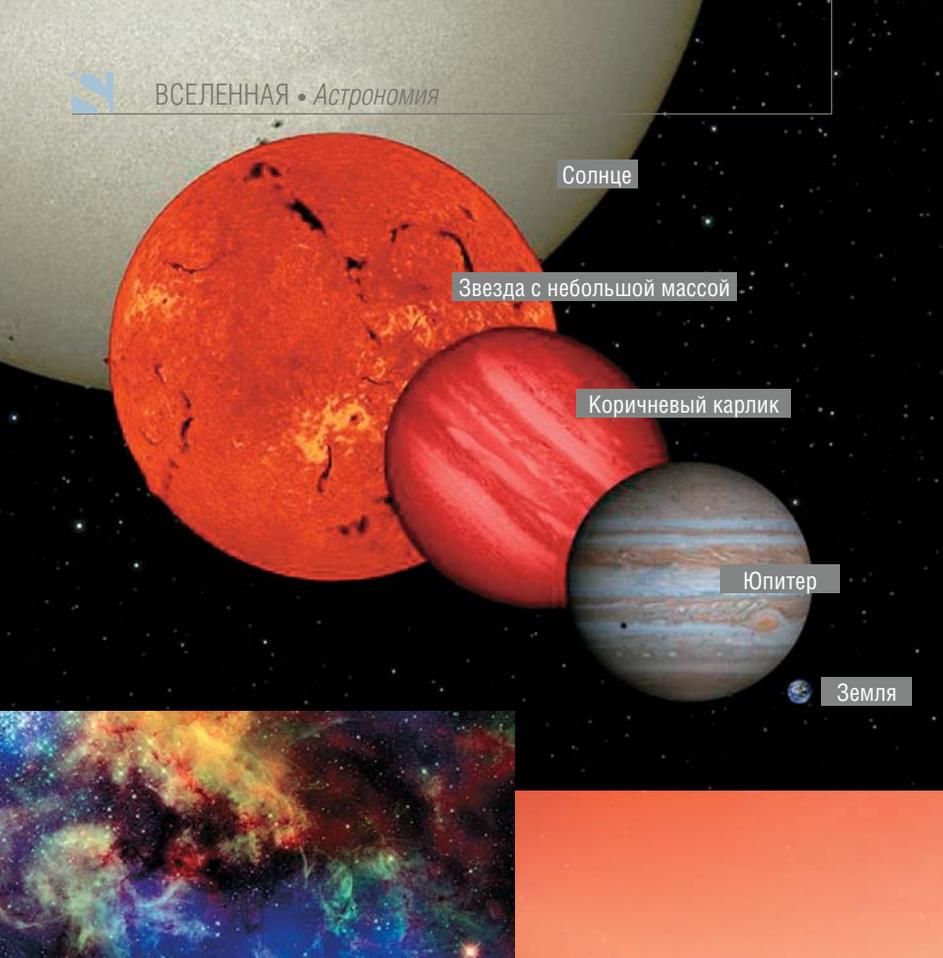
К концу первой четверти прошлого века астрономы выяснили, что новые звезды зажигаются и во Млечном Пути, и в соседних галактиках, расстояния до которых были приблизительно известны. Результаты фотометрических измерений показали, что *абсолютная яркость* (суммарная мощность излучения) новых звезд различается как минимум на три порядка. В 1925 г. шведский астроном Кнут Лундмарк предложил выделить звезды

с максимальной светимостью в группу новых высшего класса, двумя годами позже Бааде назвал их «главными новыми», но эти термины не прижились.

В начале 30-х гг. переселившийся в США из Швейцарии и мигрировавший из физики в астрономию Фриц Цвигки в лекциях для аспирантов Калтеха стал называть такие вспышки *super-novae* (*сверх-новыми*). Термин имел успех, лишь лишился дефиса. Дальнейшая классификация новых звезд пришлось на вторую половину прошлого века. Сегодня эта группа включает несколько семейств: карликовые, обычные (классические), симбиотические, повторные, сверхновые различных типов и даже гиперновые. По всей вероятности, и эта классификация неокончательная.

Как зажигаются звезды

Судьба одиночного светила зависит от его начальной массы. Звезды образуются в результате *гравитационного коллапса* газовых облаков, состоящих в основном из молекулярного водорода и гелия (один атом He на 12 атомов H₂), следовых количеств более тяжелых



Солнце

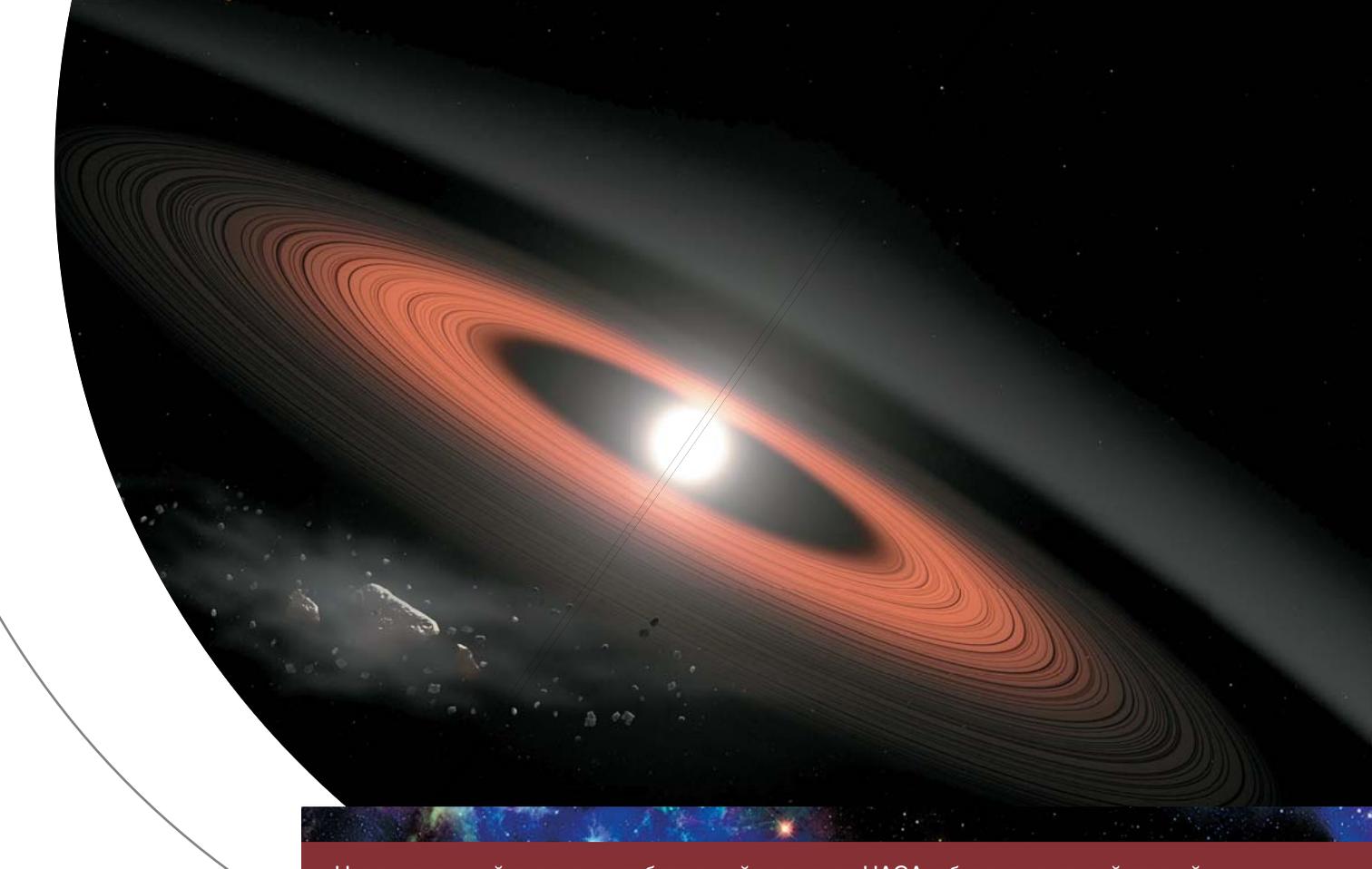
Звезда с небольшой массой

Коричневый карлик

Юпитер

Земля

Одна из задач инфракрасного космического телескопа WISE, запущенного на околоземную орбиту 14 декабря 2009 г., – поиск коричневых карликов. Эти космические тела занимают промежуточное положение между звездами и планетами. Судя по данным космического телескопа «Спитцер», планеты вокруг таких холодных звезд могут содержать другую смесь формирующих химических веществ, чем юная Земля. По крайней мере, в газопылевых дисках этих звезд не обнаружены молекулы цианида водорода, считающегося «пребиотиком». На рисунке (внизу) изображена именно такая гипотетическая планета. © NASA/JPL-Caltech/UCB и NASA/JPL-Caltech



Недавно ученый-волонтер, работающий в проекте НАСА, обнаружил самый старый и самый холодный белый карлик, расположенный в созвездии Козерога на расстоянии 145 световых лет от Земли. Его возраст – около 3 млрд лет, температура – примерно 5800 °С. Звезда LSPM J0207 + 3331 окружена кольцом (возможно, двойным) пыльных обломков. Материалом для этих колец, предположительно, служат разрушающиеся астероиды, как это показано на рисунке. © NASA's Goddard Space Flight Center/Scott Wiessinger

охлаждается, несмотря на тлеющую в его ядре водородную печь, сохраняющую активность от одного до десяти миллиардов лет. Затем синтез гелия прекращается, хотя в ядре и остается немало несожженного водорода. Наблюдать коричневые карлики сложно из-за их малой яркости. Завершая свою жизнь постепенным остыванием, коричневые карлики никогда не взрываются.

Начальные массы настоящих звезд лежат в диапазоне от 0,075 до двух-трех сотен масс Солнца. Самые легкие (с массами не выше половины солнечной) относятся к семейству *красных карликов*, самые массивные – *голубых сверхгигантов*. Все они до конца сжигают свои водородные ядра, после чего теряют стабильность и претерпевают различные изменения. Для достаточно массивных (но не самых!) звезд все заканчивается взрывом. Продолжительность нормальной жизни самых легких красных карликов исчисляется триллионами лет, голубых сверхгигантов – миллионами. Таким образом, разброс начальных масс составляет четыре порядка, зато разброс возрастов – целых шесть.

Но начальная масса определяет эволюцию лишь тех звезд, которые не имеют близких соседей. Однако примерно половина светил не существуют, как Британия былых времен, *in splendid isolation*: звезды любят объединяться в пары, связанные взаимным притяжением. В таких системах возможен, и часто происходит, перенос (или, если угодно, «перетек») вещества с одной звезды на другую. Эти процессы имеют прямое отношение ко вспышкам новых звезд различных типов.

«Замученной звезды молочно-белый свет»

Чтобы закончить жизнь по взрывному сценарию, новорожденная звезда должна тянуть как минимум на восемь солнечных масс. Однако в бинарных системах взрываются звезды и с весьма скромной начальной массой, с которых мы и начнем.

Звезды с массами до половины солнечной (красные карлики) синтезируют в своих ядрах гелий из водорода



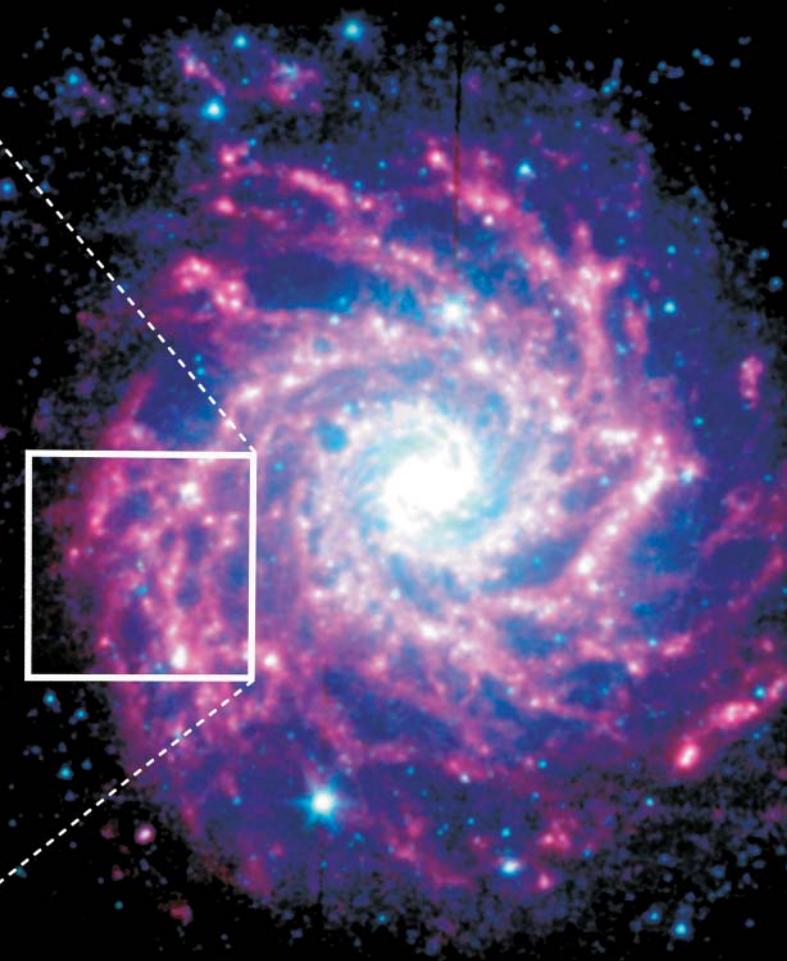
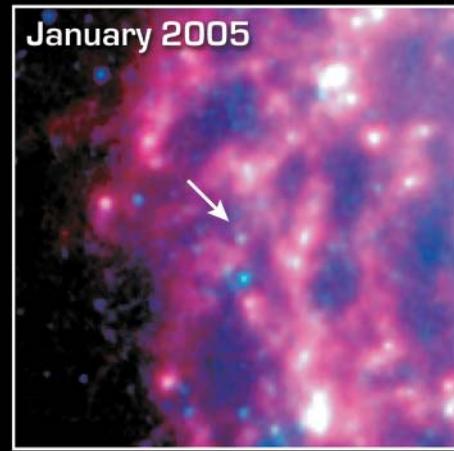
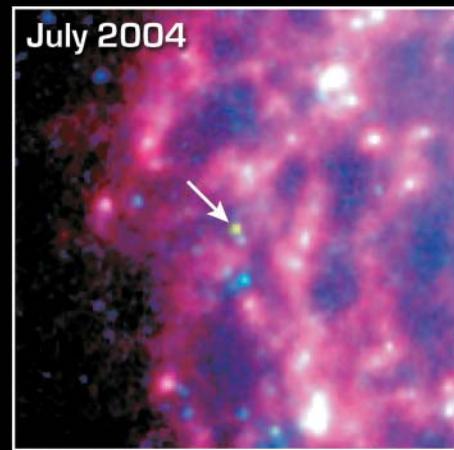
Шаровое звездное скопление 47 Тукана – второе по яркости скопление из сотен тысяч звезд, видимое с Земли: его можно увидеть невооруженным глазом рядом с Малым Магеллановым Облаком. С помощью широкоугольной камеры космического телескопа «Хаббл», дающей изображение в ультрафиолетовом диапазоне, удалось проследить за движением в нем более 3 тыс. белых карликов – конечного продукта эволюции звезд с начальными массами до нескольких солнечных. По мере своего старения и потери массы звезды «изгоняются» из центра на периферию скопления в результате гравитационной борьбы с более массивными собратьями. Первые реальные наблюдения за «исходом» звезд разного возраста позволили сделать вывод, что до половины своей массы звезды теряют не на стадии красного гиганта, а в течение последующих 10 млн лет, до полного превращения в белые карлики.

© NASA, ESA, and H. Richer and J. Heyl (University of British Columbia, Vancouver, Canada)



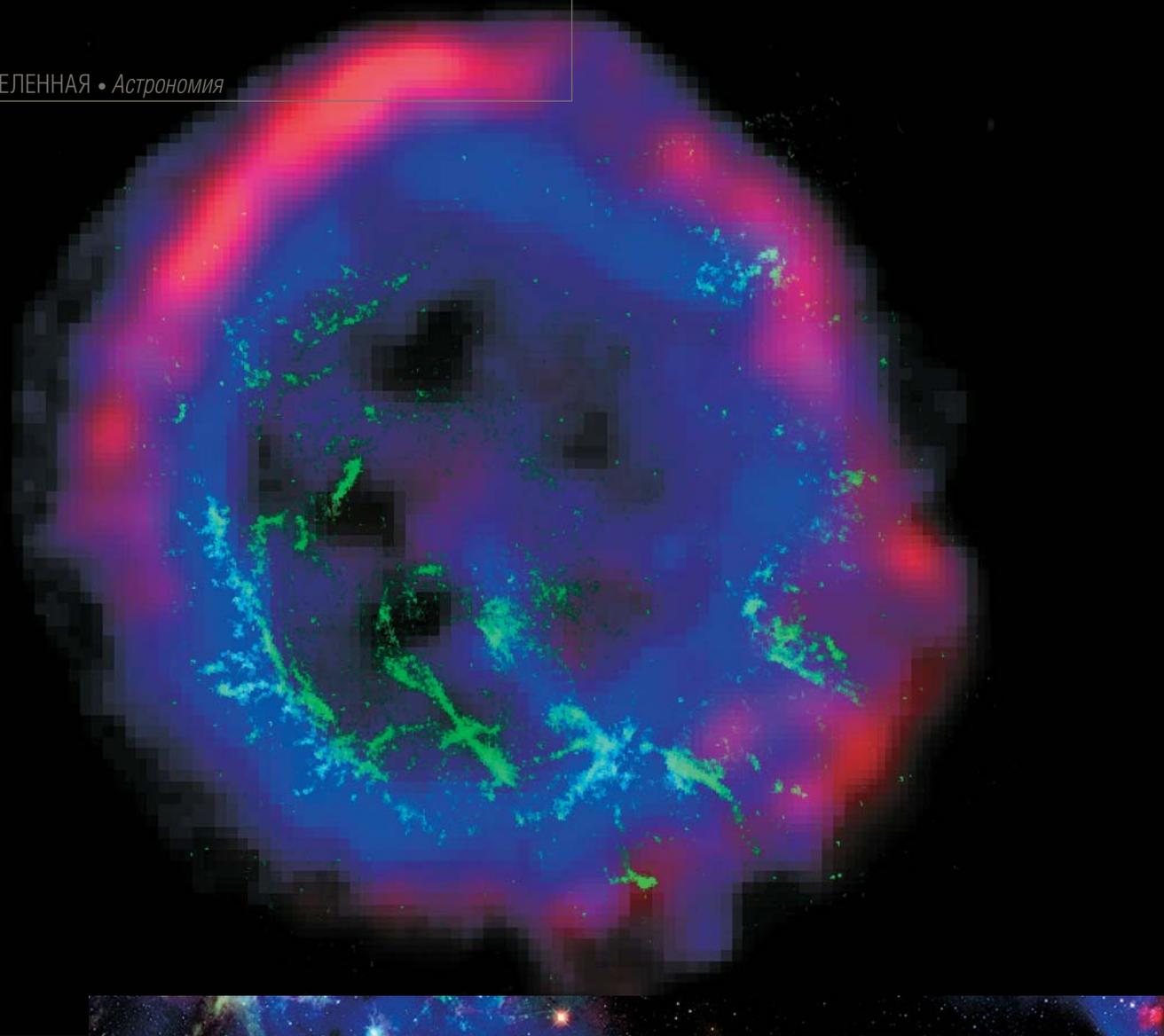
и на этом успокаиваются. Светила потяжелее ведут себя гораздо интересней. Когда в центре такой звезды образуется гелиевое ядро, где горение уже не идет, оно начинает сжиматься под действием тяготения. При сжатии температура ядра возрастает, и прилегающий слой водорода нагревается до порога, за которым начинаются термоядерные реакции. Поскольку тепло перетекает из этого слоя к поверхности звезды, ее атмосфера раздувается настолько, что звезда разбухает в десятки и сотни раз. В процессе расширения звездная оболочка постепенно остывает, максимум ее оптического спектра смещается в сторону длинных волн, и звезда превращается в *красный гигант*. Такая судьба ожидает и наше Солнце.

Судьба звездного ядра также зависит от начальной массы звезды. Если она ненамного больше половины солнечной, ядро остается гелиевым. До поры до времени оно продолжает сжиматься, но не нагревается до температур порядка 100 млн градусов, когда начинаются новые термоядерные превращения. Ядра более массивных звезд нагреваются так, что становятся способны производить углерод и кислород. Если же начальная масса звезды в несколько (но не более, чем в восемь) раз превосходит солнечную, то в ее ядре синтезируются неон и магний. А вот элементы с большими атомными номерами там не возникают, поскольку такая звезда не способна спрессовать ядро для достижения температур, нужных для их синтеза.

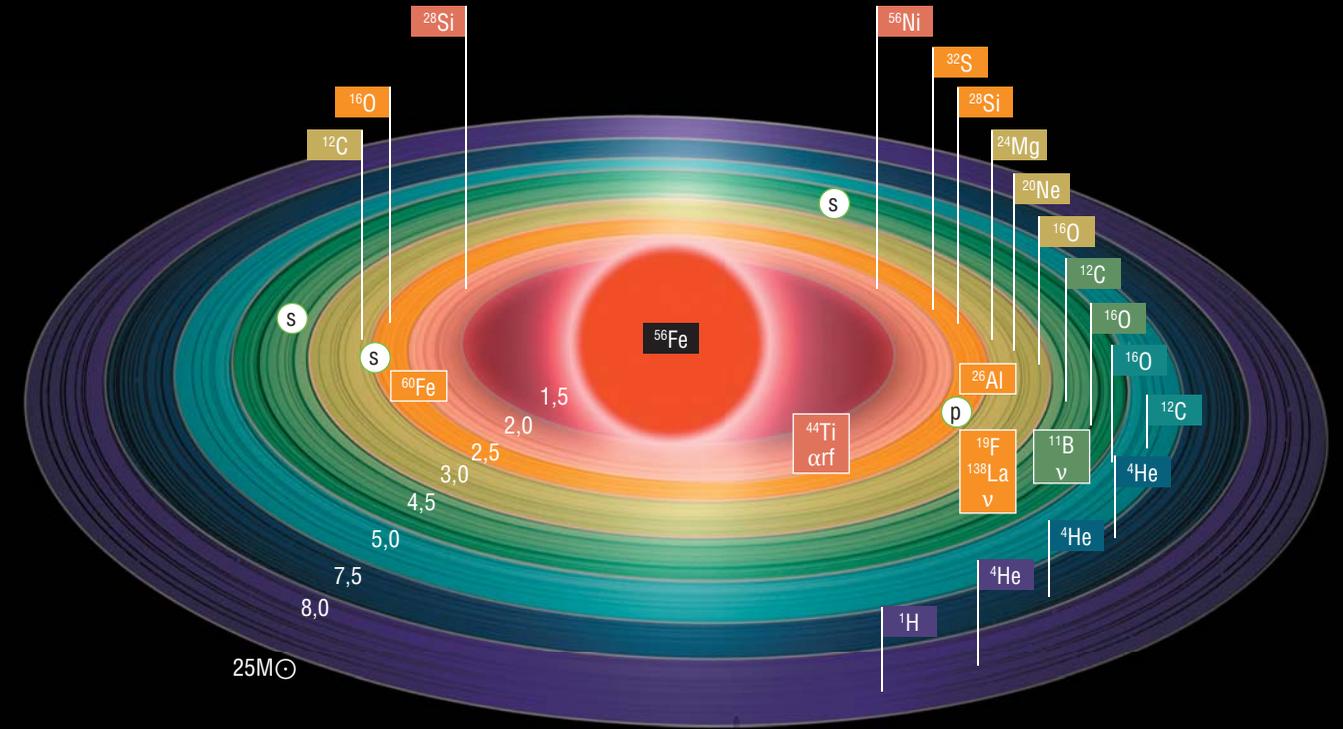


Пока в ядре и вокруг него продолжается генерация термоядерной энергии, оболочка звезды еще больше расширяется, и красный гигант становится сверхгигантом. Однако эти космические исполины не отличаются устойчивостью. В конечном счете страдающая гигантизмом звезда сбрасывает внешние слои и оставляет после себя лишь оголенное ядро – новорожденный *белый карлик*. В юности эффективная температура его поверхности измеряется десятками тысяч градусов, из-за чего он предстает в виде бело-голубого светила – отсюда и название (прямо по «Томлинсону» Киплинга, где у Адовых врат «горел замученной звезды молочного-белый свет»). Но одиночный карлик обречен на постепенное остывание. Он будет желтеть, краснеть, а потом и вовсе потухнет в оптическом диапазоне. Дело это небыстрое, счет идет на многие миллиарды лет. Пока что самые тусклые белые карлики, внесенные в астрономические каталоги, немногим холоднее Солнца.

Астрономы давно подозревали, что сверхновые могут быть производителями частиц космической пыли, но доказать это удалось лишь недавно. С помощью инфракрасной камеры космического телескопа «Спитцер» в 30 млн световых лет от спиральной галактики M74 удалось обнаружить «пылевую фабрику» на месте взрыва сверхновой SN 2003gd. На инфракрасном снимке галактики белым прямоугольником отмечен район, где находится остаток сверхновой (стрелка указывает на его точное местоположение). Синим цветом помечены горячий газ и звезды, красным – более холодная галактическая пыль. Желто-зеленый цвет остатка SN 2003gd на снимке, сделанном в июле 2004 г., свидетельствует о том, что его температура выше температуры окружающей среды. Причина в том, что пыль, образовавшаяся внутри сверхновой, только начала остывать. К январю 2005 г. она остыла, исчезнув из поля зрения камеры. © NASA/JPL-Caltech/STScI



E0102-72 – остаток сверхновой, взорвавшейся в близлежащей к Земле галактике, известной как Малое Магелланово Облако. При взрыве вещество звезды со скоростью более 20 млн км/час столкнулось с окружающим газом, породив две ударные волны, одна из которых распространялась наружу, а другая – в обратном направлении, в материал, выброшенный взрывом. Радиоволны (*красный цвет*), источником которых являются высокоэнергетические электроны, говорят о движущейся наружу ударной волне. Рентгеновское излучение (*синий цвет*) позволяет определить газ, богатый кислородом и неонам, нагретый до миллионов градусов обратной ударной волной. В оптическом диапазоне (*зеленый цвет*) видны плотные скопления газообразного кислорода, которые «охладились» примерно до 30 тыс. градусов.
© X-ray (NASA/CXC/SAO); optical (NASA/HST); radio: (ACTA)



Предсверхновая. Момент вспышки. Структура и процессы нуклеосинтеза в предсверхновой и в следующее мгновение после вспышки для звезды $25M_{\odot}$, масштаб не соблюден.
© CC BY-SA 4.0

На этой схеме представлена модельная структура звезды с начальной массой 25 солнечных масс непосредственно перед гравитационным коллапсом. На ней видно, что звезда состоит из сферических слоев, напоминая луковицу или русскую матрешку. Внешний слой содержит гелий в смеси с остатками водорода. По мере приближения к центру звезды слои заполняются элементами со все более высокими номерами в таблице Менделеева. Центральное ядро состоит из железа-56, на котором заканчиваются экзотермические (идущие с выделением тепла) термоядерные реакции. В заключительной фазе эволюции звезды железное ядро теряет стабильность и дает начало нейтронной звезде

Коллапсирующие ядра

Звезды с начальной массой свыше восьми солнечных заканчивают жизнь взрывами фантастической мощности, вызванными очень быстрым сжатием (*коллапсом*) их ядер. В ходе такого взрыва выделяется гравитационная энергия исполинского масштаба – вплоть до 10^{53} – 10^{54} эрг. При этом 99% выделившейся энергии уносят нейтрино, а остаток приходится на долю кинетической энергии барионной материи. Одна сотая этого остатка (т. е. одна десятитысячная полного выхода энергии) переходит в энергию фотонов, улетающих в космическое пространство. И хотя световые вспышки гибнущих массивных звезд представляют из себя феерическое зрелище, на их долю приходится лишь одна сотая доля процента высвобожденной энергии.

Именно эти космические катаклизмы и называют *сверхновыми звездами*, или просто *сверхновыми*. Их подразделяют на группы в соответствии с оптическими спектрами. Эту классификацию 80 лет назад предложил Бааде и его коллега по обсерватории Маунт-Вильсон Рудольф Минковский, племянник знаменитого математика, эмигрировавший из Германии. Излучение сверхновых I типа не содержит линий испускания водорода, которые есть у сверхновых II типа, зато они включают семейство, спектры которого демонстрируют наличие ионизированного кремния. Представители группы Ia взрываются на основе иного механизма, нежели гравитационный коллапс их ядер, поэтому о них поговорим позднее.

Более легкие звезды дают начало гелиевым белым карликам, а более массивные (такие как наше Солнце) – углеродно-кислородным. Радиус типичного белого карлика сравним с земным, а масса составляет 0,6–1,2 массы Солнца. Белые карлики с массами свыше 1,44 солнечной массы не существуют и не могут существовать, но об этом позже.

Материя белого карлика сжата до давлений, при которых разрушаются атомные электронные оболочки. Возникает особого рода плазма, состоящая из атомных ядер и вырожденного газа обобществленных электронов, движением которых управляют законы квантовой механики. Давление такого газа (так называемое *давление Ферми*) не зависит от температуры и определяется исключительно плотностью, поэтому остывание белого

карлика не сказывается на его внутренней структуре. В отличие от звезды-родительницы, это чрезвычайно устойчивая физическая система: если белый карлик не будет проглочен черной дырой, он просуществует до тех пор, пока протоны не начнут распадаться, как им предписывают современные теории физики элементарных частиц. Период же их полураспада заведомо превышает 10^{32} лет.



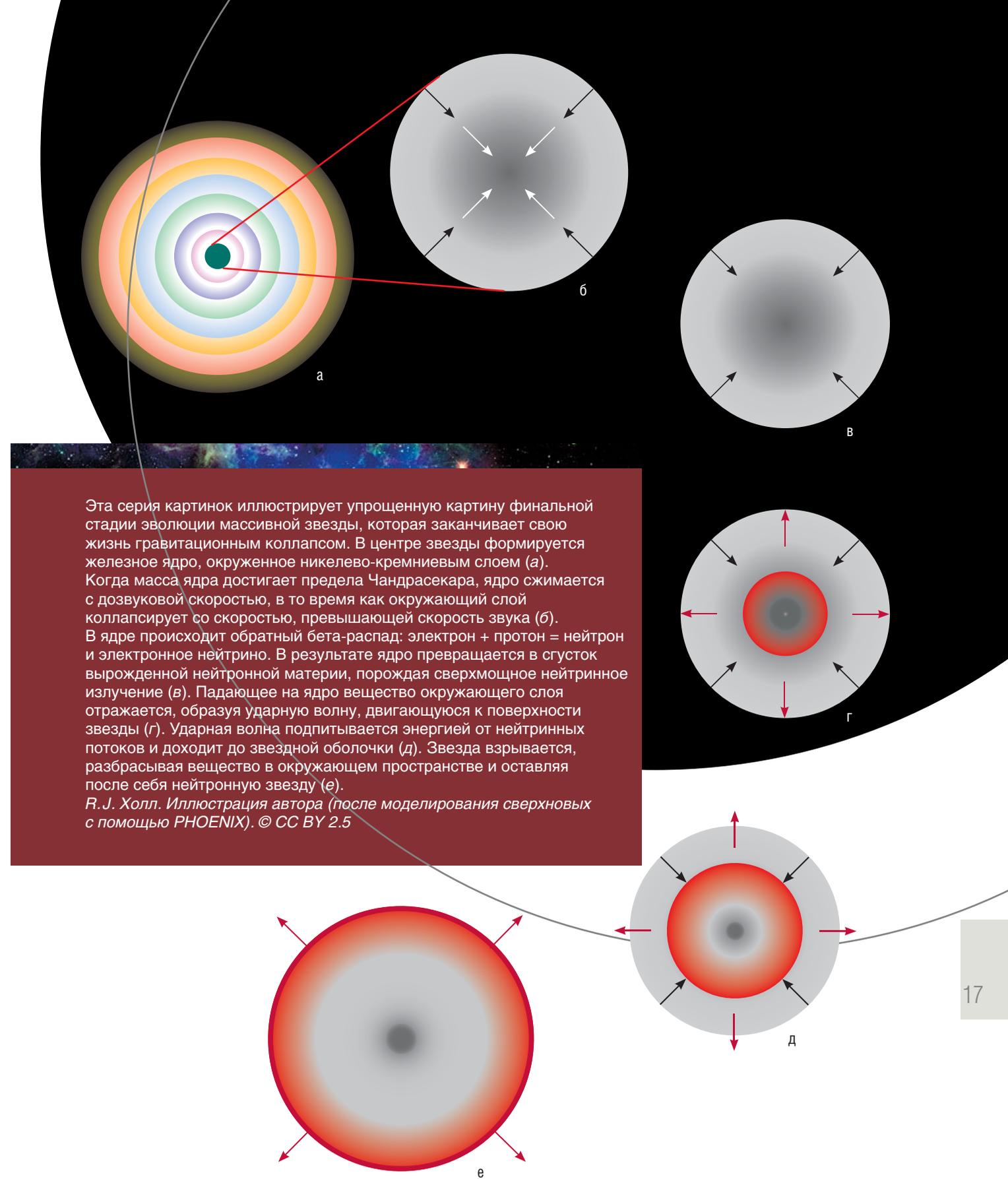
В остатке сверхновой IC 443 в созвездии Близнецов, известной как туманность Медуза, японский космический рентгеновский телескоп «Сузаку» обнаружил рентгеновское излучение от полностью ионизированного кремния и серы – своего рода «ископаемый» отпечаток высокотемпературных условий, возникших непосредственно после взрыва звезды. © JAXA/NASA/Suzaku

Открытые в 1985 г. сверхновые двух других семейств первого типа (Ib и Ic), равно как и сверхновые второго типа, «проходят по ведомству коллапса». В среднем в каждой крупной галактике типа Млечного Пути ежегодно загораются две-три сверхновые, причем на каждую вспышку из группы Ia приходится три-пять сверхновых прочих разновидностей.

Хотя в наши дни процессы коллапса массивных звезд обсчитывают с использованием хорошо проработанных физических моделей и мощных компьютерных ресурсов, многие детали этого процесса еще далеки от ясности. Для иллюстрации рассмотрим в общих чертах типичную судьбу голубого сверхгиганта с начальной массой порядка 20–25 солнечных масс. Водородное топливо он сжигает за 7 млн лет, еще полмиллиона лет займет формирование углеродно-кислородного

ядра, нагретого до 200 млн К. С его возникновением термоядерный синтез останавливается, но ненадолго. В отсутствие тепловой подпитки ядро сжимается под действием тяготения звездного вещества и соответственно нагревается. По достижении температуры 600–800 млн К углерод начинает гореть с образованием неона и магния, а спустя еще 600 лет при температуре 2,3 млрд К начинается горение кислорода. Оно запускает цепочки ядерных превращений, которые приводят к синтезу различных изотопов кремния, серы, фосфора, аргона, калия, кальция и скандия.

Американский астрофизик индийского происхождения С. Чандрасекар, будущий нобелевский лауреат, в 1930-х гг. сформулировал принцип, согласно которому при превышении массой звезды определенного предела гравитационные силы будут сильнее сил давления вырожденного газа, поэтому коллапс звезды продолжится, и она сожмется до нуля. Масса, которая получила название «предел Чандрасекара», составляет около 1,4 массы Солнца



Эта серия картинок иллюстрирует упрощенную картину финальной стадии эволюции массивной звезды, которая заканчивает свою жизнь гравитационным коллапсом. В центре звезды формируется железное ядро, окруженное никелево-кремниевым слоем (а). Когда масса ядра достигает предела Чандрасекара, ядро сжимается с дозвуковой скоростью, в то время как окружающий слой коллапсирует со скоростью, превышающей скорость звука (б). В ядре происходит обратный бета-распад: электрон + протон = нейтрон и электронное нейтрино. В результате ядро превращается в сгусток вырожденной нейтронной материи, порождая сверхмощное нейтринное излучение (в). Падающее на ядро вещество окружающего слоя отражается, образуя ударную волну,двигающуюся к поверхности звезды (г). Ударная волна подпитывается энергией от нейтринных потоков и доходит до звездной оболочки (д). Звезда взрывается, разбрасывая вещество в окружающем пространстве и оставляя после себя нейтронную звезду (е).

R. J. Холл. Иллюстрация автора (после моделирования сверхновых с помощью PHOENIX). © CC BY 2.5

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)



ГИПЕРНОВЫЕ – «ДЕТИ» ЗВЕЗД-ТЯЖЕЛОВЕСОВ

Сверхновую аномально высокой мощности, выбросившую в пространство огромное количество кремния и радиоактивного никеля ⁵⁶Si, зарегистрировали в апреле 2007 г., хотя ее существование было теоретически предсказано еще в 1960-е гг. Звезде был присвоен индекс SN 2007bi. Возможно, это было первое наблюдение сверхновой с парной нестабильностью. Звезды этой группы очень быстро сжигают водород и гелий. После сгорания углерода в их ядрах возникают гамма-кванты, которые при столкновениях превращаются в электронно-позитронные пары, а возможно, и в более тяжелые частицы и античастицы. Однако в этом случае пульсаций не возникает, и внешние слои звезды падают в ее центр. Этот направленный внутрь взрыв еще больше разогревает недра звезды, запуская термоядерные реакции, в результате которых синтезируется ряд тяжелых элементов, включая никель-56. Давление в перегретом ядре катастрофически возрастает, и ядро взрывается, не успев сколлапсировать в черную дыру. Поскольку вся звездная материя без остатка выбрасывается в пространство, такие сверхновые – один из главных источников элементов с большими атомными номерами

Поскольку эти реакции идут за счет накопленной тепловой энергии, температура звездного ядра уменьшается, давление его вещества падает, и ядро вновь начинает сжиматься. Этот процесс ускоряется, если в окрестностях ядра продолжаются процессы термоядерного синтеза, которые порождают новые и новые ядра железа.

Затем наступает финальный катаклизм. Это происходит, когда масса ядра достигает порога, при котором давление вырожденного электронного газа уже не может противостоять гравитационному сжатию (этот порог, так называемый *предел Чандрасекара*, примерно на 44% превышает массу Солнца). Ядро схлопывается со скоростью, достигающей 20% световой. Электроны прижимаются к ядрам и сливаются с протонами, превращаясь в нейтроны и нейтрино. Нейтроны остаются на месте, а нейтрино вылетают в пространство. В результате сердцевина звезды охлаждается, давление ее вещества вновь падает, а темп сжатия увеличивается. Этот процесс

За сутки до кончины звезды ее ядро нагревается до 3,3 млрд К. При этой температуре кванты гамма-излучения разбивают ядра изотопа кремния-28 на ядра магния-24 и альфа-частицы, которые поглощаются другими ядрами с образованием все более тяжелых элементов. Все это завершается образованием железа-56, рекордсмена по стабильности среди всех атомных ядер. Последние поглощаются другими ядрами, образуя все более тяжелые элементы. Поскольку далее термоядерный синтез не идет, железное ядро сжимается и нагревается. В результате возрастает кинетическая энергия атомов железа, и они претерпевают хаотические превращения. Некоторые из них распадаются, а некоторые, напротив, вступают в реакции слияния и порождают более тяжелые элементы, такие как платина и золото.

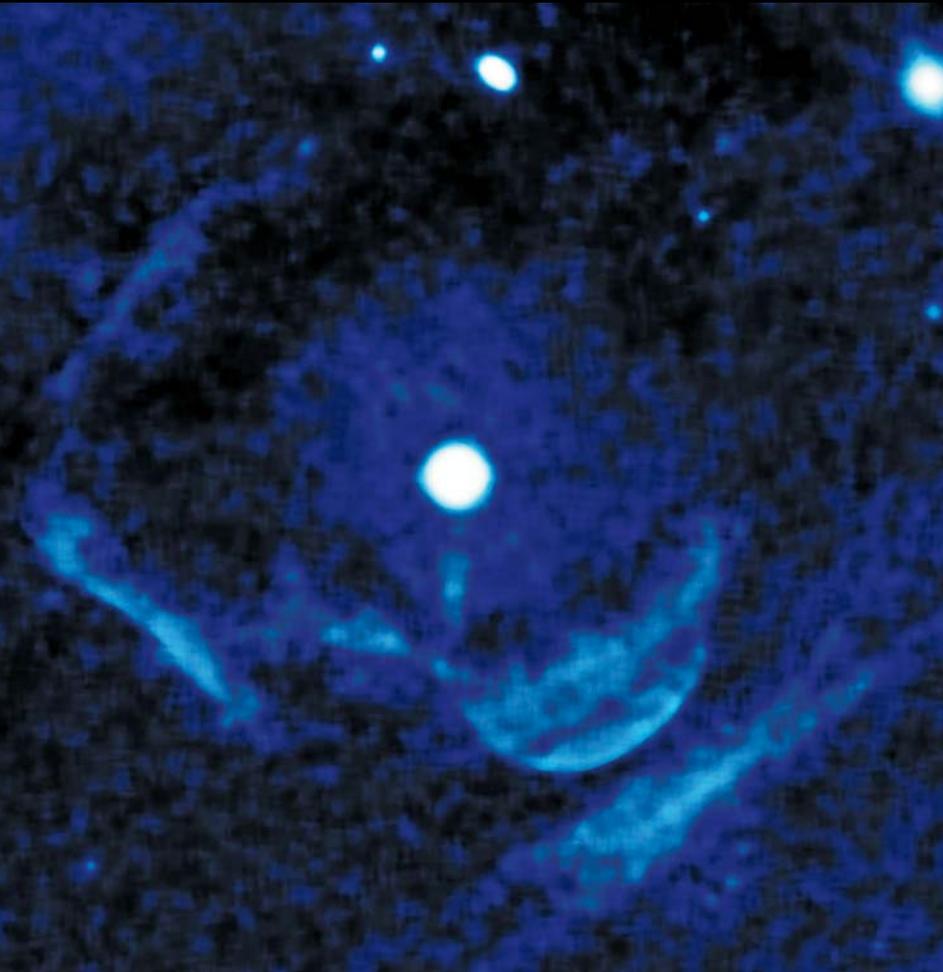


Взрывы сверхновых, разрушающие массивные звезды, обычно симметричны. Но остаток сверхновой W49B говорит о другом: материал вблизи полюсов звезды выбрасывался с гораздо большей скоростью, чем от экватора, о чем свидетельствует распределение различных элементов в звездной пыли. В большинстве случаев массивные звезды, которые коллапсируют в сверхновые, оставляют после себя плотное вращающееся ядро – нейтронную звезду. Но здесь тщательный поиск не выявил никаких доказательств ее наличия: возможно, в результате взрыва образовалась черная дыра. В таком случае это будет самая молодая черная дыра, образовавшаяся в галактике Млечный Путь, возрастом около тысячи лет. На снимке объединены рентгеновские данные (синим и зеленым цветом), радиоданные (розовым) и инфракрасные (желтым). © X-ray: NASA/CXC/MIT/L. Lopez et al; Infrared: Palomar; Radio: NSF/NRAO/VLA

имплозии начинается и завершается за считанные секунды, поэтому внешние слои звезды не успевают ничего почувствовать. Наружный наблюдатель в течение еще нескольких часов не заметит ни малейших перемен.

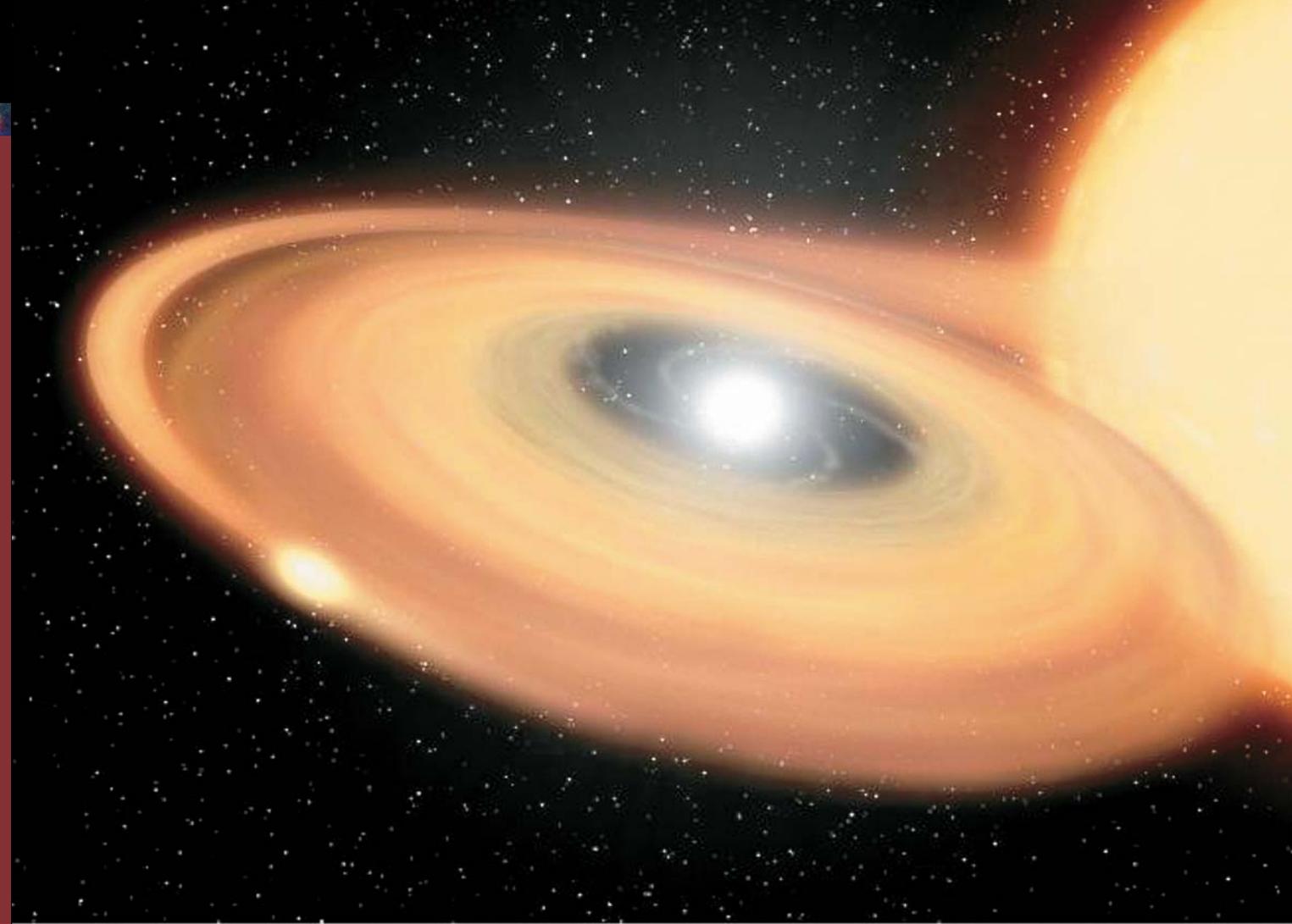
На этой стадии возможны два сценария. Полагают, что звезды с массой от 30 до 100 солнечных масс коллапсируют полностью и дают начало черным дырам. У звезд в диапазоне 12–30 (по другим модельным симуляциям 12–20) солнечных масс образуются ядра из нейтронной материи, плотность которой

в 100 триллионов раз превышает плотность воды. Внешние слои звезды обрушиваются на ядро и «отскакивают» от него со скоростью в десятки тысяч километров в секунду. Поскольку эта скорость значительно превышает скорость звука в звездном веществе, образуется ударная волна, буквально разрывающая звезду изнутри. По всей вероятности, ей «помогают» тепловые нейтрино, приходящие из «вскипающего» нейтронного ядра, нагретого как минимум до 150 млрд К (это самая высокая температура, возможная в нынешней



Z Жирафа — двойная звездная система недалеко от границы созвездия Большой Медведицы, ее можно легко наблюдать в Северном полушарии. В систему входит белый карлик, могучее притяжение которого «вытягивает» вещество из более спокойной «звезды-компаньона», образующее вокруг белого карлика вращающийся газопылевой диск (справа). Термоядерные процессы, происходящие в аккреционном диске, временами могут терять стабильность, приобретая взрывной характер. Z Жирафа периодически (в среднем каждые 20 дней) вспыхивает небольшими вспышками — она стала первой известной звездой в подклассе «карликовых новых». Однако обнаруженная ультрафиолетовым детектором оболочка из ионизированного газа (слева), масса которого слишком велика для такой звезды, служит свидетельством давней мощной вспышки, соответствующей «классической новой».

© NASA/JPL-Caltech



Вселенной). От звезды остается деформированный нейтронный шар радиусом около десяти километров, окруженный облаком сверхгорячей плазмы. Это и есть *нейтронная звезда*.

Возможно, что этот сценарий еще подвергнется коррекции: некоторые из трехмерных динамических симуляций коллапсирующих сверхновых, над которыми с 2015 г. работают в ряде научных центров, демонстрируют более сложную картину возникновения и распространения ударных волн. Однако подобные симуляции выполняются лишь при значительном упрощении базовых моделей и при этом требуют месяцев работы суперкомпьютеров. Чтобы сделать их более реалистичными, необходимы компьютеры, на два порядка более мощные, но появятся они не раньше, чем через десять лет.

Как ни парадоксально, но надежней всего моделируется гравитационный коллапс самых массивных звезд с начальной массой более 100 солнечных. В их недрах уже на стадии синтеза кислорода появляются жесткие гамма-кванты, которые при взаимных столкновениях превращаются в электронно-позитронные

пары. Поскольку часть гамма-квантов при этом теряется, происходит падение лучевого давления, которое противодействовало гравитационному сжатию звезды и удерживало ее в состоянии гидростатического равновесия. Далее все зависит от начальной массы. Если она не превышала 130–140 солнечных, то в недрах звезды возникают пульсации, способные инициировать быстрый выброс части вещества внешних оболочек, однако недостаточно сильные, чтобы полностью разрушить ее изнутри. Эти пульсации быстро гасятся, и звезда возобновляет коллапс, приводящий к образованию железного ядра.

Для самых «легких» гигантов — звезд с начальной массой 8–12 солнечной — модельные симуляции дают несколько иную картину. Они также порождают коллапсирующие железные ядра, но в этом случае на стадии термоядерного горения углерода ядро прекращает дальнейшее сжатие, так что кислород не поджигается. Когда углерод полностью выгорает, превратившись в неон и магний, кислородно-неоново-магниевое ядро сжимается до тех пор, пока сила тяготения не уравновешивается квантовым давлением вырожденного

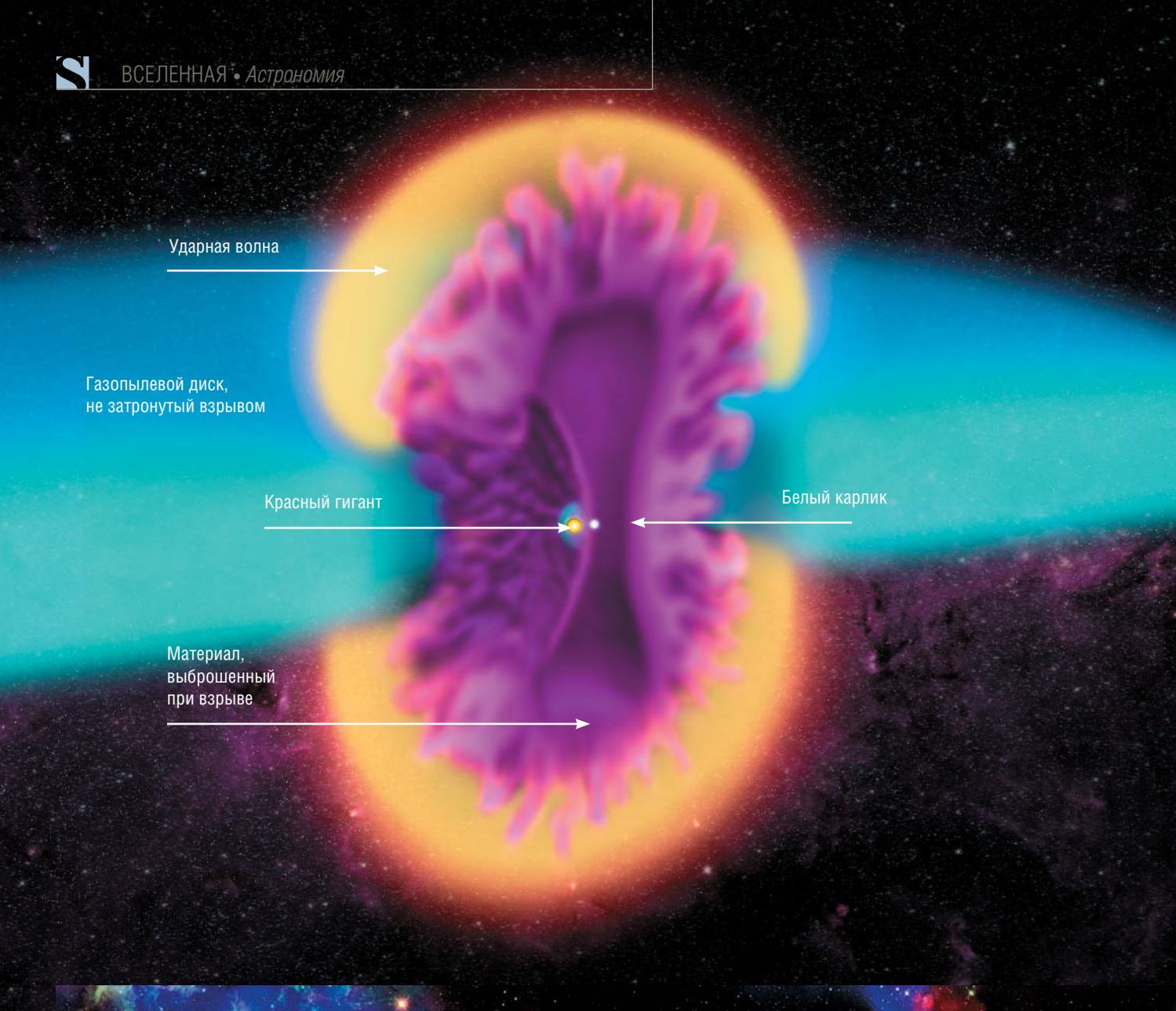
электронного газа. Однако эта задержка недолговечна. Ядра неона и магния поглощают электроны и превращаются в изотопы элементов с меньшими номерами по таблице Менделеева. Плотность электронного газа падает, сердцевина звезды стягивается, и процесс все равно заканчивается коллапсом железного ядра.

Гиперновые, сила аккреции и чудеса связанных пар

В апреле 2007 г. международная команда астрономов зарегистрировала сверхновую аномально высокой мощности, выбросившую в пространство огромное количество кремния и радиоактивного никеля-56. В каталоги она вошла под индексом SN 2007bi. Не исключено (хотя пока и не доказано!), что это было первое наблюдение сверхновой с парной нестабильностью, предсказанной теоретиками еще в 1960-е гг. Опубликованные тогда сценарии описывали эволюцию звезд с начальными массами от 130 до 250 солнечных. Масса звезды-предшественницы новооткрытой сверхновой лежала как раз в середине этого промежутка.

Звезды этой группы обычным образом (но очень быстро) сжигают водород и гелий. После сгорания углерода в их ядрах возникают гамма-кванты, которые при столкновениях превращаются в электронно-позитронные пары, а возможно, и в более тяжелые частицы и античастицы. Однако в этом случае пульсаций не возникает, и внешние слои звезды падают в ее центр. Эта имплозия еще больше разогревает недра звезды и запускает термоядерные реакции, в результате которых синтезируется ряд тяжелых элементов, в том числе и никель-56. Давление в перегретом ядре катастрофически возрастает, ядро взрывается, не успев сколлапсировать в черную дыру. Поскольку вся звездная материя без остатка выбрасывается в пространство, такие сверхновые — один из главных источников элементов с большими атомными номерами.

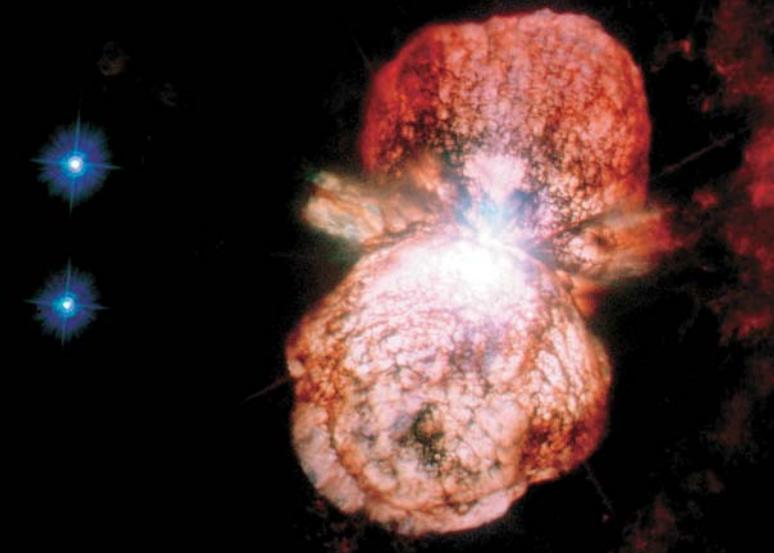
Взрывы сверхмассивных звезд принято называть гиперновыми. Строго говоря, этот термин не относится к финальной стадии жизни звезд с начальной массой более 250–260 солнечных масс, которые изобиловали в ранней Вселенной. В их центральных зонах порождаются гамма-кванты, энергии которых достаточны для



V745 Sco – это двойная звездная система, в которой красный гигант и белый карлик находятся на очень близких орбитах. Соседство это настолько близкое, что гравитационная сила карлика «вытягивает» вещество из гиганта, которое постепенно падает на поверхность малой звезды. При накоплении достаточного количества звездного материала у белого карлика происходит термоядерный взрыв, вызывающий резкое увеличение светимости звездной системы – вспышку новой. На протяжении десятилетий астрономы знали о нерегулярных вспышках в этой системе, но лишь 6 февраля 2014 г. им удалось наблюдать такое событие с помощью набора космических телескопов, включая космическую рентгеновскую обсерваторию «Чандра». Благодаря двухнедельным наблюдениям была создана трехмерная компьютерная модель взрыва, которая объяснила наблюдаемые явления (вверху).

Двойную систему по экватору окружает большой холодный газопылевой диск, который образуется из материала, «вытянутого» белым карликом из красного гиганта. Ударная волна взрыва новой врезалась в диск, вероятно, в областях северного и южного полюсов системы, как и выброшенный при взрыве материал. Взаимодействие с холодным диском заставило взрывную волну и звездное вещество замедлиться, что привело к образованию расширяющегося кольца горячего газа, излучающегося в рентгеновском диапазоне. Несмотря на выброс огромного количества энергии и вещества, равного одной десятой массы Земли, и повторяющиеся вспышки, на поверхности белого карлика вещество продолжает накапливаться, что может привести к термоядерному взрыву и уничтожению системы – вспышке сверхновой типа Ia. © NASA/CXC/M.Weiss

На начало XIX в. двойная звездная система Эта Киля в созвездии Киля была практически незаметна, но уже к апрелю 1843 г. она стала второй самой яркой звездой на небе после Сириуса. В последующие годы ее свет постепенно тускнел, а в прошлом веке она стала невидимой для невооруженного глаза. Большая из двух звезд в системе Эта Киля – это огромная и нестабильная звезда, которая приближается к концу своей жизни. Такие мощные всплески светимости, подобные той, что наблюдали астрономы XIX в., называют «самозванцами», потому что внешне они похожи на сверхновые. Огромные облака материи, выброшенные во время взрыва полтора столетия назад, сегодня известны как туманность Гомункул. © ESA/NASA



возбуждения и последующего распада атомных ядер (этот процесс называется фотодезинтеграцией). Такие звезды не взрываются, а просто исчезают, давая начало черным дырам.

От взрывов одиночных звезд перейдем к звездным парам.

Сначала посмотрим на системы, состоящие из нормальных звезд главной последовательности, обращающихся вокруг общего центра инерции. Каждая звезда окружена областью пространства, где господствует ее собственное притяжение. Если такие области пересекут плоскостью, в которой движутся оба светила, получатся две вытянутые в линию петли с общей точкой на отрезке, соединяющем звездные центры (для наглядности придется остановить время, поскольку вся фигура вращается). В этой точке каждая из звезд тянет в свою сторону с одинаковой силой. Эту точку называют *первой точкой Лагранжа*. В 1772 г. Жан-Батист Лагранж описал пять точек, которые сейчас носят его имя, однако первые три еще в 1765 г. идентифицировал Леонард Эйлер.

Пространственные пузыри, о которых идет речь, именуют *полостями Роша*. Космические частицы внутри полости Роша вращаются лишь вокруг той звезды, которую эта полость охватывает. Однако вещество

может перетекать сквозь горловину, соединяющую полости, т. е. через окрестности первой точки Лагранжа. Материя, которая находится вне полостей, может стабильно обращаться вокруг звездной пары в целом, но ее траектории не ограничиваются путями, охватывающими одну-единственную звезду.

Как правило, обе звезды бинарной системы порождены одним и тем же молекулярным облаком, поэтому имеют одинаковый состав, но различные начальные массы. Более тяжелая звезда первой сжигает в ядре водород, теряет стабильность и становится красным гигантом. Поэтому она способна не только заполнить собственную полость Роша, но и выйти за ее границу. При этом тяготение центра звезды не может удержать частицы раздувшейся оболочки, и звезда теряет вещество, часть которого попадает в гравитационный плен к ее «компаньонке». Из-за «похудания» звезды-донора ее полость Роша стягивается, а скорость утечки вещества растет. Даже при уравнивании звездных масс утечка лишь замедляется, но не прекращается вовсе.

Перенос вещества приводит к сложной эволюции звездной пары. Менее массивная звезда захватывает материю «соседки» и увеличивает свой угловой момент. Чтобы сохранить суммарный момент инерции бинарной системы, звезды сближаются. Позже, когда первая звезда становится легче «компаньонки», они начинают

расходиться – опять же в силу сохранения общего углового момента. Если вторая звезда успевает выйти за границы своей полости Роша, она тоже оказывается обреченной на потерю плазмы.

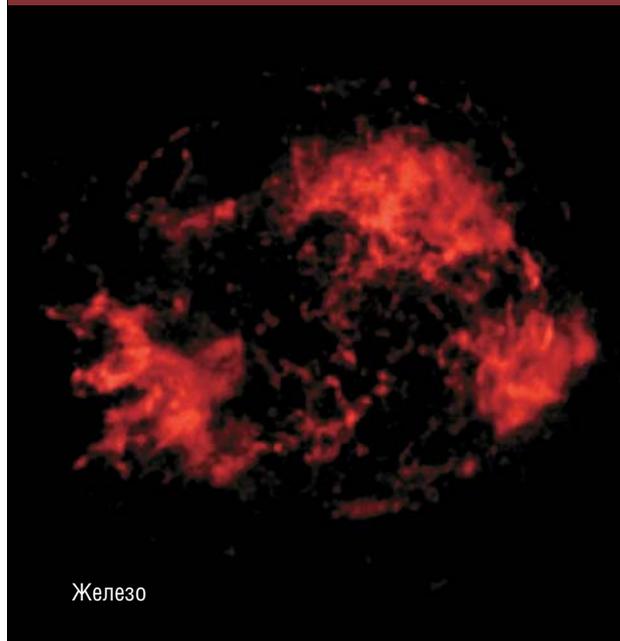
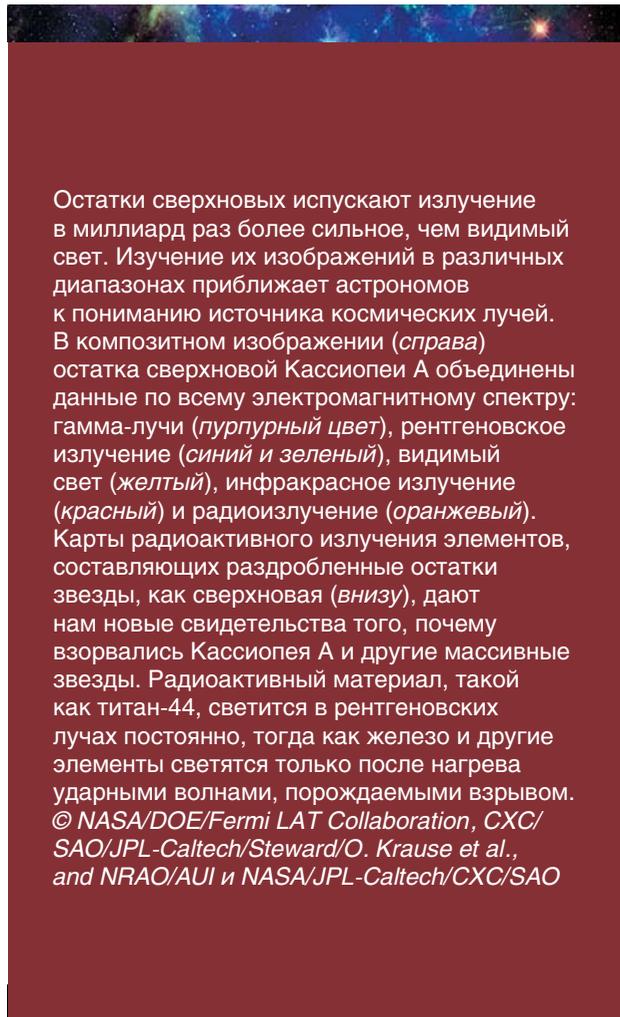
Эти превращения чреваты различными исходами. Часть выброшенной материи выходит на орбиты, целиком окружающие звездную пару. Обычно она образует плоское вращающееся кольцо, которое называется *диском экскреции* (позднелатинское слово *excrētīō* переводится как выделение). В особых обстоятельствах звездная пара может утонуть в шарообразном газовом облаке, порожденном ушедшей в пространство плазмой. В то же время каждая звезда имеет шансы обзавестись собственным кольцом поменьше и поплотнее – *аккреционным диском* (*accrētīō* – прирост). Возможны и более экзотические сценарии (такие как столкновение и слияние звезд или же съедание соседки более крупной звездой), но в такие дебри мы не станем заглядывать.

До сих пор речь шла о нормальных звездных парах, но это не обязательно. Для запуска аккреции достаточно, чтобы лишь один из партнеров обладал газовой оболочкой, способной раздуться и уйти сквозь горловину полости Роша. Поэтому аккреция возникает и в бинарных системах, объединяющих обычную звезду с компактным телом из вырожденной материи (белым карликом либо нейтронной звездой) или даже с черной дырой. Кстати, аккреционные диски впервые обнаружили при наблюдении белых карликов, имеющих в компаньонах обычные звезды. Такие процессы нередко приводят к очень экзотическим исходам: например, рождению *рентгеновского пульсара* при аккреции на сильно намагниченную нейтронную звезду. Однако нас интересуют только различные сценарии рождения новых звезд. Они практически всегда реализуются при аккреции вещества водородной оболочки звезды-донора на белый карлик.

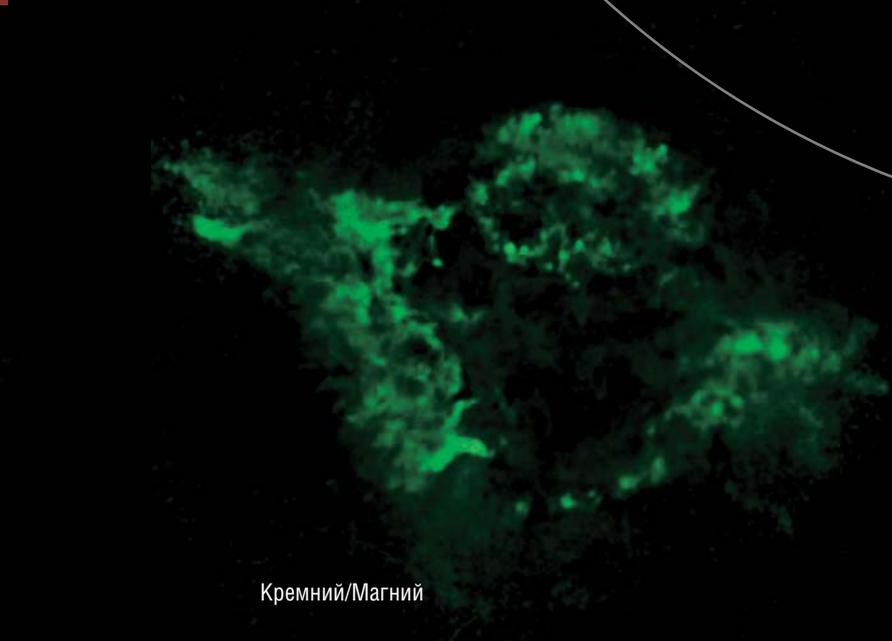
Сначала рассмотрим обширный класс космических объектов, объединенных названием *катаклизмические переменные*. Это тесные бинарные системы, состоящие из не утратившей активности звезды и белого карлика. Они проявляют себя нестабильным излучением – отсюда и название.

Аккреционный диск всегда нагревается внутренним трением и охлаждается собственным излучением. При сбалансированности этих процессов он находится в тепловом равновесии, при нарушении которого в диске могут возникнуть волны тепловой нестабильности, резко увеличивающие генерацию фотонов. Светимость диска за несколько месяцев может вырасти на один-три порядка, составив от одной до десяти светимостей Солнца. Эти «внутридисковые» катаклизмы называются *карликовыми новыми*. Первая карликовая новая была

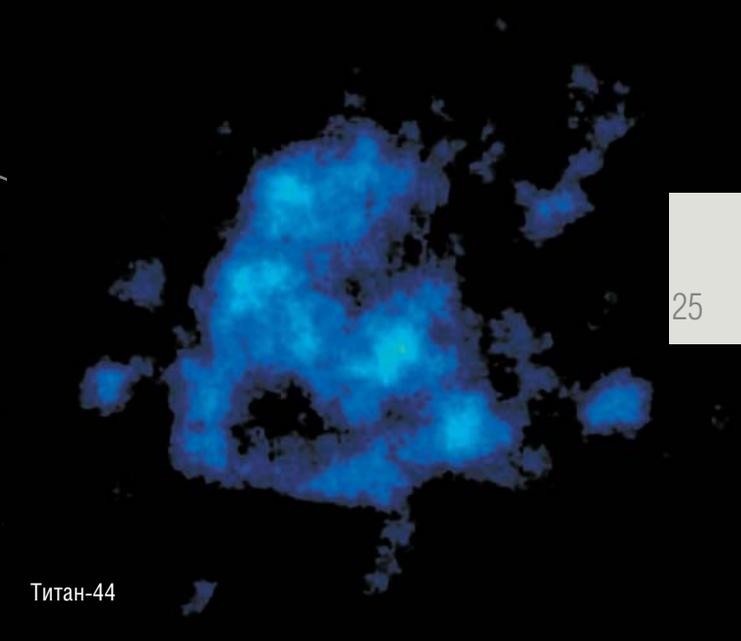
Остатки сверхновых испускают излучение в миллиард раз более сильное, чем видимый свет. Изучение их изображений в различных диапазонах приближает астрономов к пониманию источника космических лучей. В композитном изображении (справа) остатка сверхновой Кассиопеи А объединены данные по всему электромагнитному 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 (внизу), 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

замечена в созвездии Близнецов еще в 1855 г., однако механизм генерации таких вспышек лишь через 119 лет расшифровал астроном из Кейптаунского университета Брайан Уорнер.

Куда эффективней *классические новые звезды*, или просто *новые*. Они вспыхивают в результате падения (со скоростью порядка тысячи км в секунду) на поверхность белого карлика вещества аккреционного диска. Это вещество почти полностью состоит из водорода и может служить топливом термоядерных реакций – для этого нужно, чтобы водород разогрелся до критической температуры около 10 млн К. Поскольку при термоядерных реакциях интенсивно выделяется энергия, на поверхности белого карлика возникают ударные волны, которые буквально взрывают его внешний слой и выбрасывают сверхгорячую плазму в окружающее пространство. Светимость системы в течение нескольких суток возрастает на три-шесть порядков, достигая 100 тыс. светимостей Солнца. По завершении вспышки белый карлик начинает копить на поверхности новый запас водорода – горючее для будущего очередного взрыва. Согласно теории, классические новые могут периодически загораться с интервалом в 10 тыс. лет, но до сих пор это не было подтверждено наблюдениями – история астрономии значительно короче.

Другой вид катаклизмических переменных – *повторные новые*. Эти весьма редкие «звери» космического «зоопарка» (в нашей Галактике их известно всего десятков) увеличивают свою яркость в среднем не больше, чем тысячекратно, зато вспыхивают каждые 10–100 лет. Механизм этих вспышек пока в точности неизвестен. Предполагается, что они возникают при интенсивной (до одной десятиллионной солнечной массы в год) аккреции водорода на поверхность самых массивных белых карликов, масса которых лишь немногим меньше предела Чандрасекара.

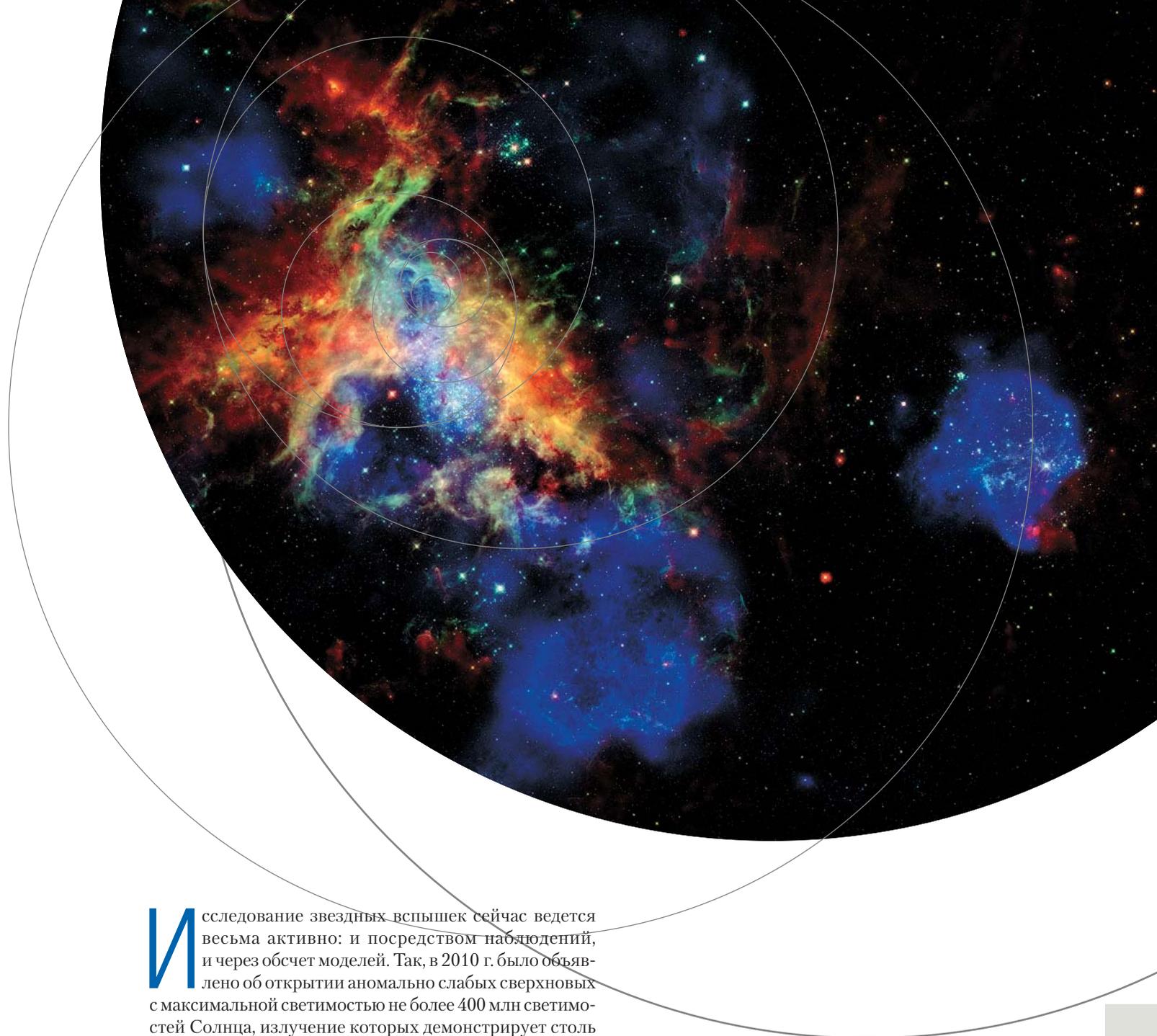
Еще один интересный подкласс – *симбиотические новые*, которые отличаются очень широким спектром излучения, охватывающим большинство диапазонов электромагнитных волн. Они возникают в звездных парах, состоящих из пульсирующего красного сверхгиганта на последней стадии своей эволюции и молодого, а потому очень горячего белого карлика средней массы. Звезда-донор в заключительной фазе интенсивно сбрасывает вещество своей оболочки и приближается к превращению (через несколько миллионов лет) в белый карлик. Считается, что именно этот процесс лежит в основе специфического характера спектра симбиотических новых, хотя многие детали еще не ясны.

Самый блистательный (и в прямом, и в переносном смысле!) результат аккреции водорода на углеродно-кислородный белый карлик – это вспышка

сверхновой. Согласно стандартному сценарию (а есть и другие), она происходит, когда приток аккрецированного вещества доводит массу карлика-акцептора до предела Чандрасекара. Поскольку в этом случае давление вырожденного электронного газа уже не может противостоять гравитации, карлик сжимается примерно в три раза, и температура его центральной зоны резко возрастает. Когда она достигает 400 млн К, начинается термоядерное горение углерода, которое дополнительно нагревает ядро. Поскольку при этом давление вырожденного газа не увеличивается (вспомним, что оно не зависит от температуры!), ядро не расширяется и, следовательно, не охлаждается. Это приводит к катастрофическому росту темпа термоядерных реакций, которые за доли секунды порождают все более тяжелые ядра, в том числе и радиоактивный никель-56. Фронт термоядерного горения движется от ядра карлика к его поверхности, скорее всего, сначала с дозвуковой, а потом и со сверхзвуковой скоростью. В результате карлик взрывается без остатка, разбрасывая «новорожденную» (если угодно, новосинтезированную) материю по окружающему пространству. В этом смысле его взрыв похож на взрыв коллапсирующей звезды с начальной массой 130–250 солнечных масс, хотя физические механизмы совершенно различны.

Поскольку углеродно-кислородный карлик лишен водорода, линии этого элемента в спектре излучения сверхновой отсутствуют, из-за чего ее и относят к I типу, а конкретно, к подтипу Ia. К подтипам Ib и Ic, напротив, относят бедные водородом коллапсирующие сверхновые (а сверхновым Ic не хватает еще и гелия). Принято считать, что эти звезды лишились внешних слоев еще до взрыва, что и объясняет их спектральные аномалии.

Сверхновые подтипа Ia очень эффективны. Выброшенный в пространство никель-56 дает начало радиоактивному изотопу кобальта с таким же атомным весом, а тот – стабильному изотопу железа. При распаде ядер никеля и кобальта возникает гамма-излучение, которое нагревает остатки взорвавшейся звезды и заставляет их интенсивно светиться в рентгеновском и видимом диапазонах. Эти сверхновые обладают замечательной особенностью, за которую их очень любят астрономы и космологи: у них примерно одинаковая пиковая светимость, в четыре миллиарда раз превышающая солнечную. И хотя их постоянство не абсолютно, однако отклонения от среднего уровня не превышают 20–30% и без особых проблем поддаются учету. Поэтому наблюдение таких сверхновых сыграло первостепенную роль в открытии ускоренного расширения Вселенной, состоявшемся два десятилетия назад. Но это уже совсем другая история.



Исследование звездных вспышек сейчас ведется весьма активно: и посредством наблюдений, и через обсчет моделей. Так, в 2010 г. было объявлено об открытии аномально слабых сверхновых с максимальной светимостью не более 400 млн светимостей Солнца, излучение которых демонстрирует столь же аномальное изобилие кальция, как и у нашего светила. Уже зарегистрировано полтора десятка таких звезд, но механизм их появления на свет пока неизвестен.

В наши дни эти исследовательские программы осуществляются на базе новейшей многоканальной астрономии (*multimessenger astronomy*) с широким использованием ресурсов астроинформатики. Эта новая научная дисциплина, возникшая в последнем десятилетии, стимулировала очень плотную кооперацию между астрономами и специалистами по вычислительным системам и компьютерным кодам. Перефразируя великого Булгакова, не побоюсь предсказать, что этот научный «роман» принесет еще сюрпризы.

Литература

- Сурдин В. Г. *Звезды*. М.: Физматлит, 2009. 428 с.
 Шкловский И. С. *Звезды: их рождение, жизнь и смерть*. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1984. 384 с.
 Шкловский И. С. *Сверхновые звезды и связанные с ними проблемы*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 440 с.
 Branch D., Wheeler J. C. *Supernova Explosions*. Springer, 2017. 721 p.
 Lequeux J. *Birth, Evolution and Death of Stars*. World Scientific Publishing Co., 2013. 172 p.
 Loeb A. *How Did the First Stars and Galaxies Form?* Princeton U. Press, Princeton, N.J., 2010. 193 p.