

С. з. II типа (SN1987A), вспыхнувшая в 1987 в БМО, имеет необычайно низкую светимость: в максимуме блеска абс. величина в полосе  $B$  всего  $\approx -14,5^m$ . В то же время на квазиэкспоненц. участке она не отличается от других С.з. II типа и её блеск уменьшается с темпом ок.  $0,0078^m$  в сутки. Энергия эл.-магн. излучения (от дальней ИК- до дальней УФ-области спектра), испущенная за всё время,  $\approx 8 \cdot 10^{48}$  эрг. Близость БМО, находящегося на расстоянии примерно 52 кпк, позволила выполнить уникальные наблюдения. Впервые стали известны свойства звезды накануне вспышки С. з. Установлено, что взорвалась звезда-сверхгигант спектрального класса  $B3Ia$  с массой  $15-25 M_{\odot}$  и радиусом примерно  $50 R_{\odot}$ . Именно размеры звезды, малые по сравнению с размерами звёзд, вспыхивающих как С. з. II типа, объясняют необычные свойства кривой блеска SN1987A (рис. 3). Впервые нейтринные телескопы зарегистрировали сигнал от вспышки С. з. Нейтринная вспышка была зафиксирована примерно за 3 ч до первого наблюдения оптич. вспышки и обладает след. характеристиками: ср. энергия детектируемых электронных антинейтрино  $20-30$  МэВ; предположит. длительность нейтринного сигнала ок.  $10$  с; полная энергия, унесённая нейтрино из звезды,  $\approx 3 \cdot 10^{53}$  эрг. Нейтринная вспышка является непосредств. свидетельством гравитац. коллапса центр. ядра взорвавшейся звезды. Впервые на стадии квазиэкспоненц. падения блеска зарегистрирована гамма-линия  $847$  кэВ, к-рая возникает при распаде радиоакт. изотопа кобальта ( $^{56}Co$ ) в железо. Характерное время квазиэкспоненц. спада блеска  $111,3$  сут, что практически совпадает со временем распада  $^{56}Co$ . Все эти факты свидетельствуют о том, что в максимуме блеска и после него осн. источником энергии эл.-магн. излучения является распад  $^{56}Co$ .

**Конечные стадии эволюции звёзд и вспышки сверхновых звёзд.** Вспышка С. з. является результатом динамич. эволюции ядра звезды, к-рая начинается с момента нарушения гидростатич. равновесия в звезде, уже далеко продвинувшейся в своей эволюции. Динамич. эволюция ядра завершается либо полным разлетом вещества звезды, либо гравитационным коллапсом ядра. Характер эволюции в осн. определяется массой звезды.

Поздние стадии эволюции звезды начинаются с термоядерного горения гелия в её центре. области, что на Герцшпрунга — Расселла диаграмме соответствует переходу звезды с гл. последовательности в область красных или голубых гигантов. В процессе эволюции центр. область звезды становится всё плотнее и горячее, а её оболочка, наоборот, расширяется и охлаждается. При этом возрастают и становятся определяющими потери энергии за счёт нейтринного излучения (нейтрино образуются гл. обр. при аннигиляции электрон-позитронных пар). После завершения гелиевого горения в центре звезды образуется углеродно-кислородное ядро (С-О-ядро), причём его масса тем больше, чем больше масса звезды на гл. последовательности. В С-О-ядре с достаточно малой массой давление полностью определяется вырожденным газом электронов. Вырожденное С-О-ядро может иметь массу вплоть до Чандрасекара предела, т. е. до верх. предела массы вырожденной звезды, ещё находящейся в гидростатич. равновесии. Для С-О-ядра предел Чандрасекара равен  $1,44 M_{\odot}$ , и ядро с массой, превышающей это значение, является невырожденным. Дальнейшая эволюция звезды происходит по-разному для вырожденного и невырожденного С-О-ядра.

Сначала в вырожденном С-О-ядре термоядерные реакции с участием углерода практически не протекают, поскольку существует интенсивное охлаждение ядра нейтринным излучением (нейтрино уносят энергию из ядра). Выделение энергии в звезде на этой стадии эволюции происходит в осн. за счёт слоевых источников энергии (фронтов термоядерного синтеза He, C и O),

самый внутренний из к-рых (синтез C и O из He) расположен на границе вырожденного ядра. Масса С-О-ядра постепенно увеличивается благодаря поступлению в него продуктов горения из слоевого источника. По мере увеличения массы в С-О-ядре возрастают плотность и темп-ра. Приближение массы С-О-ядра к пределу Чандрасекара сопровождается реаким увеличением плотности в центре ядра, что приводит к сильному релятивистскому вырождению электронного газа. Такой рост вырожденного ядра характерен для эволюции звезды с массой  $4-8 M_{\odot}$  на гл. последовательности. В конце концов в ядре создаются условия для «зажигания» углерода. Поскольку повышение темп-ры в сильно вырожденном веществе практически не приводит к увеличению давления, то горение углерода развивается при пост. плотности и приобретает взрывной характер: нарушается гидростатически равновесный режим горения, происходит термоядерный взрыв С-О-ядра звезды. В процессе углеродного горения темп-ра сильно повышается и вслед за основной ядерной реакцией синтеза магния осуществляется цепочка ядерных реакций, ведущих к образованию элементов вплоть до элементов «железного пика» (железо, никель и др.) на кривой распространённости элементов, в т. ч. радиоактивного изотопа никеля (см. *Нуклеосинтез*). Последний играет важную роль в формировании кривых блеска С. з. Термоядерный взрыв вырожденного С-О-ядра приводит к частичному или полному сгоранию углерода. При этом происходит полный разлет С-О-ядра с кинетич. энергией разлетающегося вещества  $10^{50}-10^{51}$  эрг. Таков, по-видимому, механизм вспышки С. з. I типа.

Невырожденное С-О-ядро образуется в звезде, имеющей на гл. последовательности массу больше  $10 M_{\odot}$ . В этом случае дальнейшая ядерная эволюция центр. областей звезды проходит через стадии термоядерного горения углерода, неона, кислорода, кремния и завершается образованием элементов «железного пика». После исчерпания запасов ядерного топлива звезда интенсивно теряет энергию посредством нейтринного излучения. Потери энергии приводят к дальнейшему сжатию звезды и нагреву вещества, т. к. электронный газ внутри достаточно массивных железных ядер звёзд фактически не вырожден. Увеличение темп-ры и плотности, в конце концов, вызывает распад ядер элементов «железного пика» на нейтроны и ядра гелия, к-рые, в свою очередь, распадаются на нейтроны и протоны. Процесс распада ядер железа требует столь значит. затрат энергии теплового движения на преодоления энергии связи атомных ядер, что с увеличением плотности вещества резко замедляется рост давления. К подобному эффекту ведут также процессы рождения электрон-позитронных пар и процессы захвата электронов ядрами элементов «железного пика». В результате нарушается гидростатич. равновесие — силы давления не могут противостоять силам тяготения, и начинается гравитац. коллапс железного ядра звезды. При массе железного ядра не более  $\approx 2 M_{\odot}$  (т. е. меньше предельной массы холодной нейтринной звезды) гравитац. коллапс в нек-рый момент останавливается. Образовавшаяся горячая нейтронная звезда охлаждается за счёт излучения нейтрино с её поверхности и за характерное время  $\sim 10$  с превращается в холодную нейтронную звезду. Такой гравитац. коллапс может быть обнаружен по мощному импульсу нейтринного излучения, что и произошло в случае SN1987A. При массе железного ядра больше предельной ( $> 2 M_{\odot}$ ) гравитац. коллапс продолжается неограниченно и переходит в релятивистскую стадию с образованием чёрной дыры.

**Интерпретация вспышек сверхновых звёзд.** Взрывное выделение энергии, к-рое сопровождается феноменом вспышки С. з., приводит к формированию сильной ударной волны, распространяющейся к поверхности звезды. При прохождении ударной волны внутр. энер-