

Сверхновая SN 2007bi подтверждает предсказания 45-летней давности

4.12.09 | [Астрономия](#), [Алексей Левин](#)



Сверхновая SN 2007bi вспыхнула в апреле 2007 года в безымянной карликовой галактике, расположенной неподалеку от Млечного Пути. После 18 месяцев наблюдений на 10-метровом телескопе «Кек-1» (Мауна-Кеа, Гавайи) и Очень большом телескопе, [VLT](#) (Чили) можно с определенной долей уверенности сказать, что SN 2007bi относится к предсказанному еще в 1964 году типу сверхновых — нестабильных по отношению к образованию электрон-позитронных пар (PISN, [pair-instability supernova](#)). Фото с сайта [www.astrosurf.com](#)

Международная коллаборация астрономов [The Nearby Supernova Factory](#) опубликовала [результаты](#) анализа более чем полуторагодовых (555 суток) наблюдений сверхновой звезды SN 2007bi, которые велись после ее регистрации в апреле 2007 года. Она [вспыхнула](#) в еще не имеющей собственного имени карликовой галактике, расположенной в сравнительной близости от Млечного Пути (величина красного смещения составляет всего лишь около 0,1279). Анализ собранных данных позволяет с достаточной уверенностью предположить, что рождение этой сверхновой обусловлено специфическим механизмом дестабилизации ядра звезды-предшественницы, впервые очерченным в классической работе Уильяма Фаулера и Фреда Хойла (см.: William A. Fowler, F. Hoyle. [Neutrino Processes and Pair](#)

Принято считать, что одиночные (то есть не имеющие близких соседей) звезды могут взрываться сверхновыми только в ходе гравитационного коллапса, инициированного выгоранием основных запасов их водородного топлива. Его претерпевают крупные (не менее 10 солнечных масс) и потому молодые звезды, типичный возраст которых не превышает нескольких миллионов лет. В финале жизни такой звезды у нее образуется железное ядро, покрытое слоями кремния и других относительно легких элементов и заключенное в водородную оболочку. Если в окрестностях ядра продолжают процессы термоядерного синтеза, его масса растет и достигает предела Чандрасекара. Поскольку железо не способно к термоядерному горению, звездное ядро под давлением вышележащих слоев сжимается с огромной скоростью, доходящей до 20% скорости света. В результате этой сверхбыстрой компрессии электроны буквально вжимаются в атомные ядра, превращая протоны в нейтроны и нейтрино. Нейтроны остаются на месте, а нейтрино покидают звезду, охлаждая ее сердцевину. Поскольку звездное ядро при этом охлаждается, давление его вещества падает, а скорость гравитационного сжатия возрастает.

Согласно модельным вычислениям, на этой стадии возможны два сценария. Звезды с массой от 20 до 100 солнечных масс коллапсируют полностью и дают начало черным дырам. У звезд в диапазоне 10–20 солнечных масс образуются несжимаемые ядра из нейтронной материи, плотность которой в 100 триллионов раз превышает плотность воды. Внешние слои звезды под действием тяготения 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 сверхмощным взрывом. Скорее всего, его энергию увеличивают тепловые нейтрино, приходящие из нагретого до сотен миллиардов градусов нейтронного ядра, которые частично поглощаются во внешних слоях звезды и тем увеличивают их температуру. От звезды остается деформированный нейтронный шар радиусом несколько километров, окруженный разлетающимся облаком светящейся плазмы, «раздутым» нейтринным давлением.

Это только общая картина. Физические процессы, которые следуют за коллапсом железного ядра, очень сложны и во многом недостаточно изучены. Их моделирование требует точного учета взаимодействия нейтрино с веществом и связанных с ним транспортных процессов, порождающих сильно турбулентные перемещения огромных масс релятивистской плазмы. Такие процессы пока что не поддаются уверенному моделированию даже на самых мощных суперкомпьютерах.

Как ни парадоксально, гравитационный коллапс звезд с начальной массой свыше 100 масс Солнца моделируется гораздо надежней. 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 до того противодействовало гравитационному сжатию звезды и удерживало ее в состоянии гидростатического равновесия. Далее всё зависит от начальной звездной массы. Если она не превышает 130–140 солнечных масс, в недрах звезды развиваются пульсации, которые могут инициировать быстрый выброс части вещества ее внешних оболочек. Однако эти пульсации недостаточно сильны, чтобы полностью разрушить звезду изнутри, — они быстро гасятся, и звезда возобновляет коллапс, рождая железное ядро. Если же масса звезды при рождении превышает 140 солнечных масс, образование электронно-позитронных пар настолько снижает плотность фотонного газа, что внешние слои звезды, которые ранее держались за счет его давления, падают к ее центру. Этот процесс разогревает звездные недра до такой степени, что в них начинаются реакции термоядерного синтеза натрия, магния, кремния и еще ряда элементов, идущие с интенсивным выделением энергии. В результате давление в звездном ядре лавинообразно нарастает, и оно взрывается, полностью разрушая звезду изнутри.

Характерной особенностью этого процесса является образование больших количеств радиоактивного никеля-56, который, уже в составе разлетающегося после взрыва звездного вещества, сначала превращается в радиоактивный кобальт-56, а потом в стабильный изотоп железа с тем же атомным весом. Расчеты показывают, что общая масса синтезированного никеля

лежит в диапазоне от 3 до 10 солнечных масс или даже несколько выходит за его верхнюю границу.

Здесь необходимы два существенных уточнения. Во-первых, приведенные параметры начальных звездных масс относятся к светилам, которые при рождении состоят только из водорода и гелия. Если звезда изначально содержит и более тяжелые элементы, образование пар начинается при более высоких начальных массах. Во-вторых, в коллапсирующих звездах с исходной массой 250–260 солнечных масс рождаются гамма-кванты, энергии которых достаточны для возбуждения и последующего распада атомных ядер (этот процесс называется фотодезинтеграцией). Как показали те же Фаулер и Хойл, такие звезды в финале коллапса не взрываются, а просто исчезают, давая начало черным дырам.

Описанный тип сверхновых получил название PISN ([pair-instability supernova](#)). Свыше четырех десятилетий он оставался чисто теоретической возможностью, не подкрепленной реальными наблюдениями. Правда, 18 сентября 2006 года в галактике NGC 1260, отстоящей от Земли на 238 миллионов световых лет, была зарегистрирована сверхновая [SN 2006gy](#) с чрезвычайно высокой абсолютной оптической яркостью, которую поначалу сочли хорошим кандидатом в PISN. Ее масса приблизительно равнялась 150 массам Солнца, что тоже свидетельствовало в пользу этой гипотезы. Однако позднейший [анализ](#) показал, что этот вывод, скорее всего, был преждевременным. Первоначально предполагалось, что оптическая яркость продуктов взрыва объясняется рождением пяти солнечных масс радиоактивного никеля, что вполне соответствовало расчетным параметрам PISN. Со временем было показано, что ее можно объяснить тем, что продукты взрыва нагрели газовую оболочку, которая ранее окружала догорающую звезду. Эта интерпретация хорошо согласуется с тем, что кривая видимой яркости со временем падала медленней, чем можно было ожидать от сверхновой класса PISN.

SN 2007bi, напротив, выглядит куда более надежным кандидатом. Спектральный анализ ее излучения, судя по всему, исключает существование предвзрывной газовой оболочки. Начальная масса звезды примерно соответствует 200 солнечным массам, что гарантирует ее попадание в класс PISN даже при наличии весьма ощутимых (порядка 25% по массе) примесей элементов тяжелее гелия. Авторы статьи в *Nature* полагают, что масса взорвавшегося гелиевого ядра составляла от 95 до 110 солнечных масс. Их вычисления также показывают, что количество синтезированного никеля-56 заведомо превысило 3 массы Солнца, но могло дойти и до 11 солнечных масс. Состав продуктов взрыва, определенный с помощью спектрального анализа, также хорошо укладывается в общепринятую модель рождения PISN. В общем, вполне возможно, что предсказание Фаулера и Хойла наконец-то стало реальностью.

Источник: Gal-Yam et al. [Supernova 2007bi as a pair-instability explosion](#) // Nature. V. 462. P. 624–627 (3 December 2009); doi:10.1038/nature08579.

Алексей Левин