

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.84

СВЕРХНОВЫЕ В ДРУГИХ ГАЛАКТИКАХ *)

Р. Кишнер

Эти звездные катаклизмы происходят в галактике примерно раз в пятьдесят лет. Именно поэтому природу сверхновых лучше исследовать, наблюдая не нашу Галактику, а другие.

Катастрофический взрыв массивной звезды — сверхновая — происходит, как полагают, в галактике примерно дважды в столетие. Последний, видимый с Земли, взрыв сверхновой в нашей Галактике произошел в 1604 г., за пять лет до того, как в небо был направлен первый телескоп. Теперь, однако, когда с помощью больших телескопов с Земли обозревают тысячи галактик, можно видеть взрыв сверхновой в той или иной галактике в среднем раз в несколько месяцев. В связи с этим в обсерваториях, разбросанных по всему миру, астрономы производят обзоры неба с целью обнаружения в отдаленных галактиках таких взрывов звезд — взрывов, яркость которых в течение нескольких недель превышает суммарную яркость миллиардов входящих в эту галактику звезд.

За последние 90 лет наблюдали почти 400 сверхновых в других галактиках. Эти наблюдения помогли составить полную картину жизненного цикла звезд. Большинство астрофизиков полагают, что сверхновая — мощный взрыв, приводящий к концу существования обыкновенной звезды. После некоторых сверхновых может остаться космический «пепел» в виде нейтронных звезд или черных дыр. Были высказаны предположения, что невероятно высокие температура и давление, возникающие в процессе взрыва, приводят к синтезу новых элементов с последующим выбросом их в межзвездный газ галактики и что сверхновые являются, возможно, источником космических лучей, постоянно бомбардирующих Землю. Кроме того, энергия, освобождающаяся в результате взрыва сверхновых, может каким-то образом быть связана с такими экзотическими и мощными внегалактическими источниками излучения, как галактики Сейферта и квазары.

Первую и самую яркую сверхновую во внешней галактике увидели в 1885 г. В августе этого года новая звезда неожиданно появилась в центральной области соседней с нами галактики — в Большой туманности в Андромеде. Яркость звезды быстро возрастала, пока не достигла седьмой величины, т. е. была лишь немного меньше яркости самых слабых звезд, видимых невооруженным глазом. В то время не было даже известно, входит ли Туманность Андромеды и другие аналогичные туманности в состав нашей Галактики, или они являются независимыми системами, расположен-

*) Robert P. Kirshner, Supernovas in Other Galaxies, Scientific American 235 (6), 89 (December 1976). Перевод Н. И. Гинзбург.

Роберт Кишнер — сотрудник Мичиганского университета, США.

© Scientific American, Inc., 1976.

© Перевод на русский язык.
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука».
«Успехи физических наук», 1977 г.

ными вне ее. Обычные новые — довольно распространенные звездные взрывы, при которых яркость звезды увеличивается примерно в 10 000 раз, к 1885 г. были уже хорошо известны. В этой связи предположили, что новая звезда в Туманности Андромеды — обычная новая; в результате

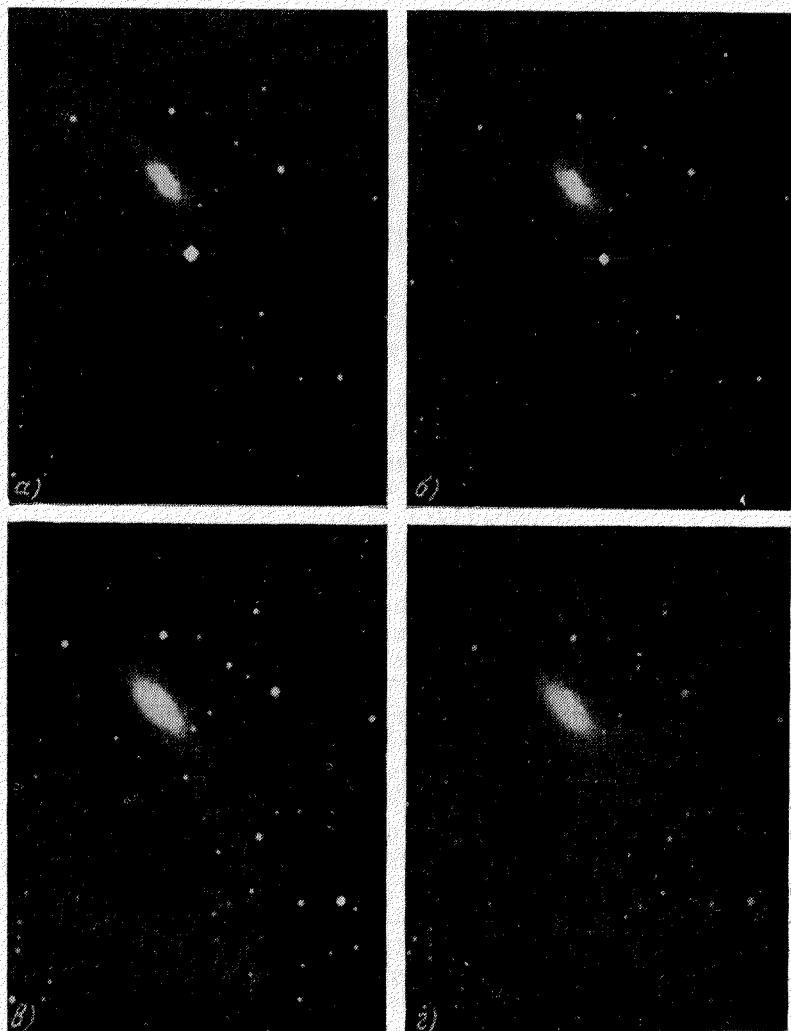


Рис. 1. Взрыв сверхновой в галактике NGC 5253 был столь мощным, что в течение нескольких недель яркость звезды была такой же, как яркость всех остальных звезд этой галактики, вместе взятых.

Фотографии сверхновой, обнаруженной в мае 1972 г., были сделаны Чарльзом Т. Коуэлом из Калифорнийского технологического института с помощью 48-дюймового телескопа Шмидта, установленного на горе Паломар. Эта сверхновая — пятая из открытых в 1972 г. сверхновых в других галактиках; поэтому она была обозначена как SN 1972e. Ряд фотографий (а — г) был получен примерно в течение года — от 16 мая 1972 г. (а) до 24 апреля 1973 г. (г). Спектр объекта указывает на то, что мы имеем дело со сверхновой I типа — взрывом звезды с массой порядка массы Солнца.

этого предположения согласно оценке расстояния туманность была помещена внутри нашей Галактики.

В 20-х годах нашего столетия в результате проведенных Эдвином П. Хабблом исследований переменных звезд в Туманности Андромеды и других спиральных туманностях было установлено, что эти системы

весьма удалены от нашей Галактики. Только тогда поняли истинную природу новых звезд, видимых в таких системах. Как только было установлено, что расстояние до Туманности Андромеды составляет не тысячи, а сотни тысяч световых лет, стала понятна и необычная яркость сверхновой 1885 г. Эта звезда была не в 10 000 раз, а более чем в 10 млрд. раз ярче обыкновенной звезды.



Итак, было выяснено, что спиральные туманности являются внешними галактиками, и была установлена величина вспыхивающих в них сверхновых. Однако систематическое изучение сверхновых в других галактиках началось только после 1934 г., когда Фриц Цвикки из Калифорнийского технологического института приступил к их поискам. С помощью камеры с диаметром линз $3\frac{1}{4}$ дюйма, установленной на крыше обсерватории в Каль-Теке, он повторно фотографировал большое скопление галактик в созвездии Девы и затем тщательно исследовал эти фотографии с целью отыскания новых звезд. В сентябре 1936 г. он расширил свои исследования, получив возможность работать на 18-дюймовом телескопе Шмидта, который только что был установлен на горе Паломар. В течение последующих трех лет Цвикки обнаружил в других галактиках 12 сверхновых, в то время как за предшествующую половину столетия случайно была обнаружена 21 сверхновая. Для каждой сверхновой Цвикки вместе с Вальтером Бааде и Рудольфом Минковским регистрировали изменение яркости звезды за некоторый отрезок времени и производили спектральный анализ ее света.

Работы Цвикки по поиску сверхновых в удаленных галактиках были весьма значительны, как по мотивировке, так и по плодотворности результатов. Еще в 1933 г. до начала своих исследований Цвикки предсказал, что взрывы сверхновых — это коллапсирующие звезды, превращающиеся в нейтронные звезды. Это предположение было высказано всего через два года после открытия нейтрона. Более того, Цвикки настаивал, что при коллапсе звезд их состав меняется и что они испускают космические лучи. Последующие 44 года показали, что интуитивно Цвикки стоял на совершенно правильных позициях, хотя даже и сегодня в этих вопросах нет полной ясности.

Работая на 18-дюймовом телескопе Шмидта на Паломаре, Цвикки в 1937 г. обнаружил сверхновую восьмой величины в близкой нерегулярной галактике IC 4128. Минковский немедленно провел ряд спектроскопических наблюдений этой сверхновой и получил данные, оставшиеся до 1972 г. основными в области спектроскопии сверхновых. В 1972 г. в Каль-Теке Чарльз Т. Коуэл обнаружил еще одну сверхновую в близкой нерегулярной галактике NGC 5253. Будучи пятой сверхновой, открытой в 1972 г., она была обозначена как SN 1972 e. Большая часть информации о сверхновых, полученной после работ Минковского, основана на наблюдениях этой яркой сверхновой с помощью современной аппаратуры.

Методика поисков сверхновых в наши дни не отличается существенным образом от методики Цвикки. На небе обычно выбирают ряд областей в соответствии с количеством галактик, расположенных достаточно близко к нашей Галактике, чтобы можно было детектировать вспыхивающие в них сверхновые. Ночь за ночью из месяца в месяц эти области фотографируют. Фотопластинки совмещают или кропотливо рассматривают попарно через бинокулярный микроскоп с поочередным заграждением объектов (блинк-микроскоп), что позволяет обнаружить появление на пластинках новой звезды. Если появляется «подозрительная» звезда, что происходит обычно

раз в несколько месяцев, фотографирование производится повторно, чтобы убедиться, что на пластинке не частица пыли или дефект эмульсии, а действительно звездный катаклизм.

После того как астроном убеждается, что обнаружен действительно новый объект, он измеряет его положение, производит оценку яркости

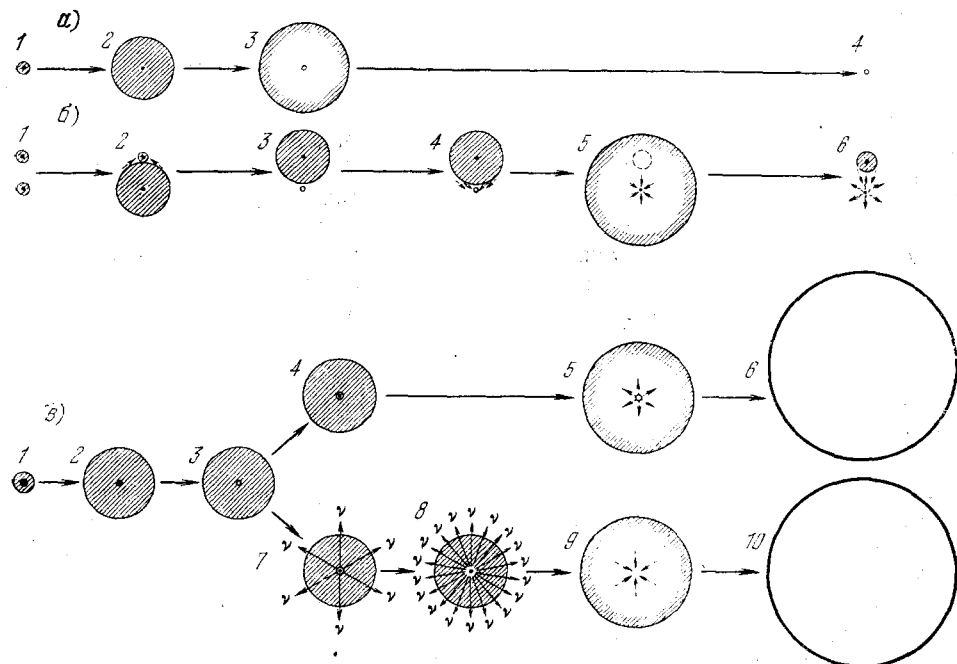


Рис. 2. Эволюция сверхновой различна для звезд разной массы

В звезде с массой, лишь в несколько раз превышающей массу Солнца (а), в продолжение нескольких миллиардов лет в сердцевине (маленькие темные кружки) происходит стабильное горение водорода с образованием гелия (1). После истощения водорода сердцевина сжимается, наружные слои расширяются, и звезда превращается в красный гигант (2). В конце концов, наружные слои красного гиганта отделяются, образуя планетарную туманность (3), аналогичную Кольцевой туманности в созвездии Лира; в центре остается устойчивый белый карлик (4). Полагают, что сверхновые I типа образуются из звезд, входящих в двойную систему (б). На ранних стадиях эволюции обеих, входящих в систему звезд происходит независимо (1 и 2). Однако когда звезда достигает стадии белого карлика (3), на нее резко начинается перенос вещества от звезды-компаньона (4). Как только масса белого карлика превысит критический предел, равный 1,44 солнечной массы, происходит мощный его коллапс с освобождением энергии, т. е. образуется сверхновая (5). После коллапса остается двойная система, состоящая из обыкновенной звезды — гиганта и источника рентгеновских лучей (6). В случае звезды с массой, значительно превышающей массу Солнца (в), эволюция сверхновой происходит другим путем. В сердцевине такой звезды также в течение нескольких сотен миллионов лет происходит горение водорода с образованием гелия (1). Когда водород близок к истощению, сердцевина звезды сжимается, наружные ее слои расширяются, и сама звезда превращается в красный гигант (2). В слое, окружающем сердцевину звезды, продолжается горение водорода (маленькие темные кружки), а сердцевина продолжает сжиматься, пока ее температура не повысится до температуры горения гелия (светлые кружки) с образованием углерода (3). Когда истощается гелий, в сердцевине звезды начинается горение углерода. В этот момент со звездой может произойти одно из катастрофических явлений. Возгорание углерода (черный цвет) само по себе (4) может привести к неустойчивости, которая вызовет взрыв сверхновой II типа (5), оставив лишь расширяющуюся газовую оболочку (6). Или же при «благополучном» возгорании углерода необычайно высокая температура сердцевин может привести к генерации нейтрино (ν), скорость образования которых будет расти (7 и 8); при этом нейтрино уносят энергию, что приводит к полному коллапсу сердцевин. В этом случае финальный всплеск нейтрино может унести с собой такой большой момент количества движения, что произойдет взрыв всей наружной оболочки звезды. После взрыва такого типа (9) остаются газообразные оболочки, в центре которых может оказаться пульсар (быстро вращающаяся нейтронная звезда) или черная дыра (10).

и телеграфирует (или сообщает по телефону) в Центральное бюро астрономических телеграмм в Кембридж (Массачусетс). Из Кембриджа закодированные телеграммы с полученной информацией рассылаются по всем обсерваториям мира. Интересующиеся этим вопросом астрономы других обсерваторий после расшифровки телеграммы могут начать свои наблюдения сверхновой.

Такая система несовершенна. Время, необходимое для фотографирования, исследования фотопластины и повторных наблюдений в ближайшую ясную ночь, может длиться несколько дней. Телеграмма, посланная в другие обсерватории из Кембриджа, может прибыть в конце недели или ночью, так что ее прочтут с запозданием. Между тем яркость сверхновой растет после взрыва очень быстро. Таким образом, поскольку наша реакция на появление сверхновых несколько замедлена, наблюдали относительно мало сверхновых до периода наступления их максимальной яркости, в то время как этот ранний период их развития потенциально наиболее существен для понимания природы сверхновых.



Методика обзора галактик с целью нахождения сверхновых совершенствуется. Один из примеров — программа поисков, производимая Джустином Данлапом в обсерватории Северозападного университета вблизи Лас-Крусса. Согласно программе 24-дюймовый зеркальный телескоп быстро и автоматически движется, обзоревая последовательно ряд галактик. Экспозиция в несколько секунд с помощью телекамеры дает изображение каждой галактики на телеэкране в комнате наблюдателя. Наблюдатель проводит сравнение полученного изображения с эталонным с целью обнаружения новой звезды и, если таковой не находит, переводит телескоп на следующую галактику.

С помощью такой программы Данлапа за каждую ночь наблюдений можно обследовать сотни галактик, причем результаты известны сразу. Выбранные галактики расположены достаточно близко, и любую появившуюся в них сверхновую легко детектировать до достижения ею полной яркости. Эффективность системы была продемонстрирована в январе 1975 г., когда Данлап обнаружил сверхновую в галактике NGC 2207 за шесть дней до достижения звездой максимальной яркости. За этот период времени сверхновую тщательно исследовали Хальтон К. Арп на Паломарской обсерватории и автор в Национальной обсерватории Китт-Пик в Аризоне. Ясно, что будущее при изучении сверхновых принадлежит полуавтоматическим или даже полностью автоматическим детектирующим системам.

В прошлом после обнаружения сверхновой и сообщения об этом факте всему миру перед работающим в этой области астрономом стояла нелегкая проблема выбора: должен ли он заняться фотометрией, т. е. производить количественные измерения яркости объекта через ряд стандартных фильтров, или производить спектральный анализ, т. е. измерять относительную интенсивность звездного света на разных длинах волн. Вообще говоря, точные фотометрические данные можно получить легко и быстро; для спектральных измерений требуется больше времени, но они приносят более богатую информацию. Практически этот выбор зачастую определяется аппаратурой, связанной с телескопом в тот момент, когда известие об открытии сверхновой достигает обсерватории.

За последние годы несколько сверхновых наблюдали на 200-дюймовом телескопе Паломарской обсерватории с помощью нового прибора, сочетающего прецизионную фотометрию со спектроскопией. Этот прибор, сконструированный Дж. Беверли Оком в Каль-Теке, является многоканальным спектрофотометром. Спектрофотометр имеет 32 фотоумножителя, позволяющих быстро измерять яркость сверхновой в каждом из 100 или более узких спектральных интервалов. Ширина интервалов спектральных полос лежит в пределах от 20 до 360 Å; прибор позволяет исследовать всю область длин волн от 3 100 Å в ультрафиолете до 11 000 Å в близкой инфракрасной области. С помощью этого инструмента Арп и Ок вместе

с Леонардом Сирлем и Майклом Пенстоном, Джессом Л. Гринстейном и Джеймсом Э. Ганном получили данные, лежащие в основе наших знаний о сверхновых.

□

После проведенных в 1940 г. исследований Минковского было известно, что сверхновые на основе их спектров можно разделить на два класса; эти два класса называют сверхновыми I и II типа. Сверхновые I типа образуют довольно однородную группу звезд с относительно небольшими вариациями спектра между ними. Они являются единственным типом сверхновых, найденных в эллиптических галактиках, т. е. в галактиках, которые, как

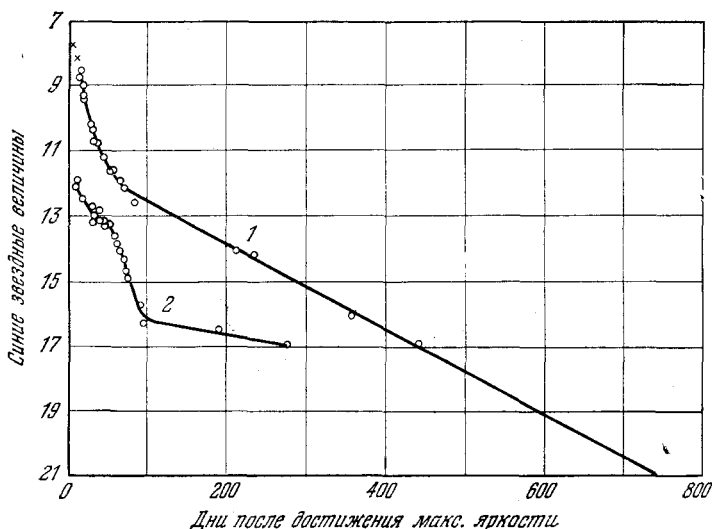


Рис. 3. Кривые блеска сверхновых I типа (кривая 1) и II типа (2) отличаются друг от друга.

Кривая блеска — зависимость яркости сверхновой от времени, построенная в логарифмической шкале звездных величин (изменение на одну звездную величину соответствует изменению яркости примерно в 2,5 раза) за период, равный сотням дней. Яркость сверхновой I типа SN 1972e сначала круто падает, а затем затухает почти точно по экспоненте. Эта кривая типична для сверхновых I типа. Кривая блеска сверхновой II типа SN 1970g, обнаруженной в галактике M 101, свидетельствует о более сложной зависимости. Кружки соответствуют данным наблюдений. Они получены фотометрически с помощью стандартного синего фильтра. На рисунке яркость сверхновой I типа слабее яркости сверхновой II типа, что бывает не всегда.

полагают, являются очень старыми, причем с малым количеством или вообще без звезд с массой, превышающей массу Солнца. Таким образом, сверхновые I типа, по всей вероятности, представляют собой взрыв звезд с массой, равной примерно одной массе Солнца. Если сверхновую I типа наблюдают фотометрически через стандартный синий *B*-фильтр, то можно видеть, что ее яркость за несколько дней возрастает до своего максимума, затем эта максимальная яркость сохраняется еще несколько дней, после чего звезда быстро теряет яркость примерно за 30 дней. После этого сверхновая I типа угасает почти по строго экспоненциальному закону. В области максимальной яркости спектр такой сверхновой характеризуется наличием сильной линии поглощения ионизованного кремния с длиной волны 6150 Å.

Сверхновые II типа образуют значительно менее однородную группу, чем сверхновые I типа. Их в основном находят в рукавах спиральных галактик, богатых массивными молодыми звездами. Предполагают поэтому,

что сверхновые II типа — взрыв звезды, масса которой значительно больше массы Солнца. Это предположение подтверждается, по-видимому, спектрометрическими измерениями силы эмиссионных линий водорода выбрасываемого вещества, согласно которым масса выброса равна по крайней мере одной солнечной массе. Если наблюдать типичную сверхновую II типа через стандартный *B*-фильтр, то также видно быстрое возрастание яркости до максимальной и после краткого пребывания в максимуме быстрый спад примерно за 25 дней. Однако последующее падение яркости идет не по экспоненте. Вместо этого яркость снижается до некоторого плато с продолжительностью от 50 до 100 дней. Затем яркость резко снижается. Вблизи максимума яркости сверхновой II типа спектр звезды характеризуется сильной эмиссионной линией водорода с длиной волны $6\,563\text{ Å}$.

Если сверхновые I и II типа возникают из совершенно различных звезд, почему же так схожи их кривые блеска на первых стадиях взрыва? И какие физические процессы идут в звезде в процессе взрыва? Почему звезда с такой маленькой массой, как масса Солнца, которая должна была бы превратиться в белый карлик, претерпевает столь катастрофический взрыв? Спектрофотометрические наблюдения нескольких сверхновых в других галактиках дали обширные сведения о температуре, скорости и составе продуктов взрыва (выброса) сверхновой, т. е. те данные, на основе которых стали понятнее свойства каждого типа сверхновых.



Начнем с рассмотрения сверхновых II типа, поскольку распределение энергии в их спектре проще, чем у сверхновых I типа. Хорошие данные были получены для сверхновой II типа SN 1970 g, взрыв которой наблюдали в галактике M 101 в конце 1970 г. Спектрофотометрические исследования этого объекта показали, что его спектр меняется в течение нескольких месяцев. На ранних стадиях взрыва общее спектральное распределение энергии звезды близко к распределению энергии для черного тела при температуре $12\,000\text{ °C}$. Далее, энергия, излучаемая единицей поверхности излучателя, ведущего себя как черное тело, определяется только его температурой. Кроме того, можно измерить поток излучения от сверхновой в момент ее максимальной яркости. Таким образом, если из других измерений известно расстояние до сверхновой, то сопоставляя температуру и наблюдаемый поток излучения, получаем оценку радиуса звезды в период ее максимальной яркости. Для SN 1970 g этот радиус равен $3 \cdot 10^{14}\text{ см}$, что равно радиусу орбиты планеты Уран.

Как только стал известен радиус сверхновой, можно также определить ее абсолютную светимость. Для SN 1970 g эта светимость составляет 10^{42} эрг/сек , что в миллиард раз больше светимости Солнца. И, что еще интереснее, на основе спектрофотометрических данных и стандартных широкополосных фотометрических наблюдений можно построить график зависимости радиуса сверхновой от времени. В течение примерно 30 дней после исходного взрыва радиус поверхности, которая излучает видимый свет, увеличивается с примерно постоянной скоростью $5\,000\text{ км/сек}$. К концу этого периода фотосфера звезды (видимая поверхность) достигает радиуса около $2 \cdot 10^{15}\text{ см}$, что превышает радиус Солнечной системы. При расширении фотосферы ее температура снижается примерно до $6\,000\text{ °K}$. После достижения своей максимальной протяженности фотосфера, которая до этого момента была непрозрачной, становится тонкой и поэтому прозрачной. Таким образом, кажущийся радиус звезды начинает уменьшаться, что приводит к быстрому спаду кривой блеска сверхновой II типа.

Дэвид Эрнетт и Сидней Фалк из Техасского университета и независимо Роджер Шевалье из Китт-Пика предложили правдоподобные теоретические модели сверхновых II типа. Эти модели хорошо отражают наблюдаемые эффекты, но в них полностью игнорируется причина взрыва. Вместо этого принимается, что независимо от деталей процессов внутри звезды взрыв очевидным образом нагревает наружные слои звезды, что вызывает их ускорение. Эрнетт и Фалк, а также Шевалье рассматривали

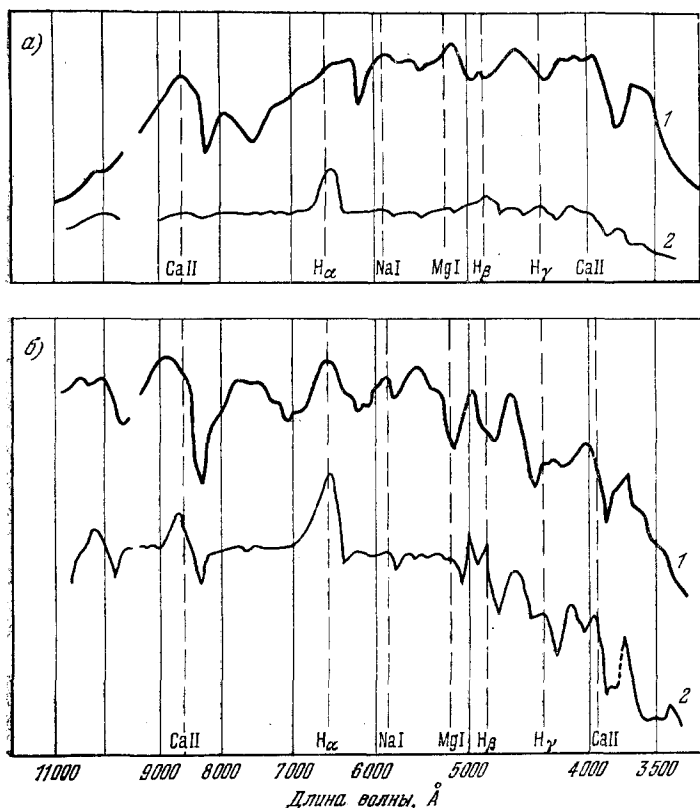


Рис. 4. Спектры сверхновых I типа (1) и II типа (2) также различны.

Кривые представляют собой график зависимости интенсивности излучения от длины волны. Пики на кривых — области спектра, в которых происходит испускание энергии; промежуточные области соответствуют поглощению энергии. На кривых а) приведены спектры сверхновых SN 1972e (1) и SN 1970g (2), полученные в период сразу после достижения звездами максимальной яркости. Две кривые б) — спектры тех же сверхновых, полученные спустя месяц. Спектр каждой сверхновой изменяется со временем. Были идентифицированы следующие спектральные линии: CaII — однократно ионизованный кальций, H α , H β и H γ — излучения, отвечающие переходам электронов в атоме водорода; NaI — неионизованный натрий; MgI — неионизованный магний.

лишь влияние возникающей при взрыве ударной волны, которая бежит от центра звезды через ее наружные слои. В качестве модели звезды они выбрали очень протяженные красные сверхгиганты — звезды с массой в несколько раз превышающей массу Солнца и с объемом в миллионы раз больше. Такие протяженные красные сверхгиганты в самом конце своего жизненного цикла являются генераторами термоядерной энергии.

□

Модель сверхновых обладает двумя очень существенными характеристиками, согласующимися с данными наблюдений. Во-первых, согласно вычислениям протяженные красные сверхгиганты уже столь велики, что

при расширении до размеров порядка Солнечной системы они существенно не охлаждаются. Во-вторых, внутри протяженного красного сверхгиганта расположена большая область с примерно постоянной плотностью; поэтому происходящий в центре звезды взрыв эффективно передает энергию на поверхность. Следовательно, согласно модели освобождающаяся в центре звезды энергия может появиться в виде тепла и движений, фактически наблюдаемых на поверхности сверхновой. Кроме того, модель предсказывает, что поверхность сверхновой должна иметь температуру порядка $10\,000^\circ\text{K}$ и вскоре после достижения максимальной яркости должна расширяться со скоростью около $5\,000$ км/сек. Обнадеживает тот факт, что вычисления, основанные на моделях звезд, могущих взорваться, так хорошо согласуются с наблюдениями звезд, фактически уже взорвавшихся. И наоборот, тот факт, что согласие базируется на рассуждениях, связанных со структурой внутренних областей звезды, а не на вычислениях деталей взрыва, означает, что спектрофотометрические данные, полученные в течение первого месяца после взрыва, могут дать мало непосредственной информации об источнике энергии, освобождающейся в сердцевине звезды.

Как сравнить данные наблюдений с теорией сверхновых II и I типа? Хорошо изученная представительница сверхновых I типа — SN 1972e была обнаружена Коуэлом в галактике NGC 5253. Спектрофотометрические наблюдения были получены как с помощью многоканального спектрофотометра на 200-дюймовом телескопе, так и с помощью более простого прибора на 60-дюймовом зеркальном телескопе на Паломаре. Оба сканирования показали, что общее распределение энергии в спектре сверхновой I типа не отличается существенным образом от распределения энергии для сверхновой II типа. Однако, в отличие от непрерывного спектра для сверхновой II типа, непрерывный спектр этой сверхновой I типа даже в первые дни после взрыва не был плавным. Он был существенно искажен как в излучении, так и в поглощении. Тем не менее общее распределение энергии в спектре примерно соответствовало распределению энергии для черного тела с температурой $10\,000^\circ\text{K}$. Точно так же как и в случае сверхновой II типа, температура сверхновой I типа при расширении фотосферы быстро падает. Охлаждение снижает энергию в ультрафиолетовой области спектра быстрее, чем в его инфракрасной области, до тех пор пока фотосфера не достигает температуры примерно $6\,000^\circ\text{K}$. После этого звезда продолжает «гаснуть», сохраняя такую же температуру при дальнейшем уменьшении видимой поверхности. С этого момента яркость сверхновой начинает падать экспоненциально.

□

Для обоих типов сверхновых изучение распределения интенсивности в непрерывном спектре звезды существенно помогает правильно идентифицировать линии в спектре. Температура, полученная путем сравнения непрерывного спектра со спектром черного тела с определенной температурой, дает ключ к определению типа спектральных линий, могущих присутствовать в спектре. В спектре сверхновых II типа видны сильные линии водорода. Кроме этого, в нем присутствуют сильные линии излучения и поглощения ионизованного кальция и неионизованных натрия и магния, а также ряд линий ионизованного железа. Сила линий свидетельствует о том, что относительное содержание этих элементов в сверхновой не отличается существенным образом от их содержания на Солнце. Если в сверхновых в процессе их взрыва и происходит синтез тяжелых элементов из легких, ни один из этих элементов не виден в быстро расширяющихся продуктах взрыва.

Спектр сверхновых I типа анализировать сложнее. Фактически нет полного согласия в вопросе о составе наблюдаемого спектра сверхновой I типа: состоит ли он в основном из линий излучения, линий поглощения или из смеси этих обоих типов линий? Представляется, однако, вероятным, что широкие эмиссионные полосы, характеризующие спектр в области максимальной яркости звезды, соответствует большинству тех же атомов и ионов, видимых как в спектре поглощения, так и в спектре излучения сверхновых II типа. Возможно, что линии искажают непрерывную часть

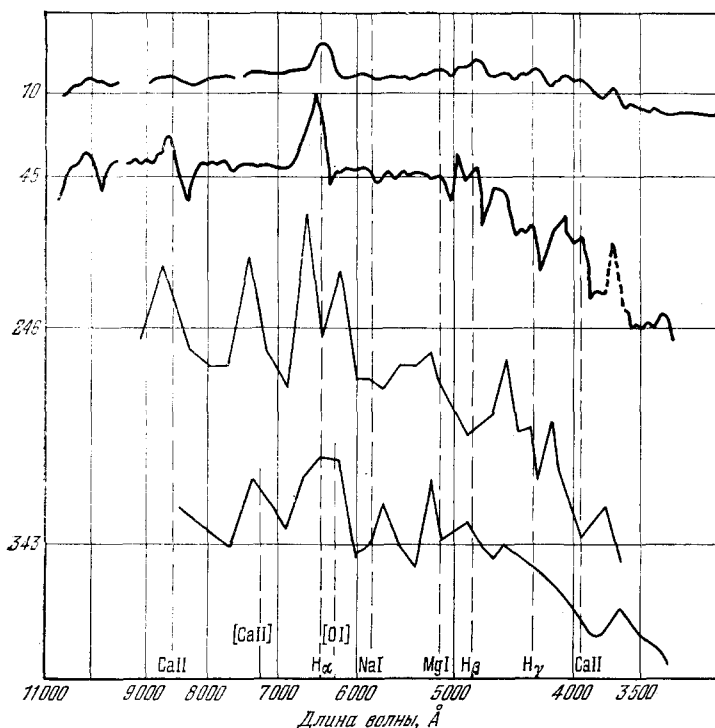


Рис. 5. Эволюция спектра сверхновой II типа SN 1970g в галактике M41.

Цифры слева обозначают количество дней после достижения звездой максимальной яркости. Пики, обозначенные [OI], показывают изменение линии испускания неионизованного кислорода спустя несколько месяцев после взрыва.

спектра за счет увеличения относительного содержания этих элементов по сравнению с водородом. Это могло произойти в процессе эволюции звезды до взрыва сверхновой или во время самого взрыва.

Спектр сверхновых I типа качественно меняется как раз в той точке кривой блеска, где начинается экспоненциальное падение яркости. До этого момента в спектре доминирует непрерывная его часть, а отдельные линии излучения и поглощения накладываются на этот непрерывный фон. Однако как только начинается экспоненциальный спад яркости, непрерывное излучение становится относительно несущественным, и в спектре доминирует группа из четырех сильных эмиссионных линий.

Для объяснения причин появления этих линий было выдвинуто две гипотезы. Филипп Моррисон из Массачусетского технологического института и Лео Сатори из Университета в Небраске предположили, что эмиссионные линии возникают в результате того, что на какой-то стадии взрыва сверхновой звезда испускает мощные импульсы ультрафиолетового излучения. Наблюдаемый с Земли видимый свет должны

тогда испускать окружающие звезду атомы гелия, флуоресцирующие под действием ультрафиолетового излучения. Из этого предположения следует наличие сильной эмиссионной линии гелия на длине волны $4\,686\text{ \AA}$, интенсивность которой должна в течение длительного времени снижаться по экспоненциальному закону. Испускает ли действительно сверхновая I типа такой импульс ультрафиолета, пока не известно; неизвестно также, обладает ли окружающий звезду газ теми свойствами, которые могли бы обеспечить флуоресценцию.

Второе объяснение наличия эмиссионных линий в спектре сверхновых I типа связано с попыткой идентификации природы четырех сильных линий. Ок и автор предположили, что эти линии представляют собой наложение ряда линий ионизованного железа. Сумма 216 линий железа, которые, по всей вероятности, должны испускать взорвавшееся вещество, сильно напоминает три из четырех сильных эмиссионных линий, наблюдаемых в спектре сверхновых I типа. Четвертая линия с длиной волны $4\,600\text{ \AA}$ является, однако, самой сильной. Шарлотта Гордон из Исследовательского центра высказала предположение, что эта линия может быть обусловлена дважды ионизованным железом. Если мы идентифицируем линии правильно, то количество железа в газообразной оболочке, выбрасываемой сверхновой I типа, в 20 раз больше массы железа на Солнце. А если сверхновая I типа — взрыв звезды с массой порядка одной солнечной массы, то наша интерпретация нуждается в механизме существенного обогащения продуктов взрыва железом.

□

Даже если наша идентификация линии ошибочна, наличие эмиссионных линий в спектре во время экспоненциального спада яркости сверхновой означает, что продукты взрыва продолжают получать энергию. Если бы такого поступления энергии не было, то испускаемое газом излучение на длине волны эмиссионных линий быстро охладило бы выбрасываемое вещество, и эмиссионные линии быстро бы угасли. Однако в случае SN 1972e эмиссионные линии сохраняются в спектре в течение по крайней мере двух лет. За это время скорость поступления энергии в выброшенное вещество должно уменьшаться по экспоненте, т. е. так же, как падает общая яркость сверхновой. Каковы же возможные источники этой энергии?

Одним из непрерывно действующих источников энергии может быть радиоактивность какого-либо изотопа или группы изотопов с периодом полураспада между 50 и 70 днями. В 50-х годах Бааде, Джеффри Бербидж, Э. Маргарет Бербидж, Фрэд Хойл, Роберт Ф. Кристи и Уильям А. Фоулер предположили, что таким изотопом является калифорний-254. Гипотеза радиоактивности с радиоактивным изотопом или изотопами, отличными от калифорния, обсуждалась неоднократно. Огромное количество тепла, давление и бомбардировка нейтронами в центре сверхновой вполне может приводить к образованию тяжелых радиоактивных элементов и создавать избыток железа, которое, возможно, имеется в оболочке сверхновой I типа.

Вторым источником энергии, могущим поддерживать свечение эмиссионных линий, является пульсар. Известно, например, что Крабовидная туманность в созвездии Тельца является остатком взрыва сверхновой, наблюдавшегося китайскими астрономами в 1054 г. нашей эры. Известно также, что в центре туманности расположен пульсар — быстро вращающаяся нейтронная звезда, испускающая огромное количество энергии в рентгеновской, оптической и радиообластях спектра. В результате

потери большого количества энергии нейтронная звезда замедляется, и по темпу снижения ее угловой скорости можно заключить, что излучаемая ею энергия соответствует энергии, испускаемой всей Крабовидной туманностью. Разумно предположить, что в течение первых нескольких лет после взрыва теряемая пульсаром энергия смогла бы обеспечить мощность, необходимую для объяснения наблюдаемых эмиссионных линий.

Пульсар в Крабовидной туманности остается самым молодым из всех обнаруженных до сих пор пульсаров. Однако вращающаяся нейтронная звезда в центре какой-либо другой сверхновой может в течение длительного промежутка времени экранироваться продуктами взрыва. Если эти окружающие пульсар продукты взрыва не разлетаются достаточно быстро, отсутствие быстрых пульсаций от остатков внегалактических сверхновых не может служить сильным аргументом против гипотезы об образовании пульсаров в результате таких взрывов.

До сих пор мы проводили сравнение наблюдений сверхновых в других галактиках с теоретическими моделями сверхновых, не касаясь причин такого катастрофического взрыва. Ряд теоретиков попытались создать модели звезд, описывающие не только взрыв, но также и предшествующую историю эволюции звезды.

Вообще говоря, судьба звезды зависит от ее массы. Когда происходит рождение звезды, образующий ее газ сжимается и нагревается в результате превращения гравитационной энергии в тепловую. В конце концов температура в центре газовой протозвезды становится достаточно высокой для вступления ядер водорода в термоядерные реакции. С этого момента звезда вступает в долгий стабильный период горения водорода. Однако по истечении времени водородное горючее в центре звезды истощается. Под влиянием собственной тяжести сердцевина звезды продолжает сжиматься, в то время как в окружающем сердцевину слое продолжает гореть водород. Между тем наружные слои звезды расширяются, и она превращается в красный гигант.

□

Такова почти полная картина эволюции звезд, масса которых в несколько раз превышает массу Солнца. Когда в окружающем исходную сердцевину слое истощается водород, термоядерные реакции внутри звезды прекращаются. Звезда не обладает достаточной массой для дальнейшего сжатия и нагрева. Гравитационные силы полностью уравниваются электростатическими силами, действующими между электронами в плотной холодной сердцевине, и звезда остается устойчивой. Наружные слои красного гиганта достаточно спокойно отделяются от звезды, образуя планетарную туманность, такую, как Кольцевая туманность в Лире, а звезда в течение миллиардов лет продолжает свое существование в виде слабоизлучающего белого карлика.

Значительно более массивные звезды способны к дальнейшему сжатию. Их сердцевина нагревается до тех пор, пока не возобновятся термоядерные реакции, на этот раз с синтезом углерода из ядер гелия. Когда же истощается гелий, продолжается дальнейшее сжатие сердцевины, и начинается горение углерода с образованием еще более тяжелых элементов.

Согласно этим моделям существуют две альтернативные причины, могущие привести к взрыву звезды с образованием сверхновых II типа. В первом случае возгорание углерода может создать в сердцевине звезды неустойчивость, приводящую к взрыву. Это может произойти в силу того, что скорость генерации энергии в термоядерных реакциях крайне чувствительна к температуре. При некоторых условиях возгорание углерода

может повысить температуру в сердцевине и, таким образом, увеличить скорость сгорания углерода. Увеличившаяся скорость горения вызывает дальнейшее повышение температуры, что в свою очередь вновь ускоряет горение углерода. При отсутствии каких-либо других механизмов процесс протекает очень быстро, приводя к полному сгоранию углерода внутри звезды. Катастрофический процесс такого типа в центре красного гиганта может привести к образованию именно тех сверхновых, которые мы наблюдаем. Однако с этой моделью связано одно затруднение: модель предсказывает разрушение всей звезды без сохранения каких-либо звездных остатков.

Во втором случае звезда может пройти стадию возгорания углерода без катастрофы. Сердцевина такой звезды будет необычайно горячей, и в ней будет возникать множество нейтрино. Поскольку нейтрино не имеют ни массы, ни электрического заряда и лишь слабо взаимодействуют с остальным веществом, они могут полностью выйти из звезды, унося с собой большое количество энергии. Теряя таким образом энергию, сердцевина звезды сжимается и нагревается еще более. С повышением температуры увеличивается скорость образования нейтрино. Этот процесс уноса энергии с увеличением температуры будет продолжаться до тех пор, пока сердцевина не вступит в стадию стремительного и полного коллапса.

Вблизи конца фазы коллапса может произойти последний всплеск нейтрино высоких энергий. Когда эти нейтрино проходят через наружную оболочку звезды, они могут передать ей от сердцевины достаточно большой импульс, чтобы произошел взрыв оболочки — образование сверхновой. Единственная сила, могущая остановить полный коллапс сердцевины — «сильное» взаимодействие между атомными ядрами *). Если эта сила может затормозить коллапс, сердцевина превратится в нейтронную звезду — необычайно плотный, но стабильный объект.

Эта альтернатива должна приводить к естественному образованию нейтронной звезды в результате смерти очень массивной звезды. Однако согласно лучшим из проведенных до сих пор вычислений в коллапсирующей

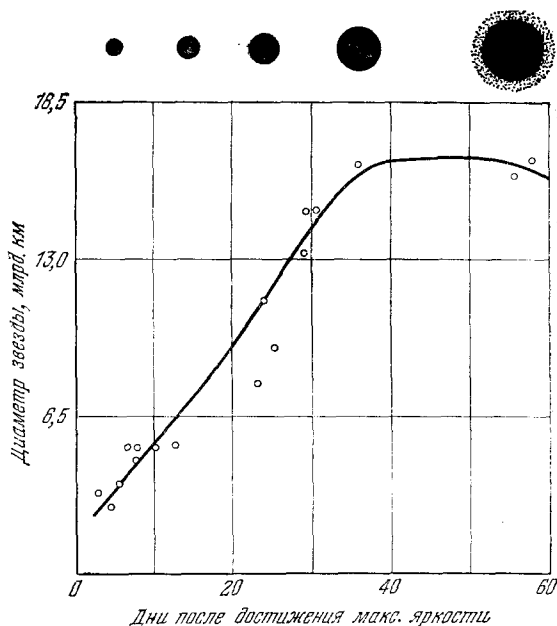


Рис. 6. Изменение радиуса сверхновой (измеренный в миллиардах километров).

Спустя два месяца после взрыва звезды (SN 1969e в галактике NGC 1058) ее радиус был много больше размера всей Солнечной системы. В это время наружные слои звезды становятся прозрачными, и видимая поверхность звезды начинает уменьшаться. С помощью таких измерений в сочетании с другими данными можно определять расстояние от нашей Галактики до сверхновой.

*) Здесь (а в известном отношении и ранее, когда речь шла о белых карликах) автор, вероятно, с целью сделать изложение более наглядным, говорит о силовом взаимодействии как о причине, останавливающей коллапс в белых карликах и нейтронных звездах. Фактически же определяющую роль играет «нулевое давление», присутствующее в вырожденном ферми-газе электронов и нейтронов соответственно. (Прим. перев.)

щей сердцевине звезды образования нейтронной звезды не происходит. Вместо этого продолжается коллапс вплоть до образования черной дыры —

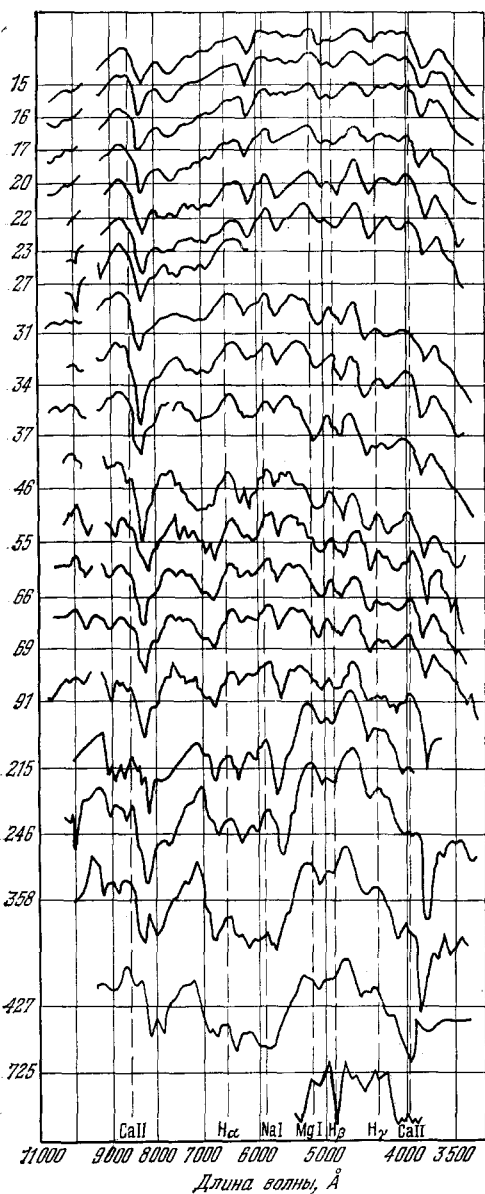


Рис. 7. Эволюция сверхновой I типа SN 1972e примерно за два года.

В поздний период развития в спектре доминируют четыре неидентифицированные сильные линии излучения в интервале длин волн между 4 000 и 6 000 Å. Наличие линий излучения означает, что даже много времени спустя после взрыва в окружающий сверхновую газ продолжает поступать энергия. Источником этой энергии может быть радиоактивность или пульсар.

сверхновая взрывается столь бурно, привело к гипотезе, что сверхновые могут обогащать межзвездный газ тяжелыми элементами. Меж-

одного из этих причудливых объектов, которые не испускают даже света. Однако природа не обращает внимания на расчеты теоретиков. Очевидно, что в центре Крабовидной туманности расположена нейтронная звезда, и ясно также, что эта туманность — остаток взрыва сверхновой, так что при взрыве, по крайней мере некоторых сверхновых, образуются нейтронные звезды.

Последовательность событий, приводящая к образованию сверхновой I типа, более загадочна, чем в случае сверхновой II типа, поскольку предполагают, что сверхновая I типа возникает в результате взрыва звезды с массой, равной примерно массе Солнца. Поскольку такая звезда может спокойно превратиться в белый карлик, должно произойти что-либо необычайное, чтобы она взорвалась с образованием сверхновой. Выдвигают гипотезу, что звезда, образующая сверхновую I типа, является компонентой двойной системы. При определенных условиях, когда эта звезда превращается в белого карлика, к нему может поступать от звезды-компаньона большое количество вещества. Новое вещество может увеличить массу белого карлика с переходом критического предела, равного 1,44 солнечных масс, после чего должен начаться коллапс. Процесс образования сверхновой неясен, но вполне очевидно, что коллапсирующий белый карлик способен выделить количество энергии, наблюдаемой в случае сверхновых I типа.

Образование тяжелых элементов в сердцевине звезды перед ее взрывом и тот факт, что

звездный газ в основном состоит из водорода и гелия, но он содержит и некоторое количество элементов тяжелее водорода и гелия. Более того, высокая температура и сила взрыва сверхновой может привести к образованию огромного потока нейтронов, превращающего железо в более тяжелые элементы. Если в межзвездном газе тяжелые элементы возникают именно таким образом, то возможно, что сверхновые ответственны за наличие тяжелых элементов на Солнце, Земле и в живущих на Земле организмах.

В пользу этой гипотезы свидетельствуют непосредственные данные, полученные при исследовании метеоритов. Считают, что некоторые метеориты состоят из вещества, оставшегося от периода образования Солнца и планет из облака пыли и газа. Тщательное исследование состава таких метеоритов показывают, что они содержат некоторые продукты распада относительно короткоживущих радиоактивных ядер. Например, период полураспада йода-129 составляет 17 миллионов лет; продукт его распада, инертный газ ксенон, обнаружен внутри метеоритов. На основании наблюдений можно полагать, что при образовании метеорита в нем присутствовал радиоактивный йод. Отсюда в свою очередь следует, что в вещество, из которого образовалась Солнечная система, поступал радиоактивный йод. Возможно, где-то в окрестностях зарождающейся Солнечной системы сверхновая создавала радиоактивный йод, выбрасывала его в межзвездный газ и, возможно, даже дала толчок самому процессу образования Солнечной системы. Независимо от того, правильна или ошибочна вся эта цепь рассуждений, содержание некоторых изотопов в метеоритах является существенным указанием на то, что тяжелые элементы образовались в эпоху рождения Солнечной системы.

Дальнейшие доказательства в пользу синтеза тяжелых элементов при взрыве сверхновой связаны с данными наблюдений двух объектов: Крабовидной туманности и оболочки сверхновой в Кассиопее, известной как Кассиопея А. В Крабовидной туманности относительное содержание гелия по сравнению с водородом, по-видимому, больше, чем в других областях галактики. В Кассиопее А содержание кислорода, серы и аргона по отношению к водороду необычно высоко. Быть может, ядерные процессы в сверхновых, породивших каждую из этих оболочек, ответственны за необычную распространенность в них более тяжелых элементов.

Сверхновые могут также служить источниками космических лучей. Приходящие из-за пределов Солнечной системы частицы высокой энергии постоянно бомбардируют Землю, причем энергия некоторых частиц превышает энергии частиц, полученных на самых мощных ускорителях. Если энергию частиц космических лучей умножить на их концентрацию, то получаемая при этом плотность энергии сравнима с плотностью энергии света от всех звезд в галактике. Каков же может быть источник этих частиц высокой энергии?

□

Одним из возможных ответов на этот вопрос, начиная с предположения, высказанного в 1933 г. Цвикки, были сверхновые. Стирлинг А. Колгейт из Института горного дела и технологии в Нью-Мексико и его сотрудники отметили, что образовавшаяся при взрыве сверхновой мощная ударная волна проходит последовательно через наружные слои звезды, плотность вещества которых постепенно падает. В этой связи они предположили, что когда ударная волна достигает слоев со сравнительно низкой плотностью, она передает свою огромную энергию столь малой массе, что отдельные ядра ускоряются до скоростей, приближающихся к скорости света.

Другой механизм образования космических лучей в сверхновых предложили Джон Скотт и Шевалье на базе проведенных ими исследований оболочки сверхновой Кассиопея А — самого яркого на небе радиообъекта. Радиоизлучение объекта приходит от частиц, движущихся в магнитном поле со скоростями, близкими к скорости света. Оптические наблюдения Кассиопеи А свидетельствуют о наличии в оболочке сгустков и «узлов» газа, движущихся со скоростью в несколько тысяч километров в секунду, т. е. с характерной скоростью выброса оболочки сверхновой. Скотт и Шевалье предположили, что движение этих сгустков возмущает и перемешивает магнитные поля в оболочках сверхновой, и это в свою очередь приводит к ускорению частиц до энергий, характерных для космических лучей *).

Наблюдение сверхновых дает также уникальную возможность определить шкалу расстояний во Вселенной. Спектрофотометрические измерения позволяют определить температуру поверхности сверхновой и энергию, достигающую Земли в результате взрыва звезды. Количество энергии, излучаемое поверхностью звезды при данной температуре, зависит только от площади поверхности, которая пропорциональна квадрату радиуса. А достигающая Земли энергия зависит только от полного количества энергии, излучаемой звездой, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между звездой и Землей. Следовательно, температура звезды и получаемая на Земле энергия определяют отношение радиуса звезды к расстоянию до нее. Измерения доплеровского сдвига показывают, с какой скоростью звезда расширяется. Таким образом, если данные, полученные при наблюдении сверхновой, разделены промежутком времени в несколько недель, то известно, насколько увеличился за это время радиус звезды. Зная это изменение и отношение его к расстоянию до Земли, легко вычислить расстояние до звезды.

При детальном применении этой методики, впервые предложенной Сирлем, возникает много неопределенностей. Но несмотря на это, она является оригинальной и дает возможность определить внегалактические расстояния путем, полностью независимым от стандартного, основанного на определении расстояний в нашей Галактике. Джон Кван и автор показали, что для двух сверхновых — для SN 1969 l в галактике NGC 1058 и SN 1970 g в галактике M 101 — полученные указанным методом расстояния достаточно хорошо согласуются с данными, найденными стандартным образом Алланом Сэндейджем и Густавом А. Тамманом. Несмотря на необходимость большого числа тестов и лучших моделей сверхновых, обсуждаемый метод вполне может оказаться ценным способом определения внегалактических расстояний.

□

Общее число внегалактических сверхновых позволяет оценить скорость их появления в нашей Галактике. Можно полагать, что взрыв сверхновой происходит в галактике примерно каждые 50 лет. Тихо Браге наблюдал сверхновую в 1572 г., а Иоганн Кеплер наблюдал другую сверхновую в 1604 г. Детальное изучение движений сгустков в Кассиопее А, проведенное Сиднеем Ван-ден-Бергом в обсерватории Торонтского университета, указывают на то, что Взрыв в Кассиопее произошел в 1667 г., хотя он и не был замечен Исааком Ньютоном или кем-либо из других астрономов, живших в то время. Вероятно, сверхновая, остатки которой видны

) По сути дела, речь здесь идет о так называемом механизме ускорения Ферми, возможная роль которого в оболочках сверхновых была отмечена уже давно (см., например, 4). (Прим. перев.).

как Кассиопея А, была в оптической части спектра слабее большинства остальных и закрыта от нас межзвездной пылью. В течение последующих 300 лет не было доказательств взрыва какой-либо сверхновой в нашей Галактике.

Какова будет следующая сверхновая? Будет ли она похожа на сверхновую в Крабовидной туманности, которая была видна даже днем и, согласно описаниям китайских астрономов, была «величиной с цыновку». А может быть, она будет подобна сверхновой типа Кассиопеи А и останется незамеченной? Попытка количественной оценки была предпринята Ван-ден-Бергом, который вычислил число звезд в Галактике, находящихся на различных расстояниях от Земли, и ожидаемое поглощение их света межзвездной пылью. Согласно его результатам следующая сверхновая

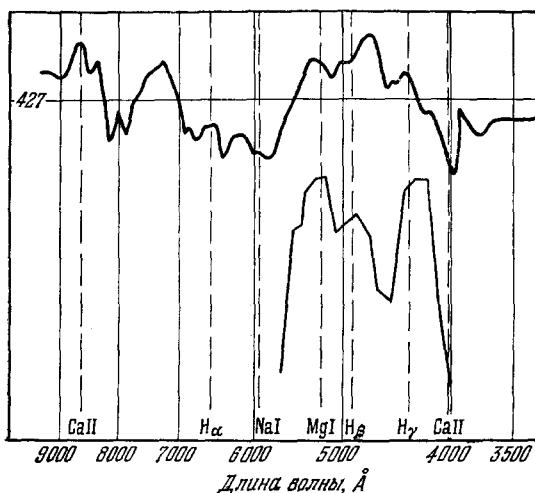


Рис. 8. Три из четырех линий испускания в спектре SN 1972e (см. рис. 7) могут быть обусловлены излучением ионизованных атомов железа (согласно идентификации автора и Дж. Беверли Ока).

Верхняя кривая соответствует предпоследней спектральной кривой для SN 1972e (см. рис. 7). Нижняя кривая — вычисленный для железа спектр, состоящий из смеси 216 эмиссионных линий. Однако природа четвертой и самой сильной линии излучения все еще остается непонятой.

может оказаться очень яркой, но столь же вероятно, что она будет видна как не вызывающая особых подозрений новая звезда где-то в середине пыльного Млечного Пути, где ее и вообще можно не заметить. Быть может, следующий взрыв сверхновой в нашей Галактике будет детектирован не по вспышке света, а по огромному всплеску выброшенных ею нейтрино, по γ -лучам, излучаемым синтезирующимися при взрыве тяжелыми радиоактивными элементами, или по импульсу гравитационных волн, генерируемых при коллапсе сердцевины звезды.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. P. Kirshner, J. Beverly Oke, M. V. Panston, L. Searle, *Astron. J.* 185 (1, pt. 1) 303 (1973).
2. J. Beverly Oke, L. Searle, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 12, 315 (1974)
- 3*. И. С. Шкловский, *Сверхновые звезды*, М., «Наука», (1976)*).
- 4*. В. Л. Гинабург, С. И. Сыроватский, *Происхождение космических лучей*, М., Из-во АН СССР, 1963.

*) Литература, помеченная звездочкой *, добавлена при переводе.