

# Две ближайшие сверхновые

Е.М.Чуразов

**В**зрывы сверхновых (Supernova, SN) — впечатляющие события, знаменующие последний этап в жизни звезд. Физика этих взрывов необычайно богата и интересна сама по себе. Кроме того, сверхновые служат важнейшими поставщиками всех известных нам элементов тяжелее гелия во Вселенной, включая радиоактивные изотопы. Фундаментальную роль играют они и в космологии. В частности, первые убедительные экспериментальные свидетельства ускоряющегося расширения Вселенной были получены именно из наблюдений сверхновых. Хотя в наше время каждый год открываются сотни далеких SN, у нас в ближайшей окрестности это редкое событие. Например, в нашей Галактике последнюю сверхновую видели в 1604 г. Поэтому каждая близкая вспышка становится для астрофизиков настоящим событием, позволяющим в деталях проверить теоретические модели. Отделу астрофизики высоких энергий ИКИ РАН необычайно повезло — удалось исследовать две ближайшие SN в эпоху, когда космические обсерватории позволяли напрямую детектировать рентгеновское и гамма-излучение этих объектов.

## Долгая история

Китайские хроники 185 г. (почти двухтысячелетней давности) описывают появление звезды-гостя, оставшейся видимой



*Евгений Михайлович Чуразов, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Область научных интересов — теоретическая астрофизика, рентгеновская астрономия.*

в течение нескольких месяцев. Это, вероятно, была первая зарегистрированная сверхновая в нашей Галактике, про которую мы знаем. Последующие почти полторы тысячи лет (вплоть до 1604 г.) дали еще семь похожих вспышек, видимых невооруженным глазом. После 1604 г. надежных записей в летописях о ярких сверхновых нет. Не было таких событий в Млечном Пути и в современную эпоху больших наземных телескопов и орбитальных обсерваторий. Зато колоссальная чувствительность телескопов позволила открыть многочисленные подобные звезды-гости в других галактиках.

Сам термин «сверхновая» был придуман Вальтером Бааде и Фрицом Цвики в 30-х годах прошлого века. Такое броское название было связано с надежными измерениями расстояния до туманности Андромеды, в которой очередной «звезда-гость» была открыта еще в 1885 г. Стало ясно, что туманность — это другая галактика, далеко за пределами Млечного Пути. Бааде и Цвики осознали, какая колоссальная энергия должна выделиться, чтобы вспышка на таком расстоянии была видна с Земли. Этой энергии с запасом хватит, чтобы разорвать звезду, подобную Солнцу, что, конечно, означает, что звезда претерпевает изменения колоссального масштаба.

Вскоре Рудольф Минковский разработал и схему разделения сверхновых на основе их оптических спектров. Он выделил два главных класса: SN, в спектрах которых присутствуют линии водорода, отнес к классу II, а те, что их не имеют, — к классу I. Современная классификация, учитывающая более тонкие детали спектра и саму природу явления, более сложна, но нас сейчас интересуют только два по-прежнему главных типа сверхновых — II и Ia (подкласс сверхновых без линий водорода). Астрофизика предлагает убедительные физические модели таких звезд.

Заметим, что, хотя последняя вспышка SN в нашей Галактике была зафиксирована более 400 лет назад, прямые следствия этих со-

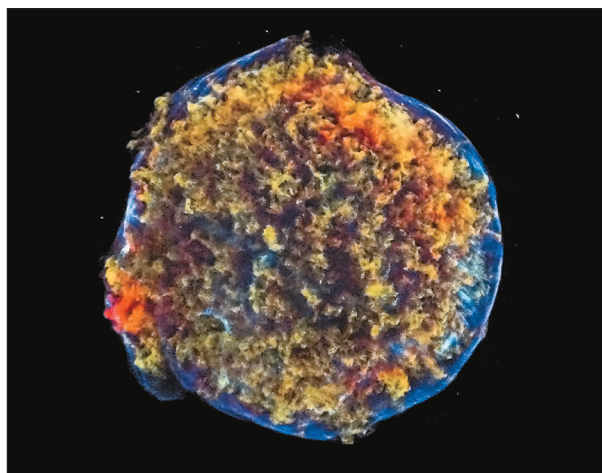
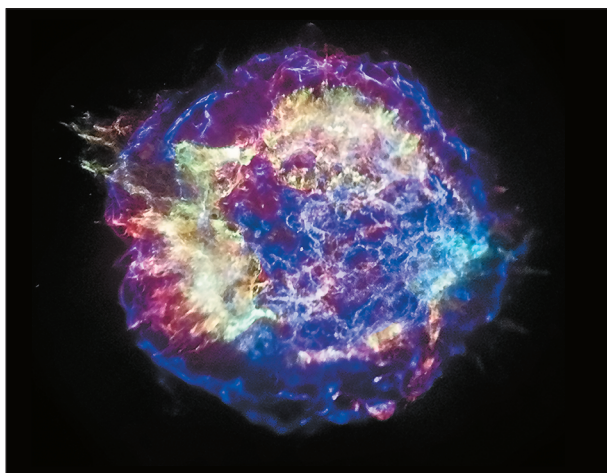


Рис.1. Рентгеновские изображения остатков двух вспышек сверхновых в нашей Галактике (обе в созвездии Кассиопеи): Кассиопея А (слева; вспыхнула примерно в 1650 г.  $\pm$ 30 лет) и «Тихо Браге» (справа; вспыхнула в 1572 г.). Свечение остатков связано с взаимодействием разлетающегося вещества сверхновой с газом в галактике.

Фото NASA/CXC/SAO

бытий мы можем видеть и сегодня в виде «остатков вспышек сверхновых» на тех местах, где они были заметны сотни лет тому назад (рис.1). Эти наблюдения позволят нам многое узнать о распределении элементов в оболочке сверхновой и ее взаимодействии с газом в Галактике. Однако, чтобы ответить на ряд важных вопросов, необходимы измерения спектров сразу после взрыва, на масштабах месяцев и лет. Именно об этом пойдет речь ниже. Но сначала поясним, что представляют из себя звезды двух упомянутых типов.

### Короткая, но яркая жизнь массивной звезды

Сверхновые типа II связаны с массивными звездами, превосходящими массу Солнца  $M_{\odot}$  в восемь или более раз. В таких звездах эволюция идет очень быстро, на масштабе десятков миллионов лет, при высочайших температурах (более миллиарда градусов). Сначала в ядре звезды выгорает водород, потом гелий и более тяжелые элементы, вплоть до железа. К моменту взрыва сверхновой звезда имеет слоистую структуру: железное ядро, окруженное слоями кремния, серы, кислорода и т.д., погруженными в массивную водородную оболочку. В железном ядре ни ядерные, ни термоядерные реакции не приводят к выделению энергии. Поэтому, как только железное ядро набирает достаточную массу, оно коллапсирует под действием гравитации и может превратиться в нейтронную звезду или черную дыру. Современные теоретические модели предсказывают, что в процессе коллапса электроны буквально «вдавливаются» в протоны, превращая их в нейтроны. Образующиеся при этом нейтрино выносят энергию из ядра и, несмотря на ничтожно малое сечение

взаимодействия с веществом, передают свою энергию водородной оболочке, приводя к ее разлету со скоростями порядка нескольких тысяч километров в секунду. Это и есть взрыв сверхновой типа II. Линии водорода в спектрах таких сверхновых напрямую связаны с наличием массивной водородной оболочки.

### Белый карлик как термоядерная бомба

В отличие от вспышек SN типа II, к которым приводят процессы в массивных звездах, сверхновые типа Ia — порождение меньших звезд, например с массой порядка  $M_{\odot}$ . В таких звездах эволюция идет гораздо медленнее, температура в ядре гораздо ниже (сотни миллионов градусов), и термоядерные реакции не приводят к формированию железного ядра. Вместо этого во многих случаях образуется ядро, состоящее из углерода и кислорода. На этапе слоистого горения звезда сбрасывает свою внешнюю оболочку, и на месте звезды остается компактное ядро с массой около  $0.5 M_{\odot}$  и диаметром  $\sim 10$  тыс. км и, следовательно, с колоссальной плотностью  $\sim 10^6$  г/см<sup>3</sup>. Температура в таком остатке слишком мала, чтобы запустить ядерные реакции горения углерода или кислорода. Однако остаток не сжимается под действием гравитации, поскольку давление в нем обеспечивается «вырожденными» электронами. Из принципа Паули, запрещающего двум одинаковым частицам с полужелым спином находиться в одном квантовом состоянии, следует, что при большой плотности электронов их энергия не может быть меньше определенной величины, которая зависит от их плотности (такой электронный газ называется вырожденным). Эта энергия не связана с температурой электронов и не может быть «излуче-

на» остатком. Подобные остатки называются в астрофизике белыми карликами. Поддерживаемые давлением вырожденного электронного газа белые карлики способны существовать вечно. Однако их судьба может измениться, если масса будет возрастать. Например, белый карлик в двойной системе с обычной звездой постепенно «перетянет» вещество со звезды-компаньона. Или два белых карлика в очень тесной двойной системе сольются в один объект. Что будет происходить в этом случае? Сила гравитации в более массивном объекте возрастает, и белый карлик должен сжаться, чтобы увеличить давление и противостоять сжатию. При этом растет плотность электронов и, соответственно, их энергия. В какой-то момент последняя оказывается сравнимой с энергией покоя частицы — и вырожденный электронный газ становится релятивистским. Масса белого карлика, при которой это происходит, составляет  $\approx 1.4 M_{\odot}$  и называется пределом Чандрасекара. Звезда, давление которой определяется вырожденным релятивистским газом, оказывается неустойчивой. Небольшое сжатие приводит к усилению гравитации, давление также возрастает, но не достаточно, чтобы остановить сжатие и вернуть звезду к исходному состоянию. Ситуация похожа на катастрофический коллапс железного ядра массивных звезд, когда ядро превращается в нейтронную звезду или черную дыру (сверхновую типа II). Белый карлик, достигший предела Чандрасекара, также мог бы стать нейтронной звездой. Однако есть важнейшее отличие: белый карлик состоит из углерода и кислорода, а не из железа. Углерод и кислород — отличное термоядерное топливо, если температура и плотность достаточно велики. Именно такие условия ожидаются в недрах белого карлика, масса которого приближается к пределу Чандрасекара. В результате вместо коллапса может произойти термоядерный взрыв, при котором углерод и кислород превратятся в более тяжелые элементы и полностью разрушат белый карлик — это и есть взрыв сверхновой типа Ia! Энергия, выделяемая при взрыве, так велика, что внешние слои белого карлика разлетаются со скоростями в десятки тысяч километров в секунду.

### Год после взрыва

Итак, источники энергии взрыва в сверхновых этих двух типов различны. Но в обоих случаях свечение, наблюдаемое в течение последующих месяцев, обеспечивается не самой этой энергией, а радиоактивным распадом изотопов, которые синтезировались в процессе взрыва. Не будь его, сверхновые не должны были бы светить вовсе, поскольку разлетающееся вещество очень быстро остывает за счет расширения! В первый год свечения SN самый важный канал — такая цепочка рас-

падов: сначала радиоактивный никель  $^{56}\text{Ni}_{28}$  превращается в радиоактивный кобальт  $^{56}\text{Co}_{27}$ , а тот уже переходит в стабильный изотоп  $^{56}\text{Fe}_{26}$  (привычное нам всем железо). Схематично цепочка распадов проиллюстрирована на рис.2.

Энергия, выделяющаяся при распаде в виде гамма-квантов и позитронов, передается разлетающемуся веществу, нагревает его и приводит к появлению свечения в оптическом диапазоне. При этом масса радиоактивного никеля радикально отличается в сверхновых двух типов. Например, в сверхновой типа II SN1987A было синтезировано  $0.07 M_{\odot}$  в виде радиоактивного никеля, в то время как в типичных сверхновых типа Ia его синтезируется в 10 раз больше. Это приводит к тому, что сверхновые типа Ia гораздо ярче, чем сверхновые второго типа, и современные оптические телескопы способны наблюдать такие сверхновые с космологических расстояний. Еще один плюс — физика термоядерных сверхновых (типа Ia) гораздо более «однородна». Именно эти обстоятельства позволяют использовать термоядерные сверхновые как «стандартные свечи» (эталонные светимости) в космологии. Наблюдения далеких сверхновых показали [1, 2], что они чуть более тусклые, чем ожидается во Вселенной, расширение которой постепенно замедляется. Результатом данных исследований стал вывод, что наша Вселенная, наоборот, расширяется с ускорением — феномен, получивший название «темная энергия». Эти работы в 2011 г. были удостоены Нобелевской премии.

С течением времени плотность разлетающегося вещества падает, гамма-кванты уже слабее задерживаются веществом и имеют шанс выйти наружу. В этот момент сверхновая должна превратиться в мощный источник гамма-излучения. Однако зафиксировать данное излучение совсем не просто. Несмотря на то, что где-то во Вселенной каждую секунду взрываются десятки сверхновых и каждый год сотни открываются в оптическом

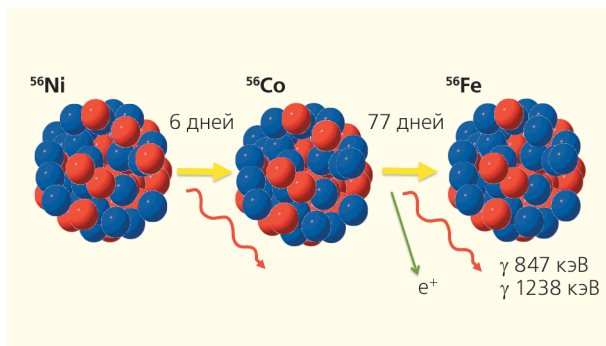


Рис.2. Упрощенная схема распада радиоактивного никеля  $^{56}\text{Ni}_{28}$  в кобальт  $^{56}\text{Co}_{27}$  (также радиоактивный), а затем в стабильный изотоп  $^{56}\text{Fe}_{26}$ . Энергия, выделяющаяся при распаде в виде гамма-квантов и позитронов, обеспечивает свечение сверхновой на масштабе месяцев и лет после взрыва.

диапазоне, большинство из них слишком слабы, чтобы их поток в гамма-диапазоне мог быть зарегистрирован. Причина проста — из-за высокой проникающей способности гамма-квантов требуется детектор большого размера, а из-за веса такой детектор не вывести на орбиту.

Таким образом, узнать что-то о гамма-излучении сверхновых с помощью современных обсерваторий можно, только если сверхновая вспыхнет в ближайшей окрестности. Поскольку в нашей Галактике сверхновые взрываются редко (примерно раз в 100 или 200 лет — термоядерные SN и в несколько раз чаще — SN типа II), основная надежда на область размером в несколько миллионов световых лет, в которую попадает несколько галактик, и где темп взрывов, соответственно, выше. Каждый взрыв сверхновой в этой области становится событием в жизни астрономов, и лучшие наземные и космические телескопы начинают интенсивные наблюдения близких сверхновых, чтобы не упустить столь редкий шанс. Удивительно, но сотрудники отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН оказались на редкость везучими: удалось исследовать две ближайшие сверхновые, имея на вооружении космические обсерватории, позволяющие напрямую измерять рентгеновское и гамма-излучение от этих объектов. По традиции каждая открытая сверхновая получает название, которое состоит из года открытия и одной или нескольких букв, означающих, какой по счету в этом году была открыта эта сверхновая. Например, сверхновая SN1987A — первая сверхновая, открытая в 1987 г., а SN2014J — десятая в 2014 г. Именно об этих сверхновых мы подробно и расскажем.

### Гостья из Большого Магелланова Облака

Ближайшая к нам (в современную эпоху) сверхновая типа II вспыхнула 23 февраля 1987 г. в галактике Большое Магелланово Облако (рис.3), на расстоянии примерно 180 тыс. св. лет [3]. Масса взорвавшейся звезды составляла около  $20 M_{\odot}$ . Замечательно, что с такого небольшого по астрономическим меркам расстояния можно ожидать детектирования нейтрино, возникающих при коллапсе ядра. И нейтрино действительно были открыты установками «Kamiokande II» в Японии, IMB в США и на Баксанской нейтринной обсерватории в Приэльбрусье.

Следующим важнейшим этапом стал поиск рентгеновского

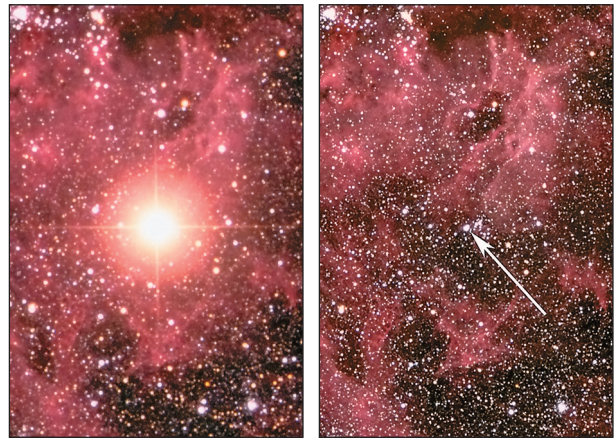


Рис.3. Изображение участка близкой галактики Большое Магелланово Облако в оптическом диапазоне после взрыва сверхновой 1987A. Справа показан тот же участок неба до взрыва.

Фото Anglo-Australian Observatory

и гамма-излучения, для чего необходимы орбитальные обсерватории, так как это излучение поглощается атмосферой Земли. По удачному стечению обстоятельств 31 марта 1987 г. с космодрома Байконур ракетой «Протон» был запущен на орбиту модуль «Квант» с рентгеновской обсерваторией на борту (рис.4). Эта обсерватория была результатом совместной работы ученых России, Германии, Нидерландов и Великобритании. Приборы обсерватории позволяли строить изображения

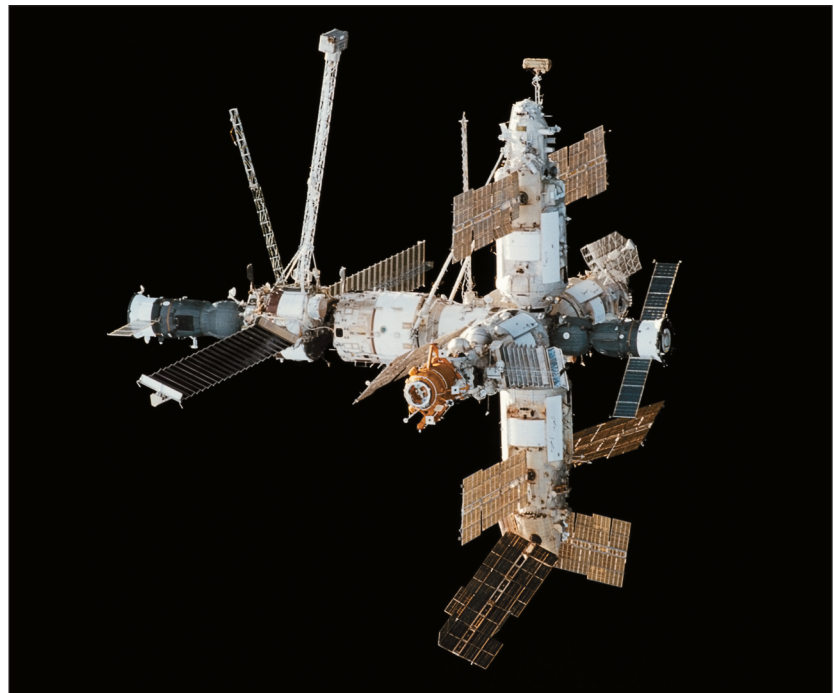


Рис.4. Модуль «Квант».

<http://wikimedia.org>

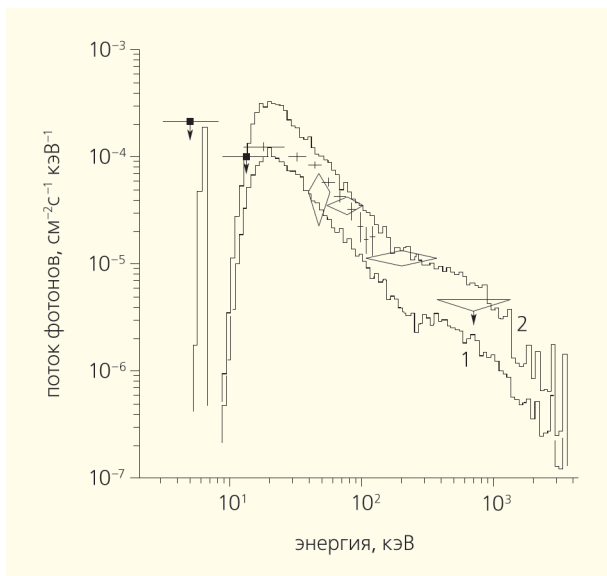


Рис.5. Спектр сверхновой SN1987A, зарегистрированный телескопами на модуле «Квант» [4]. Линиями показаны теоретические расчеты выходящих спектров.

и измерять спектры в диапазоне энергий от нескольких до 800 кэВ (подробнее результаты обсерватории описаны на странице отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН\*).

Поскольку в сверхновых типа II масса оболочки очень велика, а скорость расширения умеренная (по сравнению с термоядерными сверхновыми), требуется заметное время, прежде чем уменьшающаяся толща оболочки позволит гамма-излучению выйти наружу. Тем не менее практически сразу после запуска модуля «Квант» его телескопы начали систематические наблюдения сверхновой в надежде увидеть ее рентгеновское излучение. В августе 1987 г. обсерватория впервые обнаружила необычный сигнал в направлении на сверхновую 1987A. Источник был виден на энергиях, превышавших 20 кэВ, и имел очень жесткий спектр (рис.5). Основная светимость приходилась на фотоны самых высоких энергий, доступных «Кванту», а при более низких энергиях излучение не наблюдалось. Подобная форма спектра характерна для жесткого гамма-излучения, проходящего через рассеивающую и поглощающую среду. Для фотонов высоких энергий (в сотни килоэлектронвольт) главную роль играет рассеяние на электронах в разлетающейся оболочке. При каждом рассеянии фотон теряет часть своей энергии (передает ее электрону) и сдвигается в сторону низких энергий. На достаточно низких энергиях (десятках килоэлектронвольт) фотопоглощение начинает доминировать и полностью подавляет излучение. Именно такой спектр и был обнаружен телескопами

модуля «Квант». Эти измерения позволили оценить массу радиоактивного никеля — уже упоминавшиеся 7% массы Солнца — и получить ограничения на распределение никеля в оболочке, который оказался в значительной степени перемешанным с ее веществом.

## Взрыв в галактике M82

Сверхновая 1987A была сверхновой второго типа. Сверхновые типа Ia (термоядерные) взрываются в несколько раз реже, и пришлось ждать еще 27 лет, пока природа не предоставила нам шанс наблюдать другой тип сверхновых в нашей окрестности. И наконец 15 января 2014 г. сверхновая типа Ia взорвалась в галактике M82 (рис.6). Новость об (случайном!) открытии близкой сверхновой пришла 21 января 2014 г. Астроном Стив Фосси с группой студентов из Университетского колледжа Лондона, наблюдая M82 в небольшой телескоп, заметил новую яркую звезду, характеристики которой говорили о том, что мы имеем дело со сверхновой типа Ia. Она получила название SN2014J. Галактика M82 находится на расстоянии в 11 млн световых лет от нашей, что сразу сделало SN2014J кандидатом на ближайшую SNIa за последние несколько десятков лет. Такое редкое событие инициировало многочисленные наблюдения телескопов и обсерваторий во всем мире, включая обсерваторию ИНТЕГРАЛ (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory — INTEGRAL).

Эта международная астрофизическая лаборатория гамма-лучей — проект Европейского космического агентства (ЕКА) совместно с Роскосмосом и НАСА. Она была запущена 17 октября 2002 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Протон» и продолжает свою работу. В проекте рос-



Рис.6. Галактика M82 со Сверхновой SN2014J. Снимок получен на 1.5-метровом Российско-турецком телескопе РТТ-150 сотрудниками Казанского федерального университета (И.Ф.Бикмаевым, И.М.Хамитовым, Э.Н.Иртугановым). Сверхновая — голубой объект чуть правее и ниже центра рисунка.

\* <http://hea.iki.rssi.ru/ru/index.php?page=rentgen>

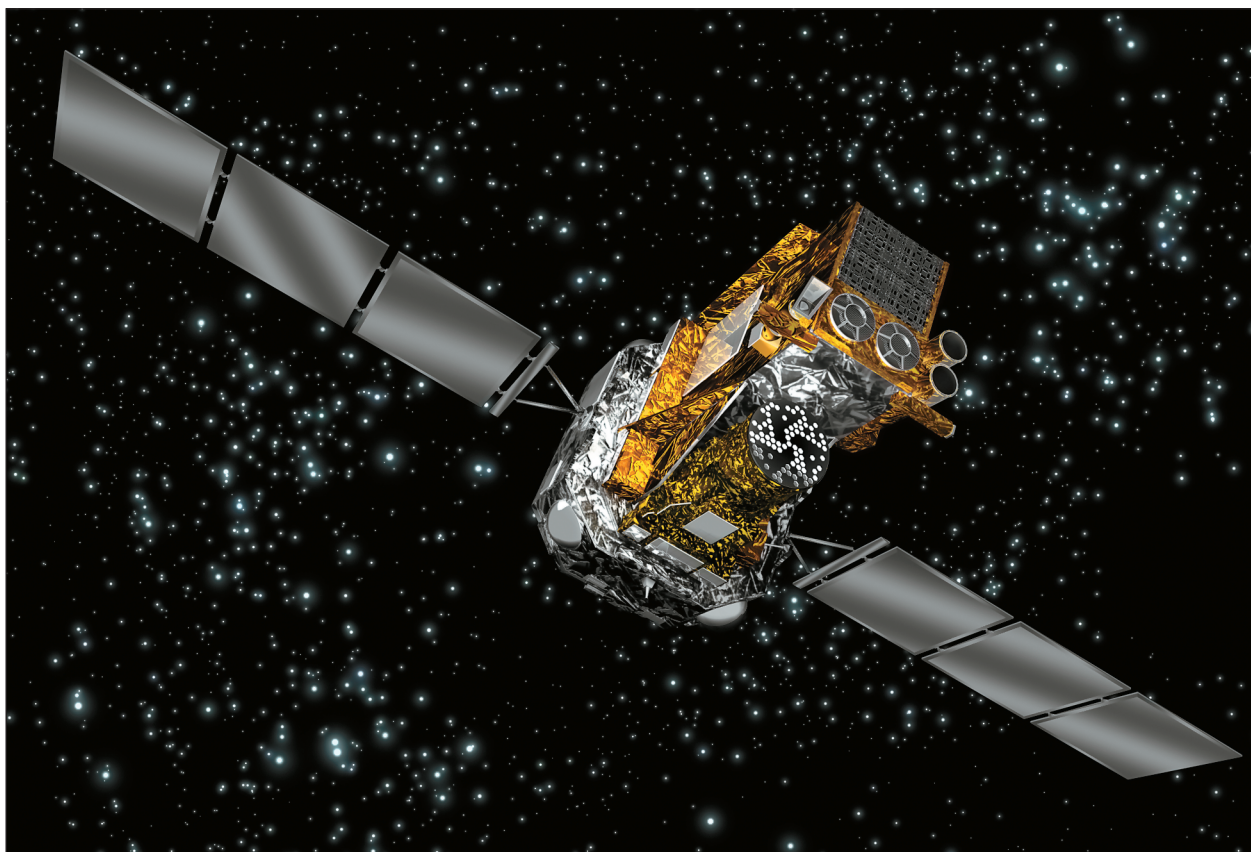


Рис.7. Обсерватория ИНТЕГРАЛ.

<http://sci.esa.int/integral>

сийские ученые имеют права на 25% наблюдательного времени миссии.

ИНТЕГРАЛ — первый в нашей стране астрофизический спутник, который работает как обсерватория (рис.7). Это означает, что исследователь из любого российского научного института или университета может подать заявку на проведение конкретного наблюдения на конкурс, проводимый раз в год. В случае успешного прохождения заявки ученый получает исключительное право на данные наблюдения, их анализ и публикацию полученных результатов в течение года с момента поступления данных. По данным обсерватории российскими учеными уже опубликовано в ведущих журналах около 300 работ, на которые уже получено более 4000 ссылок. Краткую сводку наиболее интересных результатов можно найти на нашей web-странице\*.

Несмотря на то, что сверхновая SN2014J в 60 раз дальше, чем сверхновая 1987A, большая ожидаемая масса радиоактивного никеля и меньшая масса оболочки давали шанс на обнаружение гамма-излучения. Российский научный комитет проекта ИНТЕГРАЛ решил прервать регулярную программу и потратить миллион секунд из нашей квоты

наблюдательного времени на мониторинг этой сверхновой. Именно в ходе этой работы (примерно через 50 дней после взрыва) были обнаружены первые признаки распада радиоактивных элементов в спектре гамма-излучения SN.

Хотя оболочка термоядерной сверхновой гораздо менее массивна, чем у SN типа II, а расширяется она быстрее, ожидается, что и в таких сверхновых к моменту, когда оболочка станет достаточно прозрачной для гамма-излучения (40—60 дней после взрыва), большая часть радиоактивного никеля полностью распадётся. Действительно, период полураспада никеля составляет всего 6 дней. Гораздо дольше живет радиоактивный кобальт — его период полураспада равен 77 дням. Таким образом, простые теоретические аргументы предсказывают, что главным признаком наличия синтезированных радиоактивных элементов должны быть яркие линии, характерные для распада кобальта-56. Таких линий две: на энергиях 847 и 1238 кэВ (мы знаем эти энергии из наземных экспериментов). Наблюдения обсерватории ИНТЕГРАЛ обнаружили излучение от сверхновой 2014J именно на этих энергиях (рис.8)! Зафиксированный поток свидетельствует, что  $\approx 0.6 M_{\odot}$  радиоактивного никеля было синтезировано в процессе термоядерного взрыва звезды. Кроме того, быстрое расши-

\* <http://hea.iki.rssi.ru/ru/index.php?page=integral>

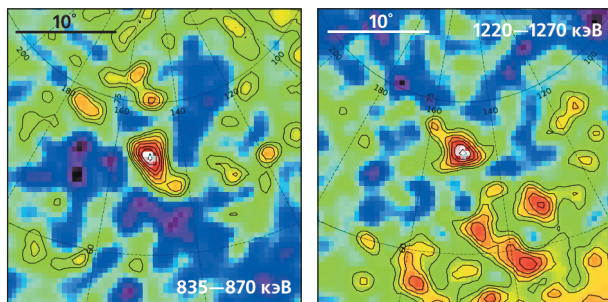


Рис.8. Изображения в гамма-лучах участка неба вокруг галактики M82, в которой в январе 2014 г. взорвалась сверхновая 2014J, полученные обсерваторией ИНТЕГРАЛ [5]. При распаде радиоактивного кобальта-56 основная энергия выделяется в виде гамма-квантов с энергией 847 (слева) и 1238 кэВ (справа). Именно на этих энергиях обсерватория «увидела» сверхновую.

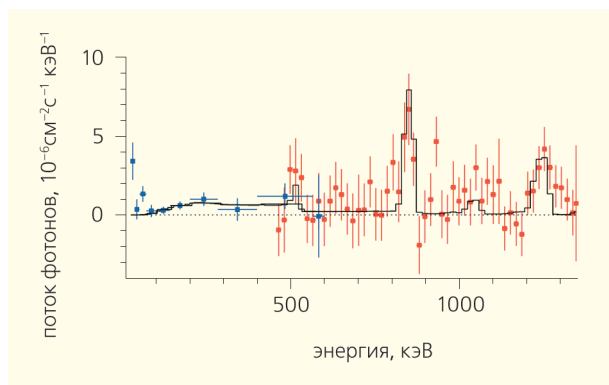


Рис.9. Спектр сверхновой SN2014J в галактике M82, измеренный обсерваторией ИНТЕГРАЛ [5]. Черной линией показан теоретический расчет выходящего излучения после термоядерного взрыва белого карлика.

рение остатков взрыва должно приводить к уширению линий, которое также удалось измерить, — характерная скорость оказалась близка к 10 тыс. км/с. Наряду с гамма-фотонами, распад кобальта-56 в 19% случаев должен приводить к образованию позитронов. Теоретические расчеты показы-

вают, что большая часть этих позитронов должна аннигилировать внутри разлетающейся оболочки, приводя к характерным особенностям в спектре сверхновой — линии на энергии 511 кэВ (энергия покоя электрона и позитрона) и широкому континууму при более низких энергиях. Именно такую картину и дали измерения спектра сверхновой (рис.9). В целом наблюдения ИНТЕГРАЛА хорошо согласуются с предсказаниями канонических моделей термоядерных взрывов [6] белых карликов с массой, близкой к пределу Чандрасекара. Такое совпадение полностью подтверждает теоретическую концепцию сверхновых Ia и позволяет предположить, что по крайней мере в гамма-лучах SN2014J выступает типичным представителем класса сверхновых типа Ia.

### Ждем подарка от Млечного Пути!

Несмотря на долгую историю наблюдений и численных экспериментов, детальная физика взрывов сверхновых обоих типов и эволюция компактной звезды-предшественника сверхновой типа Ia до взрыва остаются предметом горячих споров. Наблюдения в рентгеновском и гамма-диапазонах стали блестящим подтверждением теоретической концепции взрывов сверхновых, но многие детали еще предстоит выяснить. Хотя обе SN — самые близкие сверхновые в нашу эпоху, в гамма-лучах это необычайно слабые объекты, которые сложно изучать. По сравнению с SN2014J последняя сверхновая в нашей Галактике (датированная, как уже говорилось, 1604 г.) должна была быть в 300 тыс. раз ярче! Со времени ее вспышки прошло уже больше 410 лет... при ожидаемом темпе примерно одна термоядерная сверхновая в столетие. Можно сказать, что Галактика «задолжала» нам по-настоящему яркую звезду-гостью. Конечно, отсутствие сверхновых в течение 400 лет не влияет на вероятность появления такой звезды завтра. Тем не менее есть шанс, что в ближайшие десятилетия Природа подарит нам еще одну возможность исследовать эти интереснейшие объекты во всех деталях. ■

### Литература

1. Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating Universe and a cosmological constant, 1998 // *The Astronomical Journal*. 1998. V.116. Iss.3. P.1009—1038.
2. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae // *The Astrophysical Journal*. 1999. V.517. Iss.2. P.565—586.
3. Имшенник В.С., Надёжин Д.К. Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория // *УФН*. 1988. Т.156. С.561—651.
4. Sunyaev R., Kaniovsky A., Efremov V. et al. Discovery of hard X-ray emission from supernova 1987A // *Nature*. 1987. V.330. P.227—229.
5. Churazov E., Sunyaev R., Isern J. et al.  $^{56}\text{CO}$   $\gamma$ -ray emission lines from the type Ia supernova SN2014J // *Nature*. 2014. V.512. P.406—408.
6. Hillebrandt W., Niemeyer J. // Type Ia supernova explosion models // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2000. V.38. P.191—230.