

Б. Штерн

СЕКУНДНЫЕ КАТАСТРОФЫ ГАЛАКТИЧЕСКОГО МАСШТАБА

Гром с ясного неба

60-е годы были самыми урожайными на сенсационные открытия в астрономии ушедшего века. Не говоря о фундаментальнейшем открытии реликтового излучения, это три явления, каждое из которых в то или иное время вызвало шок: квазары, пульсары и гамма-всплески. Но если квазары и пульсары были быстро поняты хотя бы в самых общих чертах, гамма-всплески водили исследователей за нос почти тридцать лет, да и сейчас остаются почти непонятыми.

Гамма-всплески — ярчайшее явление. Сильные всплески можно зарегистрировать детектором размером с монету (например, маленьким счетчиком Гейгера на спутнике). Открыты они были в 1968 г. американскими спутниками-шпионами «Вела», призванными наблюдать за ядерными взрывами в атмосфере.

Почти 30 лет их видели только как всплески отсчетов гамма-квантов детекторами на космических аппаратах, продолжительность менялась от малых долей секунды до сотен секунд, интенсивность всплеска зависела от времени непредсказуемым образом.

Иногда удавалось довольно точно определить положение источника всплеска на небе (гамма-всплески всегда приходят из разных мест, не повторяясь). И никогда на месте гамма-всплеска не оказывалось ровным счетом ничего, разве что какая-то очень далекая галактика, которые и так найдешь повсюду. Мощнейшие всплески напоминали гром с ясного неба

Больше двадцати лет думали, что гамма-всплески рождаются сравнительно недалеко — в Галактике — и связаны с какими-то катаклизмами на нейтронных звездах, богатых на яркие эффекты.

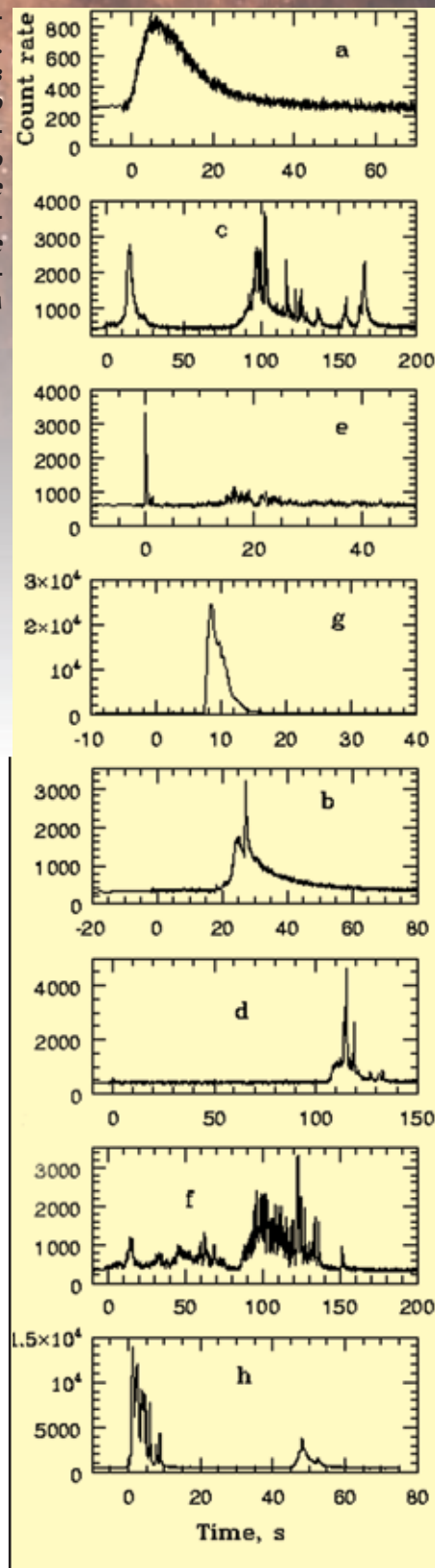
5 марта 1979 года произошло событие (кстати, зарегистрированное российскими аппаратами), после которого многие подумали, что ответ ясен: мощнейший всплеск с последующими периодическими пульсациями с пе-

Временные профили нескольких ярких гамма-всплесков (данные BATSE). (по горизонтальной оси — время в секундах, по вертикальной — число отсчетов в секунду). Профили настолько разные, что не верится, что они относятся к одному и тому же явлению. Однако, они хорошо вписываются в единую статистику и все попытки выделить среди них подклассы по временным профилям ничего не дали

риодом несколько секунд. Раз пульсации — значит пульсар, нейтронная звезда. Но впоследствии оказалось, что это был не гамма-всплеск, а *soft gamma repeater* (на одном семинаре предложили переводить это как «мягкий повторитель», но мы не берем на себя такую смелость) — совсем другое явление.

В 90-х годах, когда американцы (НАСА) запустили гамма-обсерваторию «Комптон», вообще все смешалось. Детекторы BATSE на Гамма Обсерватории регистрировали всплески почти ежедневно. Оказалось, что источники всплесков слишком равномерно распределены по небу, чтобы принадлежать Галактике, которая, как известно, имеет форму диска. Хуже того, явно не досчитывались слабых всплесков: их распределение по яркости подразумевало, что у их распределения по расстоянию от нас есть край! Как будто мы сидим в центре сферического ограниченного облака гамма-всплесков.

Это уже старая история, перейдем сразу к результату: большинство (которое не всегда право, но иногда бывает) исследователей постепенно, после жестоких баталий, поверило, что гамма-всплески рождаются на космологических расстояниях, за миллиарды световых лет от нас. Мы видим те всплески, которые испущены, когда Вселенная была вдвое-втрое моложе, чем сейчас. И равномерное распределение по небу (Вселенная на таких масштабах равномерна), и ограниченность по расстоянию (у Вселенной есть горизонт) при этом обеспечива-



ются автоматически. Но это было пока только сильное подозрение, многие астрофизики еще не верили в космологические расстояния до всплесков. Ведь если так, тогда гамма-всплески должны быть чудовищно мощными: чтобы дать такой эффект на расстоянии порядка 10 миллиардов световых лет надо излучить 10^{51} — 10^{52} эрг в гамма-квантах за считанные секунды: больше, чем при самых грандиозных взрывах, известных ранее — сверхновых, высвечивающих меньшую энергию за месяцы.

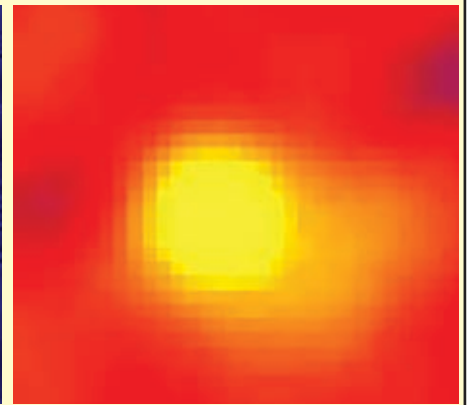
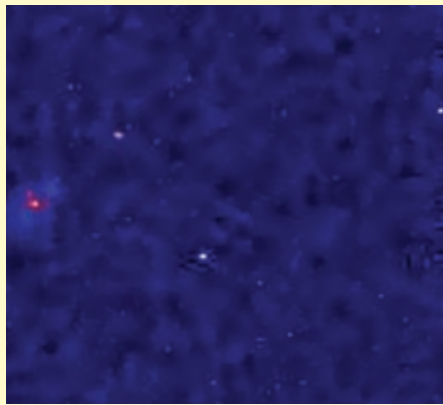
Где гром, там должна быть и молния

Прорыв тупика произошел 28 февраля 1997 г. Небольшой и сравнительно недорогой итало-голландский спутник «Верро-SAX» зарегистрировал гамма-всплеск позиционно-чувствительной гамма-камерой, которая выдала его координаты с точностью 7 угловых минут. На спутнике есть другая камера, рентгеновская, которая обладает лучшим угловым разрешением (благодаря рентгеновскому зеркалу), но имеет узкое поле зрения, куда всплеск не попал. Зато «Верро-SAX» умеет разворачиваться рентгеновской камерой на всплеск, что он и сделал за 8 часов. Рентгеновская камера в пределах упомянутых 7 минут зарегистрировала слабеющий источник с точностью уже в одну угловую минуту. А одна угловая минута — это достаточно точное указание для мощного телескопа, чтобы искать в этом месте нечто необычное.

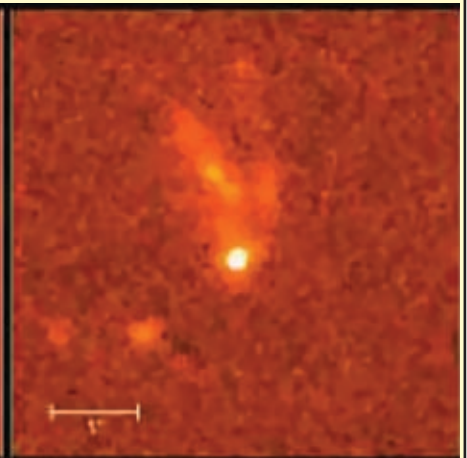
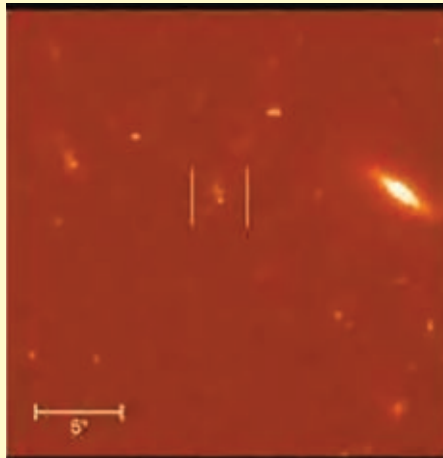
Нашли слабый точечный источник света, которого раньше там не было, необычно синий. Вскоре убедились, что источник слабеет. Сомнений не осталось — это послесвечение гамма-всплеска. Источник совпадал с очень далекой галактикой.

Вскоре зарегистрировали послесвечения других всплесков, для некоторых напрямую измерили красное смещение, и оно оказалось порядка $z=1$ и больше, т.е. источник удаляется со скоростью, сравнимой со скоростью света, расстояние до него — миллиарды световых лет, больше полпути до горизонта Вселенной и больше половины срока ее жизни во времени.

Методика наблюдений совершенствовалась — примерные координаты всплесков стали выдавать за считанные секунды, появились небольшие



Первое в истории обнаруженное послесвечение всплеска от 28 февраля 1997 г. На левом снимке оно находится вблизи центра. Справа оно же крупным планом. Слабое светящееся облако внизу справа — хозяйская галактика всплеска, которую он затмил своим послесвечением



Послесвечение знаменитого всплеска "0123". Слева — общий вид, справа — крупный план). Оно на 5—6 порядков величины слабее прямого оптического свечения, наблюдавшегося в момент всплеска, и все еще затмевает хозяйскую галактику (два слабых светящихся рукава, направленных вверх от остатка всплеска)

телескопы-роботы, направляющиеся в нужную точку неба по команде, переданной по сети. 23 января 1999 г. такой телескоп, наведясь по координатам, переданным со спутника, увидел гамма-всплеск в оптике через 10...20 секунд после его начала, когда он еще продолжался в гамма-диапазоне. По дате (23 января) всплеск получил прозвище 0123. То есть это было не послесвечение, а прямое оптическое свечение — в сотни тысяч раз ярче галактик, находящихся на том же (космологическом) расстоянии. Свечение могло быть видно с Земли в сильный бинокль и продолжалось секунд 40, как и гамма-всплеск. Послесвечение этого всплеска показано на рисунке.

Сейчас количество всплесков, для которых найдено послесвечение превысило три десятка. Для половины из

них непосредственно измерено красное смещение. Все они находятся на космологических расстояниях. Энергия, выделенная при гамма-всплесках колеблется от 10^{51} до 10^{54} эрг, если считать, что энергия излучена равномерно во все стороны.

Что такое 10^{54} эрг?

Идеально эффективный ядерный взрыв килограмма урана даст 10^{21} эрг, идеальный термоядерный взрыв килограмма дейтерий-тритиевой смеси в три раза больше. В этом случае выделяется от 0.1% до 0.3% от энергии массы покоя вещества (масса покоя дается знаменитой формулой $E = mc^2$). Если все Солнце (масса 10^{33} грамм) взорвется как термоядерная бомба (что бывает с некоторыми типами звезд), выделится около $3 \cdot 10^{51}$ эрг — близко к тому, что излучается при не самых сильных всплесках.

Есть более эффективный механизм звездного взрыва — гравитационный

**Эрг (от греч. εργον — работа) — единица работы и энергии в системе единиц СГС.
1 эрг равен работе силы в 1 дин при перемещении точки приложения силы на расстоянии 1 см в направлении действия силы.
1 эрг = $г \cdot см^2 / с^2 = 10^{-7}$ Дж (точно) = $6,24150965(16) \cdot 10^{11}$ эВ.**

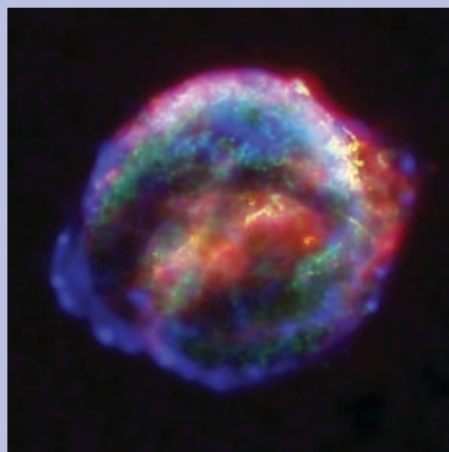
коллапс звезды в черную дыру. Теоретически — выделяемая энергия может быть сравнима с mc^2 , реально — большая ее часть уносится в черную дыру, наружу может быть выброшена энергия, эквивалентная 10% массы покоя (это довольно трудная оценка и она не точна). Для Солнца это 10^{53} эрг, для массивной звезды все 10^{54} эрг. Но куда пойдет эта энергия? В случае взрывов сверхновых большая ее часть уносится потоком труднонаблюдаемых нейтрино. А здесь мы имеем рекорд — 10^{54} эрг только в гамма-квантах! Скорее всего, энергия взрыва поменьше — просто она излучается неравномерно по направлениям, и иногда мы попадаем в максимальный поток, как бы в луч прожектора (а пересчет на полную энергию делается в предположении об изотропном излучении).

Важно то, что нужная энергия может быть обеспечена источником звездного происхождения. И в принципе есть мыслимые механизмы выделения подобной энергии. И даже есть явление, лишь немного уступающее гамма-всплескам по энерговыделению — взрывы сверхновых, правда эти взрывы в сотни тысяч раз растянуты относительно всплесков.

Не приведи Господь!

Возьмем умеренный случай энерговыделения 10^{52} эрг и расстояние до всплеска 3 парсека, 10 световых лет, или 10^{19} см — в таких пределах от нас находится с десяток звезд. На таком расстоянии за считанные секунды на каждом квадратном сантиметре попавшейся на пути гамма-квантов планеты выделится 10^{13} эрг. Это эквивалентно взрыву атомной бомбы на каждом гектаре неба! Атмосфера не помогает: хоть энергия высветится в ее верхних слоях, значительная часть мгновенно дойдет до поверхности в виде света. Ясно, что все живое на половине планеты будет истреблено мгновенно, на второй половине чуть позже за счет вторичных эффектов. Даже если мы возьмем в 100 раз большее расстояние (это уже толщина галактического диска и сотни тысяч звезд), эффект (по атомной бомбе на квадрат со стороной 10 км) будет тяжелейшим ударом, и тут уже надо серьезно оценивать — что выживет и выживет ли вообще что-нибудь.

Итак, каждый гамма-всплеск способен истребить жизнь в радиусе десятков, а то и сотен световых лет (если она там окажется) и нанести тяжелый удар по биосферам планет в радиусе до тысяч световых лет. К счастью, гамма-всплески достаточно ред-



SN 1604 или Сверхновая Кеплера — сверхновая звезда в нашей Галактике, вспыхнувшая в 1604 году в созвездии Змееносца, приблизительно в 6000 парсеках от Солнечной системы.

Впервые эту сверхновую звезду наблюдали 9 октября 1604. А Сверхновой Кеплера она названа потому, что начиная с 17 октября ее наблюдал немецкий астроном Иоганн Кеплер, который впоследствии составил ее подробнейшее описание.

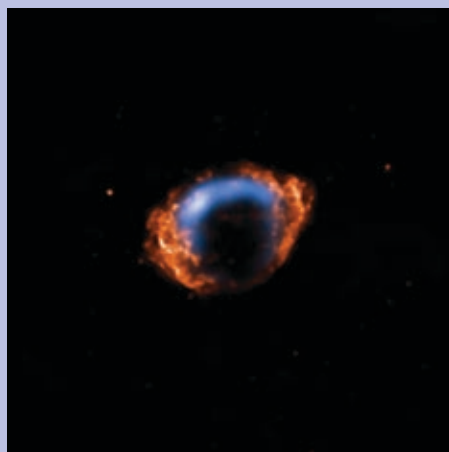
Остаток сверхновой SN 1604, как он выглядит в наши дни. Композитное изображение в условных цветах.

НЕМНОГО О СВЕРХНОВЫХ

Сверхновые звезды — звезды, заканчивающие свою эволюцию в катастрофическом взрывном процессе. Термином «сверхновые» были названы звезды, которые вспыхивали гораздо (на порядки) сильнее так называемых «новых звезд».

Сверхновые II типа

По современным представлениям, термоядерный синтез приводит со временем к обогащению состава внутренних областей звезды тяжелыми элементами. В процессе термоядерного синтеза и образования тяжелых элементов звезда сжимается, а температура в ее центре растет. (Эффект отрицательной теплоемкости гравитирующего невырожденного вещества.) Если масса звезды достаточно велика, то процесс термоядерного синтеза доходит до логического завершения с образованием ядер железа и никеля, а сжатие продолжается. При этом термоядерные реакции будут продолжаться только в некотором слое звезды вокруг центрального ядра — там, где еще осталось невыгоревшее термоядерное топливо. Центральное ядро сжимается все сильнее, и в некоторый момент из-за давления в нем начинают идти реакции нейтронизации — протоны начинают поглощать электроны, превращаясь в нейтроны. Это вызывает быструю потерю энергии, уносимой образующимися нейтрино (т.н. нейтринное охлаждение), так что ядро звезды сжимается и охлаждается. Процесс коллапса центрального ядра настолько быстр, что вокруг него образуется волна разрежения. Тогда вслед за ядром к центру звезды устремляется и оболочка. Далее происходит отскок вещества оболочки от ядра и образуется распространяющаяся наружу ударная волна, инициирующая термоядерные реакции. При этом выделяется достаточная энергия для сброса оболочки сверхновой с большой скоростью. Важное значение имеет процесс подпитки ударной волны энергией выходящих из центральной области нейтрино. Такой механизм взрыва относится к сверхновым II типа (SN II). Как показывает численное моделирование, ударная волна отскока не приводит к взрыву сверхновой. Она останавливается на расстоянии примерно 100-200 км от центра звезды. Учет вращения и наличия магнитного поля позволяет численно смоделировать взрыв сверхновой (магниторотационный механизм взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром). Считается, что образованием сверхновой II типа заканчивается эволюция всех звезд, первоначальная масса которых превышает 8—10 масс Солнца. После взрыва остается нейтронная звезда или черная дыра, а вокруг этих объектов в пространстве некоторое время существуют остатки оболочек взорвавшейся звезды в виде расширяющейся газовой туманности.



Сверхновая G1.9+0.3 (самая молодая в нашей Галактике) — совмещенный снимок в рентгеновском и радиодиапазонах

Сверхновая G1.9+0.3 (самая молодая в нашей Галактике) — совмещенный снимок в рентгеновском и радиодиапазонах

СВЕРХНОВЫЕ ТИПА IA

Несколько другим выглядит механизм вспышек сверхновых звезд типа Ia (SN Ia). Это так называемая термоядерная сверхновая, в основе механизма взрыва которой лежит процесс термоядерного синтеза в плотном углеродно-кислородном ядре звез-

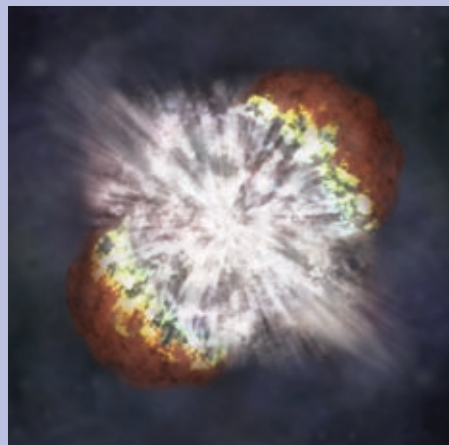
ки. Число наблюдаемых (правильнее сказать — наблюдавшихся, поскольку гамма-обсерватория «Комптон», регистрировавшая 90% всплесков, уничтожена конъюнктурным решением руководства НАСА) гамма-всплесков — около трехсот в год. С поправками на неполное поле зрения, дыры в данных и малую эффективность регистрации слабых всплесков имеем 600...800 в год. Стараниями автора данной заметки с соавторами, нашедшими много очень слабых всплесков в архивных данных Комптоновской обсерватории, пропущенных регистрирующей электроникой, цифра возрастает до 1200...1300 в год, и еще минимум 2000 должны быть слабее порога регистрации (экстраполяция). Скорее всего, гамма-всплесков происходит не менее 10000 в год.

В видимой Вселенной около миллиарда галактик. Получается около одного всплеска в миллион лет на галактику. На расстояниях порядка размеров галактики (десятки тысяч световых лет) гамма-всплеск еще безопасен. Но один из сотни или тысячи всплесков в галактике может происходить достаточно близко, чтобы представлять угрозу.

Тут самое время вспомнить о вымирании динозавров (вообще этот ход очень выигрышен в смысле public relations — динозавры популярны, их вымирание — интригующе) — не гамма-всплеск ли тому виной? Действительно, было несколько работ на эту тему, где вышеприведенные оценки, выраженные здесь в атомных бомбах на единицу площади, делались серьезней и детальней. Получалось, что раз в несколько сот миллионов лет гамма-всплески действительно должны наносить заметный урон фауне Земли, и один из них вполне мог погубить динозавров.

Как устроить чистый взрыв

Рассуждения о катастрофичности гамма-всплесков хоть и интересны, все-таки это досужие рассуждения. С точки зрения ученого куда важнее понять, что это такое и как это происходит. Первый вопрос проще: выбирать особенно не из чего — гамма-всплеск является разновидностью катастрофического гравитационного коллапса одного или пары объектов звездного происхождения. Либо коллапс очень массивной звезды, либо слияние и совместный коллапс двух нейтронных звезд в черную дыру. В этом смысле гамма-всплеск не сильно отличается от взрыва сверхно-



SN 2006gy — самая яркая сверхновая за всю историю наблюдений, взрыв которой наблюдался 18 сентября 2006 года в галактике NGC 1260

ды. Предшественниками SN Ia являются белые карлики с массой, близкой к пределу Chandrasekara. Принято считать, что такие звезды могут образовываться при перетекании вещества от второй компоненты двойной звездной системы. Это происходит, если вторая звезда системы выходит за пределы своей полости Роша или относится к классу звезд со сверхинтенсивным звездным ветром. При увеличении массы белого карлика постепенно увеличивается его плотность и температура. Наконец, при достижении температуры порядка 3×10^8 К, возникают условия для термоядерного поджигания углеродно-кислородной смеси. От центра к внешним слоям начинает распространяться фронт горения, оставляя за собой про-

дукты горения — ядра группы железа. Распространение фронта горения происходит в медленном дефлаграционном режиме и является неустойчивым к различным видам возмущений. Наибольшее значение имеет Релей-Тейлоровская неустойчивость, которая возникает из-за действия архимедовой силы на легкие и менее плотные продукты горения, по сравнению с плотной углеродно-кислородной оболочкой. Начинаются интенсивные крупномасштабные конвективные процессы, приводящие к еще большему усилению термоядерных реакций и выделению необходимой для сброса оболочки сверхновой энергии ($\sim 10^{51}$ эрг). Скорость фронта горения увеличивается, возможна турбулизация пламени и образование ударной волны во внешних слоях звезды...

ДРУГИЕ ТИПЫ СВЕРХНОВЫХ

Существуют также SN Ib и Ic, предшественниками которых являются массивные звезды в двойных системах, в отличие от SN II, предшественниками которых являются одиночные звезды.

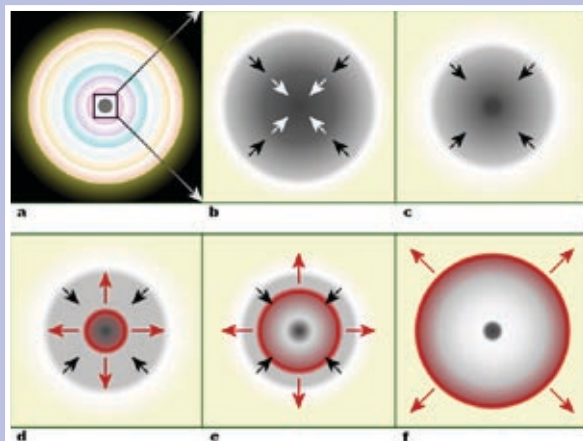
Теория сверхновых

Законченной теории сверхновых звезд пока не существует. Все предлагаемые модели являются упрощенными и имеют свободные параметры, которые необходимо настраивать для получения необходимой картины взрыва. В настоящее время в численных моделях невозможно учесть все физические процессы, происходящие в звездах и имеющие значение для развития вспышки.

МЕСТО СВЕРХНОВЫХ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Согласно многочисленным исследованиям, после рождения Вселенной, она была заполнена только легкими веществами — водородом и гелием. Все остальные химические элементы могли образоваться только в процессе горения звезд. Это означает, что наша планета (и мы с вами) состоим из вещества, образовавшегося в недрах доисторической звезды и выброшенного когда-то во взрыве сверхновой.

Взрыв сверхновой звезды — явление чрезвычайно редкое. По современным представлениям, в нашей Галактике должен происходить взрыв сверхновой примерно каждые 50 лет. Большая часть этих взрывов оказывается скрыта от нас непрозрачной пылевой подсистемой нашей Галактики. Поэтому большинство сверхновых наблюдается в других галактиках. Глубокие обзоры неба на автоматических камерах, соединенных с телескопами, позволяют сейчас астрономам открывать более 300 вспышек в год.



Модель механизма гравитационного коллапса

вой, тоже связанного с гравитационным коллапсом ядра звезды. Разница в последствиях — в случае сверхновой выбрасывается тяжелая оболочка вещества, которая высвечивается в течение недель и месяцев и летит медленно, 10...30 тыс. км/с, т.е. около 0.03...0.1 от скорости света. В случае гамма-всплеска нечто излучающее гамма-кванты летит практически со скоростью света.

Когда речь идет о таких скоростях, основное значение имеет Лоренц-фактор $\Gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ — энергия тела равна энергии массы покоя, умноженной на Γ , время на летящем объекте замедляется в Γ раз и т.п. Довольно твердое утверждение заключается в том, что излучающая субстанция гамма-всплеска движется к нам с Лоренц-фактором не меньше 100, иначе она не смогла бы испускать гамма-кванты больших энергий. Значит, летит очень мало вещества, на 5...6 порядков меньше, чем в оболочке сверхновой, иначе получится слишком большая кинетическая энергия.

В этом и есть основное отличие: взрыв сверхновой «грязный», в него вовлечены огромные массы вещества, гамма-всплеск — чистый взрыв, вещество почти не выбрасывается, выбрасывается чистая энергия в виде магнитного поля и релятивистских частиц. Кстати, именно из-за большого Лоренц-фактора всплеск получается коротким. Ударный фронт может идти и излучать несколько дней или месяц. Но он очень мало отстает от гамма-квантов, которые сам испустил. В результате все гамма-кванты приходят к нам почти одновременно, и мы видим всплеск десятки секунд длиной (происходит сжатие времени в $1/\Gamma^2$ раз) там, где излучение продолжалось дни.

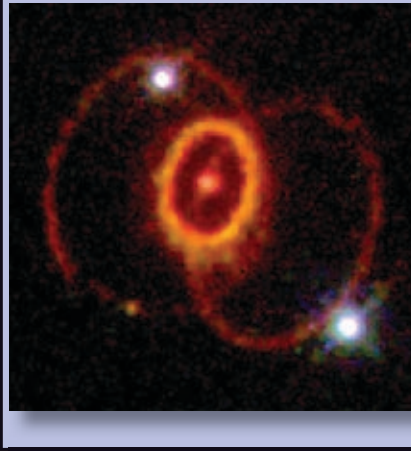
Сценарии и персонажи

В кандидатах в виновники гамма-всплесков перебивало множество космических персонажей: нейтронные звезды, реликтовые черные дыры, белые карлики, красные карлики, космические струны, даже кометы — список далеко не полон.

Ныне всерьез рассматриваются только два: парные нейтронные звезды, сливающиеся в черную дыру и коллапсирующие звезды-гиганты.

Итак, подводя черту, попробуем обрисовать наиболее популярные сценарии гамма-всплеска. Причиной является катастрофа звездного масштаба: слияние пары нейтронных звезд, или коллапс ядра очень большой звезды. За миллисекунды выделяется до 10^{54} эрг,

Взрыв сверхновой SN 1987A в галактике Большое Магелланово Облако на расстоянии около 160 тыс. световых лет от Земли был обнаружен в 1987 г. (и это отражено в названии). Это был самый ближний к нам взрыв сверхновой, зафиксированный за последние 300 лет. Взорвавшаяся звезда называлась Sanduleak -69 202 (SK -69), ее масса примерно в 20 раз превышала массу Солнца, по своим параметрам звезда относилась к классу голубых супергигантов.



Астрономы считают, что звезда SK-69 образовалась около 10 млн лет назад из темного плотного облака газа и пыли. Примерно миллион лет назад эта звезда потеряла большую часть своих внешних слоев за счет мощного звездного ветра. Из вещества, которое ветер вынес из звезды, вокруг нее образовалось огромное газовое облако. В этом холодном облаке перед взрывом звезды звездный ветер «вымел» большую полость. Когда во время взрыва сверхновой мощная вспышка ультрафиолетового излучения осветила края этой полости, то образовалось светящееся кольцо, которое смог увидеть космический телескоп Hubble.

которые мы пока не видим. И в случае слияния нейтронных звезд и в случае коллапса гиганта образуется диск из сверхплотной материи радиусом порядка 10 км. Он и излучает энергию. Никто не знает, сколько живет этот диск: одни исследователи за то, что он живет миллисекунды, другие за то, что он живет десятки и сотни секунд. Энергия, излученная диском, разлетается почти со скоростью света в форме частиц и магнитного поля — ультрарелятивистский «файербол» или струя.

Если это произошло в ядре гиганта — диск испускает вдоль оси вращения две струи энергии такой мощности, что, по уверениям Стэна Вусли (Санта-Круз) с соавторами, они за доли секунды прожигают канал сквозь тело звезды, очищая свой путь от вещества. Это получается при численном моделировании, но убедить общественность в этом непросто, поскольку задача очень сложна.

Будь то файербол или струя — в начале мы ничего не видим: плотность энергии и частиц в нем настолько велика, что излучение оказывается запертым. И только потом, когда «файербол» прошел световые часы, дни или даже месяцы, он как-то перерабатывает свою энергию в гамма-кванты (для нас эти дни и месяцы сжимаются в секунды, см. выше). Поток этих гамма-квантов таков, что звездная катастрофа превращается в катастрофу местного галактического масштаба, способную истребить жизнь на расстояниях до сотен световых лет.

Потом в течение многих недель мы видим последствия взаимодействия уже замедлившегося «файерболо» с межзвездной средой — послесвечение.

Оно гораздо слабей всплеска и сравнимо с обычной сверхновой (все же ярче).

В этом сценарии остается масса неясных вопросов. Например, как и что излучает гамма-кванты, что определяет разнообразные кривые яркости всплесков, на которые пока нет убедительных ответов. Кажется, там работает какой-то сравнительно простой и красивый процесс, которого мы не понимаем.

Просветить всю Вселенную

Квезары сравнивают с маяками Вселенной. Они видны с огромных расстояний (до красного смещения $z=5$), по ним исследуют структуру и эволюцию Вселенной, определяют распределение вещества на луче зрения: сильные спектральные линии поглощения водорода разворачиваются в лес линий по красному смещению поглощающих облаков.

Прямое оптическое излучение всплеска, как в случае 0123 (см. выше), несравненно ярче любого квазара, хотя продолжается недолго. Такой всплеск, если его успеть поймать, мог бы легко быть виден из самой ранней Вселенной, о которой мы почти не имеем представления. По мнению Джорговского, одного из лидеров в оптических наблюдениях послесвечений всплесков, такого события хватило бы, чтобы промерить распределение газа на луче зрения вплоть до $z=10$ — это бы сказало очень многое про эпоху образования галактик.

Так явление, остающееся загадочным, уже приобретает значение инструмента исследования.

