

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ В КОСМОСЕ: ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО СЛИЯНИЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД¹



А.А. ЛУТОВИНОВ,

доктор физико-математических наук, профессор Российской Академии наук
Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/5004439481906001X

Завершается 2019 год – год Периодической таблицы химических элементов, провозглашенный Генеральной Ассамблеей ООН. И если о свойствах элементов рассказывают химики, то ответ на вопрос, а как образовались химические элементы, дают астрофизики.

В изначальной модели Большого взрыва, предложенной в 1948 году Г. Гамовым, предполагалось, что большинство известных элементов возникло в первые минуты после Большого взрыва. Но достаточно быстро стало понятно, что это не совсем так – из-за отсутствия в природе стабильных элементов с массами 5 и 8 произвести в имеющихся на тот момент условиях элементы ещё более тяжелые было практически невозможно. Таким образом, согласно принятой на сегодняшний день модели, в первые несколько минут после рождения Вселенной появились лишь водород, гелий и немного лития, а большинство из остальных элементов Периодической системы являются продуктом звездного синтеза.

В этой статье кратко рассматриваются этапы эволюции звезд разных типов, в результате которых образуются разные химические элементы, а также то, как и с помощью каких инструментов ученые-астрономы научились достаточно точно определять качественный и количественный состав получившихся элементов.

ОБРАЗОВАНИЕ ЗВЕЗД И ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Чтобы в ранней Вселенной смогли образоваться первые звезды, горячему газу необходимо было остыть. Долгое

время Вселенная была заполнена горячим, ионизированным веществом, которое находилось в равновесии с излучением. Только по прошествии почти четырехсот тысяч лет температура Вселенной упала до примерно 3000 К, что позволило электронам соединиться

¹ Статья основана на выступлении А.А. Лутовинова 29 января 2019 г. в штаб-квартире ЮНЕСКО в Париже (Франция) во время торжественной церемонии открытия Международного года Периодической таблицы химических элементов (ЗиВ, 2, 2019, с. 40).

с ядрами и образовать первые молекулы. Вселенная стала прозрачна для излучения, следы которого мы до сих пор можем наблюдать в виде так называемого микроволнового фона с нынешней температурой около 2,7 К.

Однако температура вещества в несколько тысяч градусов все равно слишком велика для того, чтобы из него сформировать плотное газовое облако, которое, при последующем сжатии (гравитационном коллапсе) сможет превратиться в звезду. Нужно было каким-то образом понизить температуру вещества и создать предпосылки для образования его начальных сгустков, которые могли бы стать “зародышами” будущих звезд.

Понижение температуры может идти достаточно эффективно с помощью пыли или многоатомных молекул тяжелых элементов, однако в ранней Вселенной ни того, ни другого не было. Согласно современным представлениям, эффективное охлаждение первичной материи осуществлялось молекулярным водородом, а неоднородности распределения темной материи обеспечили наличие гравитационных потенциальных ям, где это охлажденное вещество начинало скапливаться, тем самым формируя зачатки первых звезд.

По разным оценкам, первые звезды сформировались через 300–400 миллионов лет после Большого взрыва, хотя некоторые считают, что это произошло гораздо раньше – уже через 30–70 миллионов лет. Это довольно важный вопрос, так как от правильного ответа может зависеть дальнейшее построение модели развития Вселенной.

Первые звезды должны были быть очень большими: по некоторым оценкам, их массы могли достигать 300 или даже 500 масс Солнца (для сравнения, большинство современных звезд являются маломассивными объектами с массами, сравнимыми с солнечной или меньше). Они были чрезвычайно яркими и светили в миллионы раз ярче Солнца. Жизнь таких звезд была очень недолгой, буквально несколько миллионов лет: они очень быстро прогорали

и взрывались сверхновыми, при этом, возможно, некоторые из них, становились первыми черными дырами.

Источником энергии излучения звезд и их огромной светимости являются термоядерные реакции, протекающие в их недрах. Суть же заключается в том, что в ядре звезды из-за огромных давлений и температур создаются оптимальные условия для реакций термоядерного синтеза и образования новых элементов.

В самой первой, самой длинной фазе горит водород, в результате чего образуется гелий. Слово “горит”, впрочем, может ввести в заблуждение – речь идет не об окислении элементов (кислород ещё только предстоит создать). В результате такой ядерной реакции четыре протона (или ядра водорода) сливаются, образуя ядро гелия. На последующей стадии горения, которая составляет только последние десять процентов жизни звезд, два ядра гелия (“ α -частицы”) превращаются в бериллий ${}^8\text{Be}$, время жизни которого чрезвычайно мало ($\sim 10^{-16}$ с). Однако в плотном и горячем ядре звезды этого времени может оказаться достаточно для того, чтобы образовавшийся-

Источником энергии излучения звезд и их огромной светимости являются термоядерные реакции, протекающие в их недрах. Суть же заключается в том, что в ядре звезды из-за огромных давлений и температур создаются оптимальные условия для реакций термоядерного синтеза и образования новых элементов.

ся бериллий успел захватить еще одну α -частицу, превращаясь в углерод в так называемом тройном α -процессе. Посредством дополнительных захватов α -частиц ядра углерода превращаются в кислород и т.д. Примеры таких реакций приведены ниже:

- 3 атома гелия, сливающиеся с образованием атома углерода: $3\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C}$;
- атом углерода + атом гелия, сливающиеся с образованием атома кислорода: $^{12}\text{C} +\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{16}\text{O}$;
- атом кислорода + атом гелия, сливающиеся с образованием атома неона: $^{16}\text{O} +\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{20}\text{Ne}$;
- атом неона + атом гелия, сливающиеся с образованием атома магния: $^{20}\text{Ne} +\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{24}\text{Mg}$, и т.д.

Таким образом, в результате процессов звездного нуклеосинтеза, теория которого впервые была опубликована в 1957 году, образуются все элементы в Периодической таблице, вплоть до железа, которое имеет наибольшую энергию связи на один нуклон.

Как только в центре звезды образуется железное ядро, нуклеосинтез прекращается, становится невозможным получать энергию путем дальнейших ядерных реакций, и звезда лишается источника энергии, необходимого для существования. Как следствие, звезда больше не может поддерживать состояние равновесия и начинает разрушаться под действием собственной гравитации. Происходит коллапс (сжатие), сопровождающийся гигантской вспышкой сверхновой.

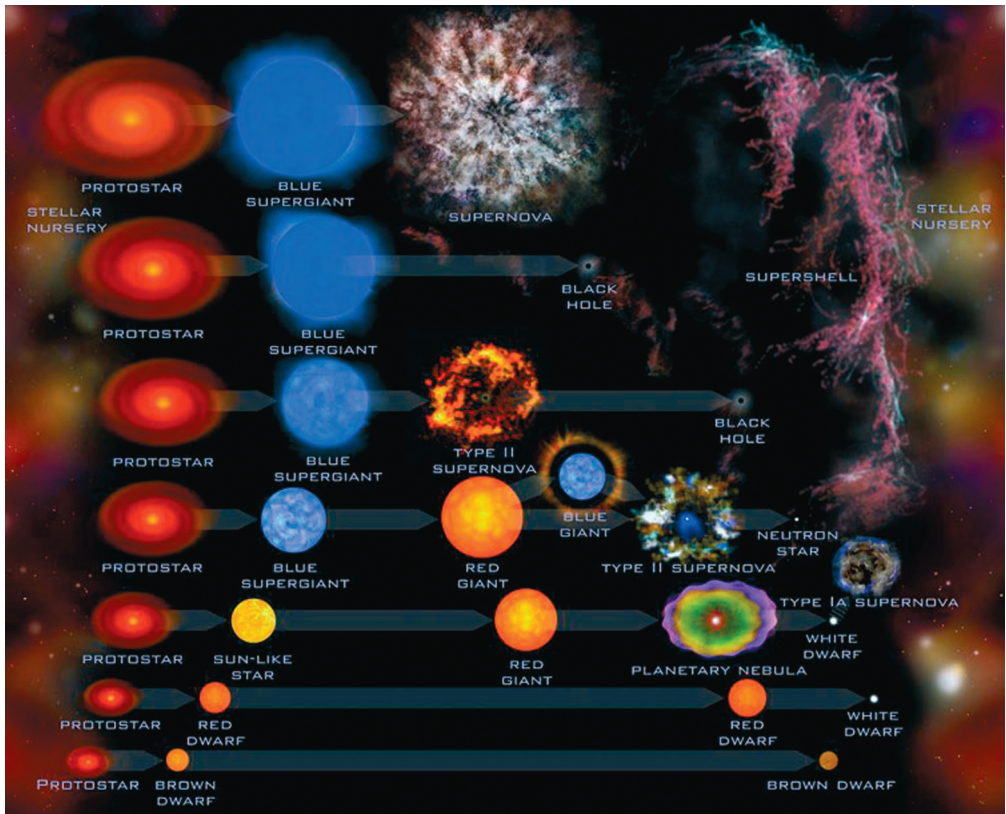
Такова была судьба самых первых массивных звезд, и такова судьба массивных звезд и в наши дни. Существенное отличие состоит в том, что “современные” массивные звезды могут иметь массы в 20–30 масс Солнца, что позволяет в результате финального коллапса образовать так называемую нейтронную звезду – чрезвычайно плотный объект

(плотность в центре может превышать ядерную в несколько раз) размером в 10–20 км и итоговой массой 1,2–2,0 массы Солнца. Существование последних оказывается чрезвычайно важным для производства сверхтяжелых элементов во Вселенной.

Во время взрыва сверхновой все образовавшиеся элементы попадают в межзвездную среду. “Смерть” первых звезд стала важной вехой в эволюции Вселенной, так как в результате она обогатилась углеродом, кислородом, азотом, железом и другими элементами. Все звезды в последующих поколениях формировались из газовых облаков, уже содержащих металлы, которые были получены, по крайней мере, от одного поколения звезд, взрывающихся в виде сверхновых.

Появление в ранней Вселенной тяжелых элементов кардинально изменило условия для последующего звездообразования. В присутствии металлов или пыли облака газа стали охлаждаться более эффективно, что привело к возможности образования звезд меньших масс. В отличие от массивных объектов время жизни таких звезд составляет миллиарды лет. Внутренних температур и давлений в таких объектах оказывается недостаточно для запуска реакций производства тяжелых элементов, поэтому, как правило, большая часть реакций заканчивается на образовании углерода. Таким образом, в конце своей долгой жизни звезды с малой массой превращаются в белые карлики (объекты, состоящие практически полностью из углерода с небольшой примесью кислорода, азота и, возможно, неона, имеющие радиус в несколько тысяч километров и предельно возможную массу 1,4 массы Солнца – так называемый предел Чандрасекара).

Но если белый карлик находится в двойной системе с обычной звездой, и существует перетекание вещества от



Эволюция звезд в зависимости от их начальной массы. Изображение Credit: NASA/CXC/M.Weiss

этой звезды к белому карлику, то масса последнего растет и в какой-то может превысить предел Чандрасекара, что приведет к коллапсу белого карлика и термоядерному взрыву – вспыхнет сверхновая типа Ia, в процессе взрыва которой будут синтезированы тяжелые элементы. Учитывая преобладание звезд малой массы в современной Вселенной, считается, что железо в основном производится именно этим процессом, а не взрывом массивных звезд, как это было в ранней Вселенной.

Из ядерной физики известно, что элементы тяжелее железа образуются посредством захвата нейтронов затравочными ядрами, если окружающая среда обогащена нейтронами. Такие условия могут возникать при определен-

ных видах взрывов сверхновых. Например, если ядра железа чрезвычайно быстро бомбардируются большим количеством нейтронов, так что не успевают начаться β -распад, то они захватывают больше нейтронов, создавая тяжелые, богатые нейтронами и нестабильные изотопы, которые потом превращаются в новые и более тяжелые элементы. Из-за быстрой бомбардировки этот процесс называется r-процессом. Приблизительно половина всех стабильных изотопов элементов, более тяжелых, чем цинк, производится таким образом.

Другая часть изотопов тяжелых элементов создается в так называемом s-процессе, где более медленная нейтронная бомбардировка (в течение

более длительного периода времени, чем процесс β -распада) приводит к последовательному накоплению тяжелых элементов. Этот процесс происходит в пульсирующих внешних оболочках некоторых звезд – красных гигантов.

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗОВАВШИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШЕК СВЕРХНОВЫХ

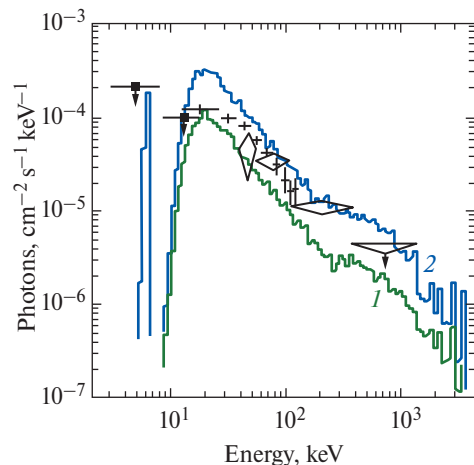
Как уже было сказано выше, взрыв сверхновой – финальная стадия существования звезды, при которой ее ядро коллапсирует под действием гравитации, а выделившаяся энергия выбрасывает внешнюю оболочку в пространство вместе с образовавшимися в ходе жизни звезды химическими элементами.

Чтобы убедиться в том, что мы правильно понимаем процессы, происходящих в недрах звезд, нужны экспериментальные данные об излучении, которое регистрируется от распадов различных радиоактивных элементов, образующихся во время вспышек сверхновых.

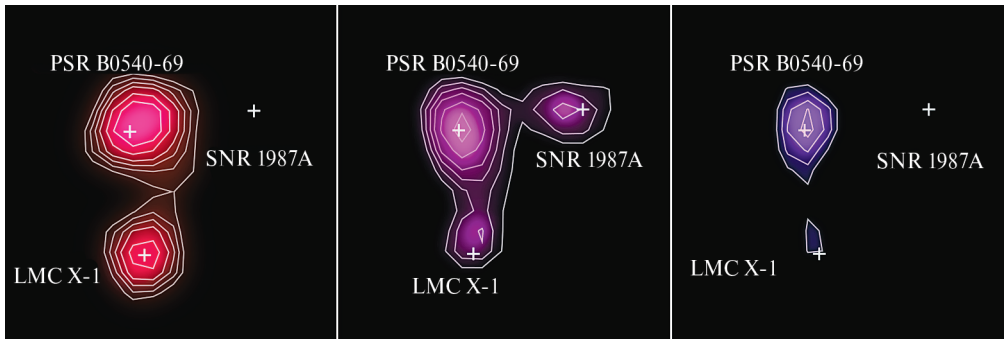
В частности, впервые распад радиоактивного никеля ^{56}Ni в кобальт ^{56}Co и далее в железо ^{56}Fe был зарегистрирован в сверхновой SN1987A, которая вспыхнула в ближайшей к нам галактике Большое Магелланово Облако в феврале 1987 г. Как показывали теоретические расчеты, гамма-излучение, обусловленное распадом радиоактив-

ного кобальта ^{56}Co , образовавшегося во время взрыва, должно выходить наружу сквозь расширяющуюся оболочку примерно через полгода после взрыва. Наблюдения, проведенные в августе 1987 г. советской обсерваторией РЕНТГЕН, установленной на модуле КВАНТ орбитальной станции МИР, позволили впервые зарегистрировать жесткое рентгеновское излучение из области этой сверхновой, с высокой точностью измерить ее спектр и получить оценки на количество произведенного во время вспышки сверхновой радиоактивного никеля и кобальта.

Спустя 25 лет сверхновая SN1987A вновь подарила российским ученым открытие. На этот раз от остатка вспышки удалось зарегистрировать излучение в линиях распада радиоактивного титана ^{44}Ti , имеющего период полураспада ~85 лет. Измерения были проведены с помощью орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ (ЕКА), позволившей зарегистрировать жесткое рентгеновское излучение от этого остатка в линиях радиоактивного распада ^{44}Ti на энергиях 67,9 и 78,4 килоэлектрон-вольт (кэВ). Это было первое прямое доказательство образования титана в момент взрыва этой уникальной сверхновой. Измеренные потоки излучения на этих



Спектр Сверхновой SN1987A, измеренный обсерваторией РЕНТГЕН (крестики, ромбы). Гистограммами показаны результаты теоретических предсказаний спектра источника через 180 (синяя) и 240 (зеленая) дней после вспышки. Из работы Сюняева Р., Каниовского А., Ефремова В. и др., *Nature*, V. 330, 227 (1987)



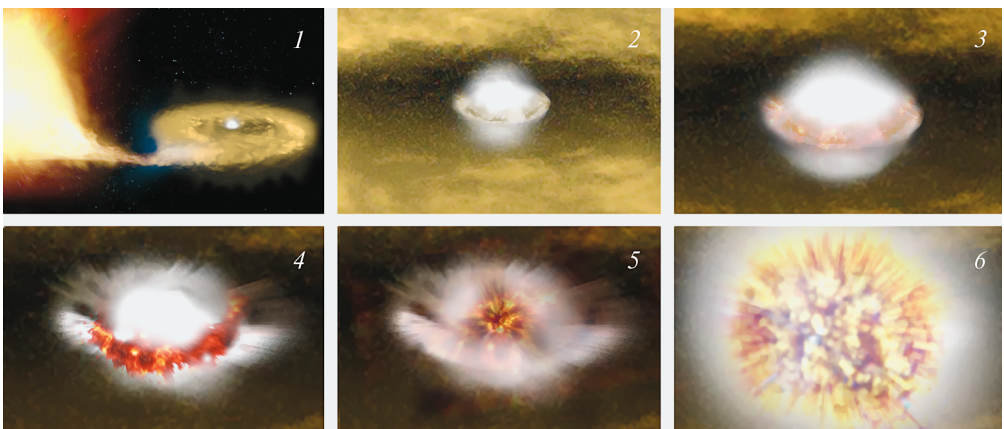
Изображения участка неба, содержащего остаток вспышки Сверхновой SN1987A, по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ в разных энергетических диапазонах. Средняя панель соответствует диапазону энергий 65–82 кэВ, включающего обе линии распада радиоактивного титана ^{44}Ti . Из работы Гребенева С.А., Лутовинова А.А., Цыганкова С.С., Винклера К., *Nature*, V. 490, 373 (2012) и сайта ESA

энергиях соответствуют массе синтезированного ^{44}Ti около 0,0002 массы Солнца, что вполне достаточно для объяснения ее оптического и ультрафиолетового излучения, наблюдавшегося в течение последних 20 лет.

Сверхновая 1987A относится к так называемым сверхновым II типа, которые образуются в результате коллапса массивной звезды. Такие звезды к моменту вспышки прошли длительную эволюцию, и в их недрах в результате

реакций термоядерного горения образовались многие тяжелые элементы. Для сверхновых типа Ia ситуация была не столь очевидной вплоть до последнего времени.

Как уже отмечалось выше, сверхновые типа Ia являются результатом термоядерного взрыва углеродно-кислородного белого карлика. После взрыва происходит та же цепочка распадов, что и описанная выше при коллапсе массивной звезды: радиоактивный

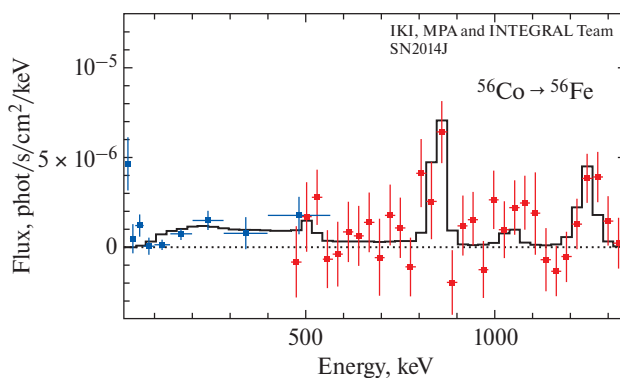
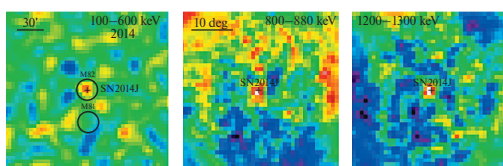


Последовательность событий при взрыве сверхновой SN2014J типа Ia. Во время аккреции вещества белым карликом в двойной системе вокруг его экватора накапливается вещество, что приводит к термоядерному взрыву. Изображение ESA/ATG medialab

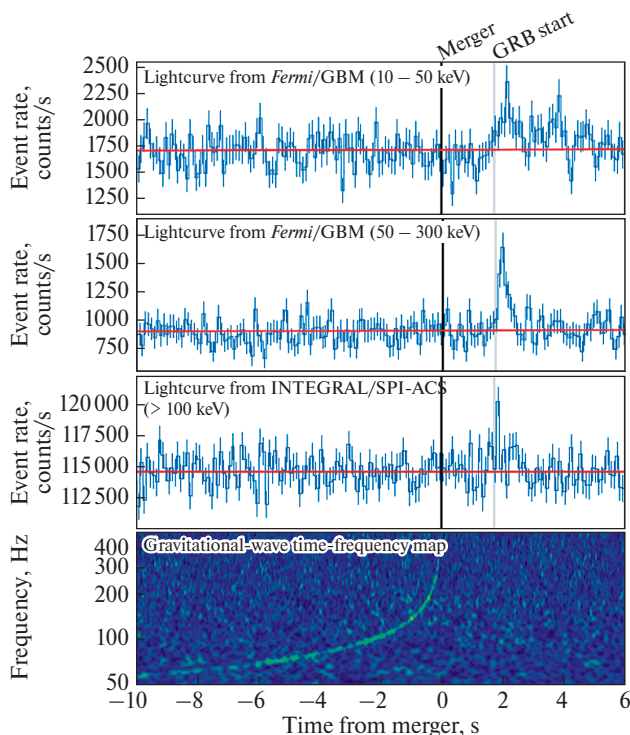
Наблюдения обсерватории
ИНТЕГРАЛ сверхновой SN2014J.
Изображение ИКИ РАН /
Е. Чуразов, см. также
Чуразов Е., Сюняев Р.,
Изерн Дж. и др.
Nature, V. 512, 406 (2014)

никель ^{56}Ni превращает-
ся в кобальт ^{56}Co , который
затем распадается в желе-
зо, в ходе чего рождают-
ся многочисленные гам-
ма-фотоны. За всю косми-
ческую эру, то есть более
полувека, не произошло
ни одного взрыва сверх-
новой типа Ia ни в одной
из ближайших к нам га-
лактик, поэтому выше-
сказанное оставалось на
уровне теоретических рас-
четов и предположений.

Регистрация гравитационно-
волнового события
GW170817 (нижняя панель)
и одновременного короткого
гамма-всплеска (два
верхних графика отражают
данные космической гамма-
обсерватории "Ферми",
третий сверху график –
данные обсерватории
ИНТЕГРАЛ). Черная линия –
момент слияния нейтронных
звезд, серая – момент
регистрации гамма-
излучения. По горизонтали
отложено время от момента
слияния в секундах.
Из работ Савченко В., и др.
The Astrophysical Journal Letters,
V. 848, L15 (2017) и Эбботт Б.П.
и др. *The Astrophysical Journal Letters*,
V. 848, L13 (2017)



Ситуация изменилась в январе 2014 г., когда в га-
лактике M82 вспыхнула сверхновая SN2014J, относя-
щаяся к типу Ia. Эта галактика расположена достаточ-
но близко (11 млн световых лет), чтобы обсерватория
ИНТЕГРАЛ смогла впервые напрямую обнаружить
излучение от сверхновой и полностью подтвердить



теоретическую концепцию сверхновых типа Ia как гигантских термоядерных взрывов. В частности, с хорошей степенью достоверности было зарегистрировано излучение в двух наиболее мощных гамма-линиях распада радиоактивного кобальта ^{56}Co на энергиях 847 и 1237 кэВ, а также континуум на энергии в сотни кэВ. Измеренный поток излучения свидетельствует, что в процессе взрыва было синтезировано около 0,6 массы Солнца радиоактивного никеля.

СЛИЯНИЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД – КЛЮЧЕВОЙ МЕХАНИЗМ ОБОГАЩЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ ТЯЖЕЛЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Как было сказано, нейтронные звезды представляют собой конечный этап эволюции массивных звезд. Они чрезвычайно компактны и имеют высокую плотность, в несколько раз выше ядерной. Точное уравнение состояния ве-

щества при таких экстремальных условиях неизвестно, при этом считается, что от дальнейшего коллапса нейтронная звезда удерживается давлением вырожденного газа нейтронов.

Если в течение эволюции массивной двойной системы и последовательных двух вспышек сверхновых система не разрушится, то могут образоваться две нейтронные звезды, которые будут вращаться друг вокруг друга. При этом они будут постепенно сближаться, теряя энергию в виде излучающихся гравитационных волн. Такая система может существовать сотни миллионов лет, пока звезды не сблизятся настолько, что под действием сил притяжения и приливных сил они не начнут разрушаться и не произойдет слияние, которое будет сопровождаться вспышкой гравитационно-волнового излучения и коротким гамма-всплеском. При этом во время слияния нейтронных звезд может образоваться значительное количество тяжелых элементов.

Слияние двух нейтронных звезд. Рисунок NASA/Swift/Dana Berry



Впервые такое событие было зарегистрировано 17 августа 2017 года, когда гравитационно-волновой сигнал был сначала обнаружен установками LIGO (США) и *Virgo* (Италия), а через ~1,7 секунды после этого орбитальные обсерватории ИНТЕГРАЛ (ЕКА) и “Ферми” (НАСА) наблюдали короткий гамма-всплеск. Практически сразу же стало понятно, что оба сигнала являются разными проявлениями одного и того же события, связанного со столкновением двух нейтронных звезд. Менее чем через 11 часов после этого оптические телескопы обнаружили новый объект на краю близкой к нам галактики NGC4993 и установили, что событие слияния нейтронных звезд произошло на расстоянии примерно 130 млн световых лет от нас.

Теоретические расчеты показывали, что во время такого слияния небольшая часть вещества нейтронной звезды будет выброшена в окружающее пространство, а благодаря огромной концентрации нейтронов в этом

облаке выброшенного вещества будет происходить синтез тяжелых элементов. Проведенные наблюдения блестяще подтвердили эту гипотезу, позволили диагностировать наличие тяжелых элементов в остатках от слияния. В частности, наблюдения, сделанные крупнейшими обсерваториями мира, такими как *Gemini* (США), VLT (Европа, Чили) и космическим телескопом им. Хаббла (HST, NASA), показали наличие недавно синтезированного материала, включая золото и платину, а также ряд радиоактивных элементов, таких как уран. Таким образом был получен ответ на загадку многих десятилетий – как в космосе производится около половины всех элементов тяжелее железа.

Видеозапись лекции с русским синхронным переводом можно увидеть на сайте ЮНЕСКО. В обзоре используются материалы и иллюстрации с сайтов НАСА, ЕКА, LIGO/Virgo Caltech, ИКИ РАН.

Редакция

Реклама

Издательство предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

Издательство «Наука» готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-залах и на экспозиционных площадках издательства по адресам:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-7735
Подробная информация на сайте www.naukapublishers.ru/history/partnership

Информация

Местность, сформированная ледниками

КА “Марс-Экспресс” (ESA) получил снимки области Столовых гор Дейтеронил (Deuteronilus Mensae), лежащей на границе между северными равнинами и южной горной системой.

Два полушария Марса резко различаются. Гладкие и более молодые равнины северного полушария лежат на 3 километра ниже древней, покрытой кратерами гористой местности южного полушария. Переходная область между ними весьма изрезана и изобилует интересными геологическими особенностями и формами рельефа. Прекрасным примером такой области являются Столовые горы Дейтеронил, изображения которых получила стереокамера высокого разрешения HRSC КА “Марс-Экспресс”.



Снимок Столовых гор Дейтеронил, полученный камерой высокого разрешения HRSC КА “Марс-Экспресс” (ESA) 25 февраля 2018 года. Разрешение оригинального изображения – 13 метров на пиксель. Центр кадра имеет координаты 44° северной широты, 25,5° восточной долготы. Север справа. Изображение ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO

Область, представленная на снимке, демонстрирует многочисленные следы интенсивной и длительной эрозии: многочисленные утесы, каньоны, борозды и столовые горы (возвышенности с плоской вершиной и крутыми склонами). Такой ландшафт образуется под действием потоков (рек, селей, ледников), взрезающих уже существующий рельеф и прорывающих в нем сеть извилистых каналов. В области Столовых гор Дейтеронил основной движущей силой в изменении ландшафта стали ледники, медленное течение которых продолжалось на протяжении нескольких марсианских эпох.

Ледники “пропахали” в плоскогорье глубокие долины, оставив только отдельные столовые горы – участки, сложенные более прочным материалом. Гладкие отложения, покрывающие дно долин, говорят о том, что потоки были медленными и состояли скорее из замерзшей грязи: смеси водяного льда и каменных обломков.

Изучение это региона с помощью КА MRO (NASA) показало, что содержание льда в грунте в некоторых местах достигает 90%. Это говорит о том, что эта область в целом может представлять собой остатки старого регионального ледяного щита. Когда-то он покрывал и плато, и северные равнины. Потом марсианский климат изменился, и лед стал смещаться и испаряться, медленно открывая каменную подстилающую поверхность.

По информации ESA