

ВЛАДИМИР СУРДИН, кандидат физико-математических наук

Как рождаются

Мы уже многое понимаем в механизмах развития природных объектов, но загадка рождения большинства из них до сих пор не решена. Биологи размышляют над возникновением новых видов и самой жизни, геологи спорят о генезисе нефти, минералов и самих планет, астрономы же бьются над происхождением звезд, галактик и самой Вселенной. Впрочем, кое-что проясняется — звезды приоткрывают тайны своего возникновения.

звезды

Известно, что в недрах звезд действуют природные термоядерные реакторы, синтезирующие из легких химических элементов более тяжелые. Например, из водорода образуется гелий, из гелия — углерод и т. д. Протекание этих реакций в недрах Солнца сегодня прямо регистрируется на Земле (а точнее — под землей) нейтринными детекторами. Установлено также, сколько времени живут звезды и как заканчивается их жизнь: чем массивнее звезда, тем ярче она светит и быстрее сжигает свое ядерное горючее. Если звезды типа Солнца живут около 10 миллиардов лет, то гиганты, которые в 10 раз массивнее, полностью сгорают всего за 25 миллионов лет. А вот карлики с массой в половину солнечной должны жить почти 100 миллиардов лет — много больше нынешнего возраста Вселенной.

В конце жизни звезда обычно сбрасывает с себя верхний слой вещества. Массивные светила делают это взрывным образом, становясь сверхновыми, а маломассивные — спокойно, окутывая себя медленно расширяющейся планетарной туманностью. Но в любом случае в конце эволюции от звезды остаются разлетающееся газовое облако и плотный компактный объект — белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра.

Отдельные детали в этой картине могут измениться, но в целом ход жизни звезды надежно прослеживается, в том числе с помощью компьютерных моделей. «Дайте мне звезду, и я предскажу ее судьбу!» — может воскликнуть астроном. Легко сказать — «дайте!» Но как именно рождаются звезды? Понятно, что они формируются при сжатии облаков газа, заполняющих межзвездное пространство, однако подробности процессов, приводящих к рождению звезд разных типов, до сих пор во многом остаются загадочными.

В ТЕМНОМ ОБЛАКЕ

Вот как представляется сегодня процесс рождения звезды. В межзвездном облаке идет непрерывная борьба двух тенденций — сжатия и расширения. Сжатие облака способствуют его собственная гравитация и внешние силы (например, взрывы соседних звезд), а расширению — давление газа и магнитных полей внутри облака. Обычно эта борьба заканчивается победой сил сжатия. Дело в том, что звездный свет не проникает снаружи в непрозрачное облако и не нагревает его, а инфракрасное излучение молекул и пыли легко выходит из облака и уносит тепло. В результате этого «антипарникового» эффекта в наиболее плотной части облака температура опускается почти до -270°C , и давление газа ►

падает настолько, что равновесие сил неминуемо нарушается, и эта область начинает безудержно сжиматься. Если масса сжимающегося газа невелика, то образуется одна звезда, а если газа много, то в ходе его сжатия и фрагментации рождается группа тел — звездное скопление.

В процессе формирования каждая звезда проходит через два характерных этапа — быстрого и медленного сжатия протозвезды. Быстрое сжатие — это практически свободное падение вещества протозвезды к ее центру. На этом этапе безраздельно царствует гравитация. И хотя при сжатии газ должен был бы нагреваться, его температура почти не меняется: избыток тепла уходит в виде инфракрасного излучения, для которого рыхлая протозвезда совершенно прозрачна. Так проходит около 100 тысяч лет, в ходе которых размер протозвезды сокращается в 100 тысяч раз, а плотность вещества возрастает в миллионы миллиардов раз — от почти полного вакуума до плотности комнатного воздуха.

И вот наступает момент, когда уплотнившаяся протозвезда становится непрозрачной для собственного инфракрасного излучения. Отвод тепла резко снижается, а продолжающееся сжатие газа приводит к его быстрому нагреву, давление возрастает и уравнивает силу тяжести. Теперь протозвезда может сжиматься не быстрее, чем позволяет медленное охлаждение с поверхности. Эта фаза длится несколько десятков миллионов лет, но за это время размер будущей звезды уменьшается только раз в десять, а вещество сжимается примерно до плотности воды. Многих удивит, что средняя плотность Солнца составляет $1,4 \text{ г/см}^3$ (ровно как плотность воды в Мертвом море), а в центре она приближается к 100 г/см^3 , но, несмотря на это, солнечное вещество все рав-



Комплекс светлых и темных туманностей RCW 108, находящийся на расстоянии около 4000 световых лет в южном созвездии Жертвенник

но остается газом, точнее — плазмой. Когда температура в недрах протозвезды достигает нескольких миллионов градусов, начинаются термоядерные реакции: водород превращается в гелий с выделением тепла, которое компенсирует его потерю с поверхности. Сжатие прекращается — протозвезда стала звездой.

Нарисованная здесь картина — это, конечно, всего лишь голая схема. Вдохнуть в нее жизнь, уточнить детали могут лишь наблюдения за реально формирующимися звездами. Но изучать рождение звезд трудно уже хотя бы из-за того, что в нашу эпоху запасы межзвездного вещества в Галактике заметно истощились. Ведь они лишь частично восполняются тем, что выбрасывают в пространство

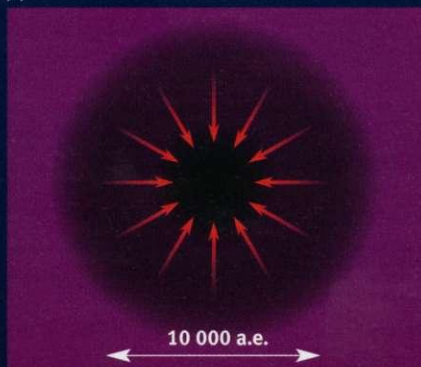
умирающие звезды. Новые светила нынче рождаются редко. За год во всей нашей огромной Галактике появляется в среднем лишь несколько звезд. Большинство областей звездообразования находятся на значительном удалении от нас и с трудом поддаются изучению. К тому же формирование звезд происходит в глубине холодных и совершенно непрозрачных для света газопылевых облаков. На 98% эти облака состоят из водорода (в виде отдельных атомов и молекул H_2) и гелия. Эти газы практически не мешают прохождению света. Но остальные 2% массы, приходящиеся на более тяжелые элементы, образуют крохотные твердые частицы размером в сотые доли микрона — пылинки, которые активно поглощают и

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ

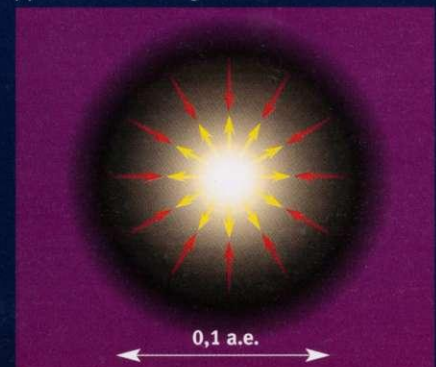
Темное межзвездное облако
Начало процесса



Быстрое сжатие плотного ядра
Длительность ~100 тыс. лет



Медленное сжатие
Длительность ~50 млн лет



рассеивают излучение. Увидеть за этим «смогом», как формируется звезда, очень сложно.

Наиболее интересные результаты в этой области дают инфракрасные телескопы и радиотелескопы самого коротковолнового диапазона — субмиллиметрового. Принимаемое ими излучение проникает сквозь пылевую завесу, поскольку его длина волны больше размеров пылинок. Но, к сожалению, оно поглощается в земной атмосфере. Поэтому инструменты приходится устанавливать на борту самолетов, поднимающихся в стратосферу, а еще лучше — на спутниках, работающих вне атмосферы. Впрочем, и на Земле удастся найти места высоко в горах, где разреженный сухой воздух не сильно мешает наблюдениям. В этом отношении очень хороши чилийские Анды. Именно там, в Южной Европейской обсерватории (Ла-Силья, Чили), установлен один из лучших наземных приборов для исследования формирующихся звезд — комплекс инфракрасных спектрографов и камер, смонтированный на 3,6-метровом телескопе NTT (New Technology Telescope — Телескоп новой технологии).

С помощью этого инструмента испанский астроном Фернандо Комерон (Fernando Comeron) получил изображение крупного комплекса звездообразования RCW 108. Оно составлено из 600 отдельных кадров и покрывает на небе площадь, равную половине лунного диска. В научном отношении эта картина интересна тем, что подтверждает теоретическую модель «выдувания» молодых звезд из облака — так называемую «модель шампанского». Темное облако, силуэт которого ясно виден на фоне Млечного Пути, играет здесь роль непроницаемой бутылки, внутри которой новорожденные звезды разогревают окружающий газ и поднимают его давление. В кон-



Германо-американская стратосферная обсерватория SOFIA на базе самолета «Боинг-747» несет 2,5-метровый телескоп, весьма полезный для исследования протозвезд



Запасы межзвездного вещества в Галактике заметно истощились. За год в ней рождается всего несколько звезд

це концов, облако не выдерживает, самая тонкая его стенка («пробка») прорывается, и струя горячего газа выстреливает в окружающее пространство. Именно этот момент мы и наблюдаем на фотографии. Яркая туманность в центре облака — это горячий газ, который вырвался со скоростью около 10 км/с и устремился в направлении Солнца. (Можно не беспокоиться — Солнечной системы он никогда не достигнет.)

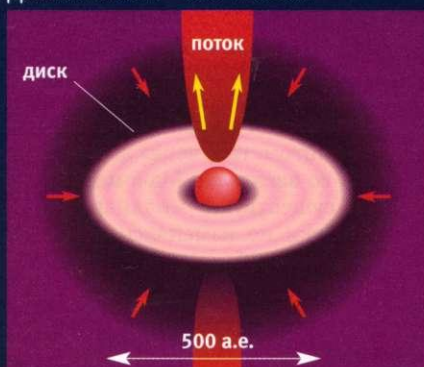
Если в группе молодых звезд родилось массивное светило, то именно оно начинает «править бал»: его мощное излучение и потоки газа с поверхности (звездный ветер) разогревают окружающее вещество, останавливают его сжатие и выключают процесс формирования новых светил. Как ку-

кушонок в гнезде, массивная звезда старается расчистить пространство вокруг себя. Иногда активность массивных звезд не только останавливает звездообразование, но и приводит к полному распаду новорожденного скопления: вместе с межзвездным газом оно теряет так много массы, что молодые звезды легко преодолевают ослабленное гравитационное поле и покидают свою «колыбель».

ОСТАНОВКА КАРУСЕЛИ

Хотя многие выводы теории звездообразования уже подтверждены наблюдениями, остаются и нерешенные проблемы. Например, неясно, как протозвезды избавляются от «лишнего вращения». В силу случайного, турбулентного характера движения▶

Протозвезда
Длительность ~100 тыс. лет



Очень молодая звезда
Длительность ~50 млн лет



Молодая звезда
Конец процесса





Часть вещества остается на периферии рождающегося светила в виде тонкого диска. В нем формируются планеты, их спутники, астероиды и ядра комет

W.M. KECK OBSERVATORY

Образование протопланетного диска — один из механизмов, избавляющих протозвезду от избыточного вращения

газа любая часть межзвездного облака медленно вращается. Когда она сжимается, стремясь стать звездой, то по закону сохранения момента импульса вращение ускоряется — все помят, как фигуристы ускоряют свое вращение, прижимая руки к телу. Если бы не было механизмов торможения, центробежная сила вообще не позволила бы звезде родиться.

Один из таких механизмов обеспечивает газовое трение: внутренние, быстро вращающиеся области протозвезды трутся о внешние, передавая им энергию своего движения. Сами они при этом тормозятся, получая возможность сжиматься дальше и стать звездой, а внешние области, наоборот, раскручиваются и остаются вращаться в виде тонкого диска, из которого позже образуются планеты. Жизнь этого протопланетного диска сама по себе очень интересна и слабо изучена. Например, на некотором эта-

пе эволюции диска вдоль его оси вращения в обе стороны могут «выстреливаться» тонкие струи газа.

Наблюдения показывают, что протопланетные диски часто встречаются у формирующихся звезд. Да и наличие «готовых» планетных систем, которых в окрестностях Солнца уже открыто более двух сотен, подтверждает идею о перераспределении углового момента между звездой и веществом будущих планет. Однако природа никогда не ограничивается использованием одной, даже самой хорошей, идеи. Как говорят физики, если в природе что-то не запрещено, то оно обязательно происходит. А не запрещено быстро вращающейся протозвезде в некоторый момент разделиться пополам, превратив момент импульса одного тела во взаимное орбитальное движение двух тел. Но это означает, что вместо одной звезды родится две? Именно так! Уже давно астрономы за-

метили, что почти половина всех звезд предпочитает жить парами. Наше Солнце — одиночная звезда, но это, скорее, исключение из правил. Если внимательно присмотреться, то кроме большого количества двойных звезд обнаруживаются и тройные, и четырехкратные, и даже 6-кратные (такова, например, звезда Кастор, альфа Близнецов). Похоже, что последовательное деление протозвезд при сжатии эффективно помогает им бороться с центробежными силами и приводит к рождению миниатюрных звездных коллективов.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГИГАНТОВ

Биологу трудно изучать жизнь баобаба — для этого надо прожить тысячи лет. Гораздо проще изучить муху-дрозофилу: сегодня родилась, через неделю дала потомство, через две умерла. То же и со звездами. Маломассивные звезды существуют миллиарды лет, практически не изменяясь, а звезды большой массы быстро формируются, недолго живут и ярко умирают. Астрономы любят изучать массивные звезды. Но насколько массивной может быть звезда? Этот вопрос не дает аст-

рономам покоя на протяжении многих десятилетий. Если мы правильно понимаем физику рождения и жизни звезды, слишком массивными звезды быть не могут. Правда, история астрономии уже столетия доказывает, что физику эту мы как раз понимаем не совсем правильно.

С ростом массы звезды быстро возрастает температура ее недр и увеличивается давление излучения на внешние слои. Это должно приводить к потере устойчивости, возникновению растущих колебаний звезды и сбросу ее оболочки. В 1959 году Мартин Шварцшильд и его коллеги теоретически оценили предельную массу звезды в 60 масс Солнца, что уже тогда противоречило наблюдениям, поскольку известная с 1922 года двойная звезда Пласкетта имеет полную массу около 150 солнечных, а значит, ее главный компонент как минимум в 75 раз массивнее Солнца.

Теорию стали улучшать: учли ряд деталей, и теоретический порог массы повысился до 100 солнечных. Но астрономы-наблюдатели тоже не сидели без дела. Они определили, что звезда Р Лебеда по светимости почти в миллион раз превосходит Солнце. Такую звезду давление собственного света разорвало бы на части, если бы ее масса была менее 80—100 солнечных — на самой грани допустимого. Теоретики напряглись. А наблюдатели между тем обнаружили, что существуют звезды с еще большей светимостью. Например, мощность излучения эфы Киля (η Carinae), находящейся в туманности NGC 3372, в 5 миллионов раз превосходит солнечную. Масса такого «прожектора» не может быть меньше 200 масс Солнца. У теоретиков опустились руки: им-то никак не удавалось «сделать» звезду с массой более 150 солнечных.

А наблюдатели тем временем не унимались: в ядре небольшого звездного скопления Пишмиш 24 (Pismis 24), удаленного от нас примерно на 8000 световых лет, они обнаружили светило, судя по мощности его излучения, превосходящее Солнце по массе раз в 200, а то и 300! Тут уже теоретики не выдержали: «Не верим!» — и заставили наблюдателей внимательнее присмотреться к звезде-тяжеловесу. Международная группа астрономов под руководством Х.М. Апелланиса (J.M. Apellániz, Институт астрофизики Андалусии, Испания), используя 6,5-метровый телескоп «Магеллан» и космический телескоп «Хаббл», обнаружила, что звезда-то двойная! Рядом друг с другом, обращаясь вокруг общего центра масс, живут две упитанные звезды, каждая примерно в 100 раз массивнее Солнца. В этом же скоплении нашлась еще одна столь же массивная звезда. Само по себе это

НА ЗАРЕ НОВОЙ ФИЗИКИ

Первая правильная мысль о происхождении звезд принадлежит еще Ньютону. Едва поняв всеобъемлющий характер гравитации, он стал размышлять о ее роли в развитии небесных тел. В письме преподобному Ричарду Бентли от 10 декабря 1692 года Ньютон пишет вот что: «Мне кажется, что если бы все вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было бы равномерно рассеяно в небесных глубинах, и если бы каждая частица имела врожденное тяготение ко всем остальным, и если бы, наконец, пространство, в котором была бы рассеяна эта материя, было бы конечным, вещество снаружи этого пространства благодаря указанному тяготению влеклось бы ко всему веществу внутри и вследствие этого упало бы в середину всего пространства и образовало бы там одну огромную сферическую массу. Однако если бы это вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не могло бы объединиться в одну массу, но часть его сгушалась бы тут, а другая там, образуя бесконечное число огромных масс, разбросанных на огромных расстояниях друг от друга по всему этому бесконечному пространству. Именно так могли образоваться и Солнце, и неподвижные звезды». В действительности даже в ограниченном пространстве межзвездного облака гравитация не может собрать все вещество в одном месте. Космос неспокоен: сквозь облако в разных направлениях движутся звуковые и ударные волны, сжимая и разрежая отдельные участки газа. Гравитация лишь подхватывает и доводит до конца сжатие отдельных фрагментов облака. Это понял и довел идею Ньютона до уровня строгой математической теории другой английский физик, Джеймс Джинс, двести лет спустя.

Звездный ветер от молодого скопления Pismis 24 (вверху) сдувает газовые облака туманности NGC 6357. В вершинах характерных столбов находятся плотные прото-звезды, способные устоять против звездного ветра



NASA/ESA, J.M. APPELLANIZ

крайне любопытно: три медведя в одной берлоге! Таких массивных звезд в Галактике всего не более дюжины, а тут сразу три в одном месте. Но это дело случая, а главное здесь в том, что теория внутреннего строения звезд выдержала проверку — массы звезд не превосходят 150 масс Солнца (оказалось, что и массу эти Киля сначала немного преувеличили — она тоже не превышает 150 масс Солнца).

Казалось бы, все в порядке и астрономы могут спать спокойно (разумеется, днем, поскольку ночью они работают). Но нет — спокойно могут спать только специалисты по внутреннему строению звезд. А те, кто изучает формирование звезд, заснуть не могут. Дело в том, что протозвезда по мере увеличения массы быстро наращивает мощность излучения и начинает активно отталкивать от себя новые порции вещества. Расчеты показывают, что звезды с массой более 15—20 масс Солнца вообще рождаться не могут. Но они есть! Может быть, эти тяжеловесы образуются позже, например, при слипании нескольких молодых звезд? Пока неясно. Над этой проблемой еще предстоит поработать.

КОПЕРНИК БЫЛ НЕ ПРАВ?

Тогда как массивные звезды за счет своего мощного излучения и звездного ветра активно избавляются от окружающего их вещества, звезды умеренной массы пускают это вещество в дело — из него формируются планетные системы. Ныне уже нет сомнений, что рождение большинства звезд сопровождается рождением планет. Означает ли это, что Солнце — типичная звезда, а Солнечная система — типичная система планет?

В эпоху Коперника астрономы низвели Землю с «Олимпа Вселенной» до роли одной из множества планет. И каждый последующий век лишь подтверждал нашу заурядность, которую даже стали называть принципом Коперника: Солнце оказалось заурядной звездой, каких миллиарды, а наш звездный дом — Галактика — ничем, казалось бы, не выделялся среди миллионов других «островных вселенных».

Принцип Коперника подтверждался даже в мелочах: открытый на Земле закон тяготения Ньютона оказался применимым ко всем космическим объектам и стал «законом всемирного тяготения»; спектральные исследования доказали, что все небесные тела сложены из знакомых нам на Земле элементов Таблицы Менделеева. Еще несколько десятилетий назад от ученых можно было услышать, что космос единообразен, а то и вовсе однообразен; что большинство звезд —▶

Среди миллиардов звезд почти нет похожих на наше Солнце с его исключительно спокойным «характером»



Наблюдатели прошлых веков принимали туманность Тарантул за звезду и присвоили ей номер 30 в созвездии Золотой Рыбы (30 Doradus). Теперь ее обозначение — NGC 2070

ЧТО СКРЫВАЕТ ТАРАНТУЛ?

Туманность Тарантул, расположенная в соседней галактике Большое Магелланово Облако, удалена от нас на 170 тысяч световых лет, но сияет так ярко, что различима даже невооруженным глазом. Ее поперечник составляет почти 1000 световых лет. Более крупных очагов звездообразования нет ни в нашей, ни в ближайших галактиках.

В центре снимка, полученного 8-метровым телескопом VLT Европейской Южной обсерватории в Чили, расположено скопление молодых, массивных и очень горячих звезд Рэдклиф 136 (R 136), чье мощное излучение и сильные звездные ветры как раз и заставляют туманность сиять. Возраст этого скопления всего 2—3 миллиона лет, поэтому его наиболее массивные звезды еще живы. А таких звезд там более 200, причем массы некоторых превышают 50 масс Солнца; такие тяжеловесы формируются крайне редко.

Правее и выше центра на этом фото видно другое скопление ярких массивных звезд — Ходж 301. Его возраст около 20 миллионов лет. Поэтому наиболее массивные звезды в нем уже закончили свой жизненный путь и взорвались как сверхновые, выбросив с огромной скоростью вещество и создав вокруг скопления сеть запутанных волокон. Вскоре там ожидаются новые взрывы, так как в скоплении Ходж 301 наблюдаются три красных сверхгиганта, которые в течение ближайших трех миллионов лет тоже закончат свою жизнь гигантским фейерверком.

В то время как одни звезды умирают в этом «космическом пауке», другие там только рождаются. Множество темных облаков, легко различимых на светлом фоне, указывает нам, где происходят охлаждение и сжатие газа, готового дать жизнь следующим поколениям звезд. Фактически Тарантул — это гигантский инкубатор, где рождаются звезды всевозможных масс, не только тяжеловесы, но и такие, как Солнце (хотя нам издали видны только гиганты). В некоторых местах этого облака происходит удивительный процесс повторного, стимулированного звездообразования: мощное излучение и взрывы массивных звезд порождают ударные волны, которые сжимают окружающий газ, создавая тем самым условия для формирования звезд следующего поколения.

ОБМАНЧИВАЯ ПРОСТОТА

Базовая теория формирования и эволюции звезд была создана в 1920-е годы в основном усилиями двух выдающихся английских физиков — Джеймса Джинса и Артура Эддингтона. Были получены изящные уравнения, описывающие все основные характеристики самосветящихся газовых шаров. Чрезвычайно воодушевленный результатами своих исследований — прежде всего их наглядностью и простотой, — Джинс писал: «...для нас ясно, почему все звезды имеют очень сходный вес; это потому, что все они образованы одинаковым процессом. Они, пожалуй, похожи на фабричные изделия, сделанные одной и той же машиной». Более осторожный Эддингтон практически соглашался с ним: «Разумно надеяться, что в не слишком отдаленном будущем мы сможем понять такую простую вещь, как звезда». Правда, один из старших товарищей заметил на это Эддингтону: «Если на вас посмотреть с расстояния нескольких световых лет, то и вы показались бы чрезвычайно простым». Жизнь доказала справедливость этой реплики. В 1960 году известный исследователь звезд американский астроном Мартин Шварцшильд писал: «Чем больше мы познаем действительное состояние такого сложного физического образования, каким является звезда, тем более запутанным оно нам представляется».

копии нашего Солнца, что рядом с каждой из них наверняка найдется планета, похожая на Землю, а на ней, глядишь, — и братья по разуму... Но астрономы все внимательнее вглядывались в окружающий космос, и он казался им, как говорила Алиса, «все страньше и страньше».

Выяснилось, что среди миллиардов звезд почти невозможно найти светило, похожее на Солнце и имеющее столь же спокойный характер. Наша Галактика среди подобных ей крупных звездных систем также оказалась на редкость «мирной», практически не проявляющей активности: даже расположенная в ее ядре массивная черная дыра ведет себя весьма тихо. Солнце со своими планетами движется в Галактике не абы как, а счастливо избегая мест скопления новорожденных звезд, среди которых немало активных, а значит, опасных для нашей биосферы. Последнее, что долго не удавалось выяснить астрономам, — насколько типична наша планетная система и часто ли у других звезд встречаются планеты, подобные Земле. Найти планеты вблизи иных звезд всегда представлялось задачей невероятно сложной.

Но последнее десятилетие XX века подарило астрономам долгожданное открытие: в 1991—1996 годах были найдены первые планетные системы у звезд разного типа, включая даже нейтронные звезды — радиопульсары. И тут выяснилось, что в большинстве своем экзопланетные системы совершенно не похожи на нашу. В них планеты-гиганты типа Юпитера оккупируют «зону жизни» — область вокруг звезды, где температурные условия на планете позволяют существовать жидкой воде — главному условию развития жизни земного типа. Но на самих газовых гигантах-«юпитерах» жизнь развиваться не может (у них даже нет твердой поверхности), а маленькие планеты земного типа эти гиганты из «зоны жизни» вышибивают. Теперь ясно, что Солнечная система нетипична, а возможно, и уникальна: ее планеты-гиганты, движущиеся по круговым орбитам вне «зоны жизни», позволяют длительное время существовать в этой зоне планетам земного типа, одна из которых, Земля, имеет биосферу. По-видимому, другие планетные системы крайне редко обладают этим качеством. Для тех, кто надеется быстро найти братьев по разуму, это неприятное известие. Но Галактика велика, в ней постоянно рождаются звезды, а значит, и планеты. Вокруг нас миллиарды звезд, окруженных планетами (теперь мы в этом уверены!). Среди них обязательно найдутся копии Земли, а возможно, даже более благоприятные для жизни места. ●

Одна из крупнейших известных областей звездообразования NGC 604, расположенная в галактике Треугольник (M33), содержит более 200 молодых массивных звезд. Видны газовые пузыри, надутые их излучением

NASA, HUBBLE HERITAGE TEAM