

СЕРГЕЙ ПОПОВ, кандидат физико-математических наук, АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВ

Вселенская алхимия

Мы привыкли жить в изменяющемся мире. Меняются модели сотовых телефонов, правительства, климат. Даже Вселенная и то постоянно расширяется. Однако и новые гаджеты, и премьер-министры состоят из одних и тех же элементов, которые мы помним по таблице на стене кабинета химии, но редко задумываемся над тем, как они возникли. На ранних стадиях эволюции во Вселенной не было большинства тех элементов, из которых состоим мы с вами, а в самые первые мгновения ее существования — ни одного из них.

Наша Вселенная родилась очень горячей и сразу начала расширяться и остывать. Высокая плотность и температура делают невозможным существование сколько-нибудь сложных образований. Поэтому в очень молодой Вселенной нет не только привычных нам атомов, не только их ядер, но даже самое простое ядро, водородное, то есть одиночный протон, не может долго существовать. Вещество Вселенной являет собой кипящий «суп» из элементарных частиц и квантов излучения, которые непрерывно превращаются друг в друга согласно знаменитой формуле теории относительности $E = mc^2$.

Чтобы протон мог чувствовать себя «спокойно», Вселенной надо остыть до температуры, когда энергия частиц становится меньше массы протона. Только с этого момента имеет смысл говорить о «химическом составе», и поначалу он более чем прост: это чистый водород. Помимо протонов в плотном веществе присутствуют также электроны и нейтроны, содержание определяется условиями равновесия: при столкновении протонов и электронов рождаются нейтроны, которые потом самопроизвольно распадаются на протоны и электроны, столкновение нейтрона и позитрона (античастица электрона) дает протон. Также в этих реакциях испускаются нейтрино, но они для нас сейчас не важны.

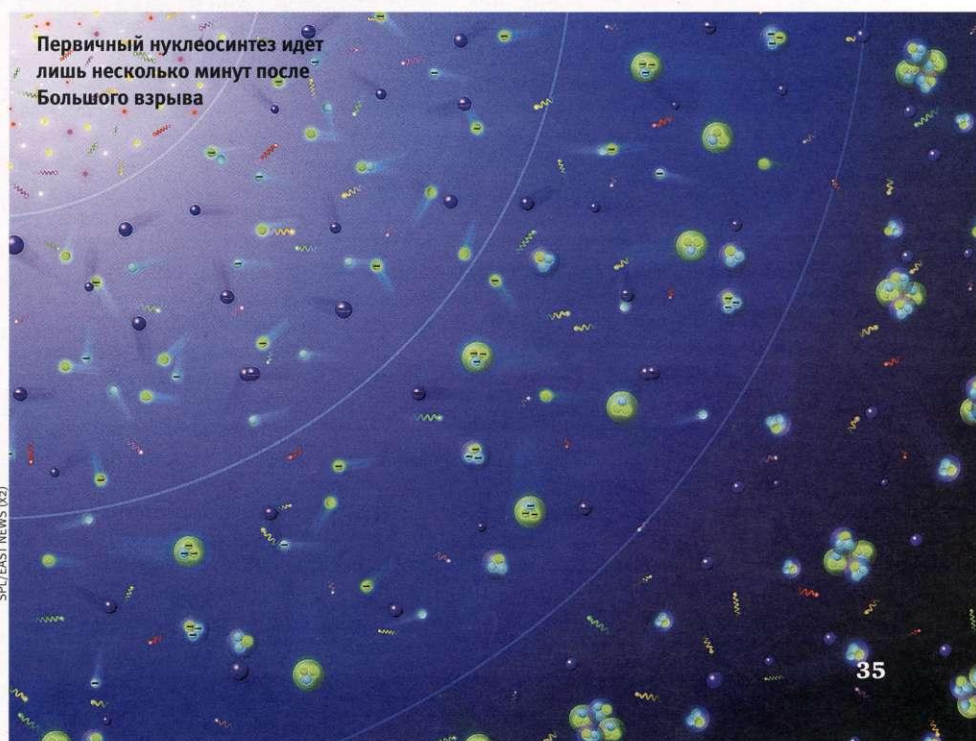
Затем в истории Вселенной наступает эпизод, в котором условия напоминают нынешнее состояние вещества в недрах звезд и водород может превращаться в более тяжелые элементы. Начинается первичный нуклеосинтез — образование тяжелых элементов из более легких. Но длится это недолго — всего несколько минут.

Плотность и температура вещества быстро убывают, что приводит к резкому замедлению ядерных реакций. Поэтому успевают появиться лишь гелий и незначительное количество дейтерия, лития и бериллия.

Все начинается с самой простой реакции: протон объединяется с нейтроном, образуя ядро дейтерия — тяжелого водорода. Получив дейтерий, природа продолжает «играть в конструктор», пока это позволяют плотность и температура. Если дейтерий взаимодействует с протоном, получится гелий-3 — легкий изотоп гелия, содержащий два протона и один нейтрон, а если с нейтроном — тритий, сверхтяжелый изотоп водорода (один протон, два нейтрона). Как видим, в ядерные реакции частицы всегда вступают парами. Все дело в том, что процессы, требующие одновременного

взаимодействия нескольких частиц, крайне маловероятны, подобно тому, как маловероятно случайно встретить в метро сразу двоих бывших одноклассников, которые, не сговариваясь, оказались в одном месте. Нетрудно догадаться, что на следующем этапе гелий-3 присоединяет еще один нейтрон (или тритий — протон), и образуется ядро гелия-4, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, — одно из самых устойчивых во Вселенной.

Это ядро испускается во многих реакциях и даже получило у физиков специальное название — альфа-частица. Во многих случаях ядро гелия рассматривают как частицу, забывая на время о сложном внутреннем строении. Казалось бы, гелий-4 может и дальше присоединять протоны и нейтроны, но не тут-то было! На пути дальнейшего усложнения встают



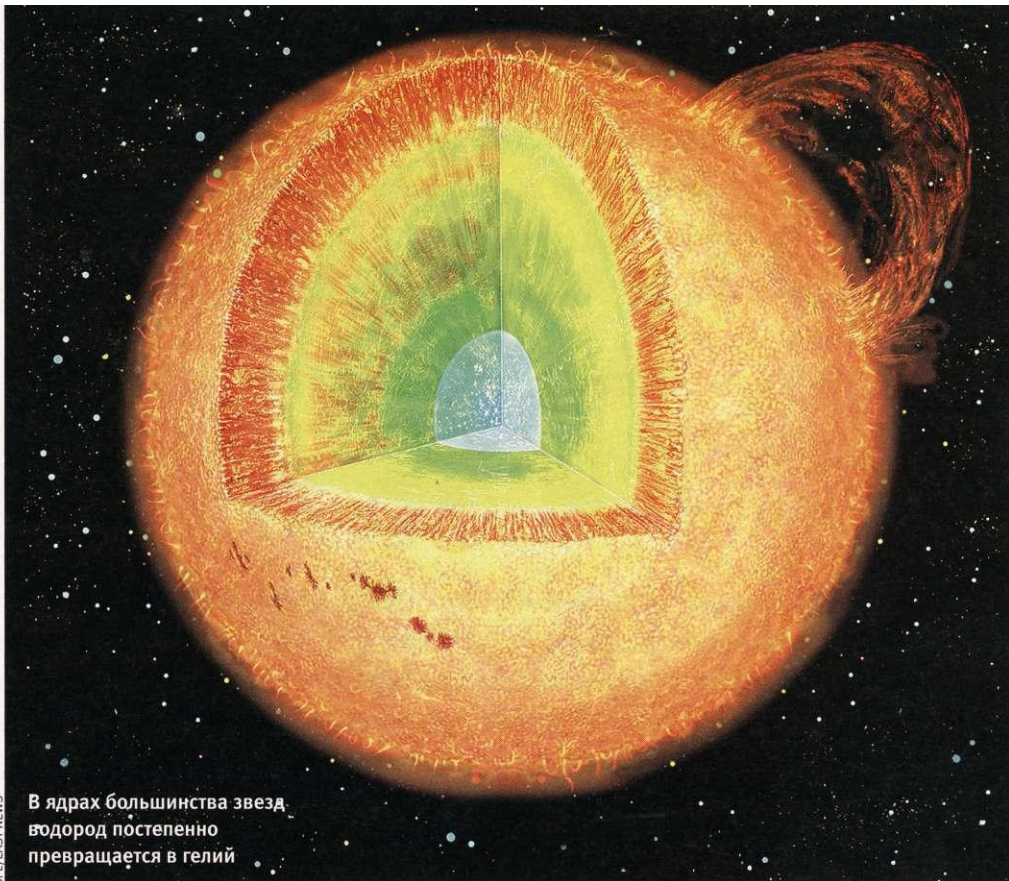
два серьезных препятствия: в природе нет устойчивых ядер с массой 5 и 8 единиц, то есть состоящих из пяти и восьми нуклонов (протонов и нейтронов). В любом сочетании пяти протонов и нейтронов одна из частиц оказывается лишней и выбрасывается из ядра, которое упорно хочет остаться альфа-частицей. И даже если попробовать объединить сразу шесть нуклонов по одной из схем «гелий-3 + тритий», «гелий-3 + гелий-3», «гелий-4 + дейтерий», все равно, как правило, образуется гелий-4, а лишняя пара нуклонов отторгается.

Перепрыгнуть этот барьер можно, только если гелий-4 сольется с ядром трития и гелия-3. Тогда рождаются соответственно литий-7 или бериллий-7. Но эти реакции идут неохотно, поскольку электрический заряд у ядер гелия вдвое больше, чем у водорода. Одинаково заряженные частицы отталкиваются, и, чтобы слить их друг с другом, нужна более высокая энергия столкновения, то есть более высокая температура. Между тем быстрое расширение в первые минуты после Большого взрыва сопровождается падением температуры и плотности вещества — Вселенная перестает быть «сама себе звездой». В итоге лития и бериллия образуется очень мало. Дальше процесс синтеза не идет — на «штурм» второго барьера (неустойчивость ядра из 8 нуклонов) практически нет охотников. А без этого не добраться до углерода — самого важного для существования жизни атома.

Всего несколько минут есть у Вселенной, чтобы поиграть в конструктор из протонов и нейтронов. Когда игра заканчивается, три четверти массы приходится на обычный водород, а четверть — на гелий-4 (поэтому все остальные элементы астрономы называют тяжельми, а то и вовсе «металлами»). Еще остается очень небольшое количество дейтерия, гелия-3 и лития (тритий и бериллий-7 неустойчивы и вскоре распадаются). Определяя их содержание, можно получить очень важную информацию о первых минутах жизни Вселенной, но из таких материалов никакой алхимик не сделает не то что гомункулуса, но и камень (даже не философский, а самый обыкновенный). Но мы-то ведь существуем! И Земля есть. Значит, должны быть в природе какие-то тигли, в которых образуются и углерод, и кислород, и кремний. Надо только немного подождать — каких-нибудь несколько десятков миллионов лет...

ЗВЕЗДНЫЙ ТИГЕЛЬ

После долгих «темных веков» во Вселенной зажигаются первые звезды. В их недрах при температуре около 10 миллионов градусов и плотности в не-



В ядрах большинства звезд водород постепенно превращается в гелий

У новорожденной Вселенной есть лишь несколько минут, чтобы поиграть в конструктор из протонов и нейтронов

сколько раз выше, чем у самого плотного металла на Земле, снова возникают условия для игры в алхимический конструктор — начинается звездный нуклеосинтез. Первое время эта игра весьма похожа на ту партию, что разыгрывалась сразу после рождения Вселенной. И все же некоторые отличия имеются. В звездном веществе вначале почти нет свободных нейтронов (в свободном состоянии они живут всего лишь около 15 минут), и поэтому дейтерий образуется при столкновении двух протонов. Один из них в процессе слияния превращается в нейтрон, испуская позитрон — положительно заряженную античастицу электрона, — чтобы избавиться от лишнего заряда. В отсутствие нейтронов из дейтерия не образуется тритий. Дейтерий довольно быстро соединяется с еще одним протоном и превращается в гелий-3. Прямой переход от него к гелию-4 путем захвата нейтрона, как в ранней Вселенной, невозможен, но тут имеется ряд обходных путей.

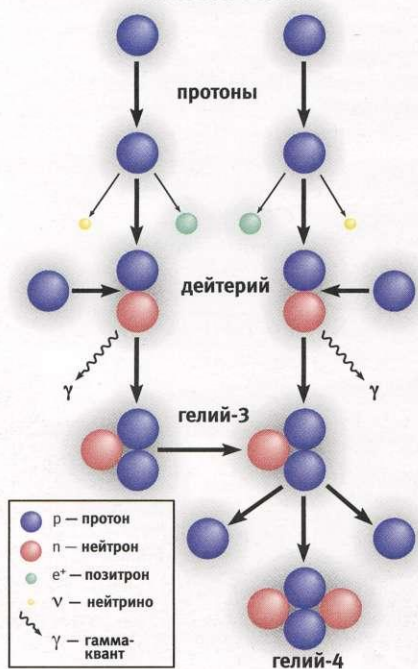
Два ядра гелия-3 могут, столкнувшись, образовать крайне неустойчивое ядро бериллия-6 (4 протона + 2 нейтрона), которое мгновенно разваливается на гелий-4 и пару протонов. Другой вариант сложнее: в реакциях гелия-3 и гелия-4 рождаются ядра бериллия и лития с атомным весом 7. Однако, присоединяя еще один протон, они становятся неустойчивыми

(помните — все ядра из 8 нуклонов крайне нестабильны) и сразу разваливаются на два ядра гелия-4. В общем, все дороги ведут в Рим.

Итогом любого из этих процессов становится превращение четырех протонов в одно ядро гелия-4. Важно, что масса ядра гелия-4 немного (примерно на 0,7%) меньше массы четырех протонов. Куда исчезает излишек массы? В соответствии с той же формулой $E = mc^2$ он превращается в энергию. Именно за счет этого, как говорят физики, дефекта массы и светят звезды. И, что немаловажно, звездный термоядерный реактор умеет сам себя регулировать: если выделяется слишком много энергии, звезда немного расширяется, вещество охлаждается и скорость реакции, которая очень сильно зависит от температуры, снижается. Если же энергии мало, то происходит обратный процесс. В итоге звезда стабильно поддерживает температуру на уровне, соответствующем достаточно низкому темпу реакций. Поэтому звезды (по крайней мере, некоторые из них) живут достаточно долго, чтобы хватило времени для биологической эволюции и появления столь высокоорганизованных существ, как мы с вами.

В конце концов запасы водорода в звезде исчерпываются. Надо двигаться дальше, а мы помним, что это не просто, поскольку не существует ста-

Протон-протонный цикл синтеза гелия



бильных ядер с массой 5 и 8. Но природа находит выход. Вспоминая встречу одноклассников в метро, можно сказать, что хотя случайно столкнуться сразу троим крайне маловероятно, но если встретились двое и какое-то время едут вместе, то шансы, что по пути к ним добавится третий, увеличиваются. Нечто подобное происходит при ядерном горении гелия. В начале две альфа-частицы, сливаясь, образуют неустойчивое ядро бериллия-8. Жизнь его чрезвычайно коротка, $3 \cdot 10^{-16}$ с (это меньше од-

ной миллионной от одной миллиардной секунды), но при достаточно высокой плотности и температуре даже этого крошечного интервала хватает, чтобы иногда в реакцию с бериллием успела вступить еще одна альфа-частица. И — вуаля! — углерод-12 собственной персоной!

Затем уже углерод может захватывать альфа-частицы, давая кислород. Таким образом, два основных элемента, необходимых для появления жизни, рождаются в звездах. Превращение углерода в кислород идет настолько эффективно, что последнего во Вселенной оказывается даже несколько больше углерода. Если бы параметры ядерных частиц были чуть иными, то почти весь углерод «перегорал» бы в кислород, что делало бы жизнь в той форме, которую мы знаем, крайне редкой или даже невозможной. Может быть, в каких-то других вселенных частицы устроены несколько иначе и там углерода мало, но тогда там нет и наблюдателей (по крайней мере, подобных нам).

ИГРЫ ДЛЯ ВЗРОСЛЫХ

Относительно небольшие звезды, вроде нашего Солнца, останавливаются на этапе синтеза гелия. Те, что в несколько раз массивнее, производят углерод и кислород, и только самые большие, превосходящие 10 солнечных масс, могут в конце жизни продолжить игру в элементы. После истощения запасов гелия их внутренние области сжимаются, разогреваются, и в них начинается «горение» углерода. Два ядра углерода, соединяясь, дают неон и альфа-частицу. Или натрий

и протон. Или магний и нейтрон. Появившиеся протоны и нейтроны тоже не пропадают зря. Они идут в дело, превращая углерод в азот, кислород и, далее, за счет захвата альфа-частиц в неон, кремний, магний и алюминий. Таким образом, нам уже есть из чего сделать впоследствии твердь земную.

После углерода вне очереди начинает «гореть» неон, причем делает он это «неправильным» образом: вместо того, чтобы сразу слиться с каким-нибудь другим ядром и увеличить свою массу, ядра неона под действием особо энергичных гамма-квантов распадаются на кислород и альфа-частицу. А затем получаемые альфа-частицы, взаимодействуя с другими ядрами неона, дают магний. Так что в итоге на два ядра неона возникают одно кислородное и одно магниевое.

После истощения запасов неона ядро звезды становится кислородно-магниевым, оно снова поджигается, температура растет и игра продолжается. Теперь ядра кислорода, попарно сливаясь, превращаются в кремний или серу. Кроме того, появляется немного аргона, кальция, хлора и других элементов.

Следующий на очереди — кремний. Напрямую два ядра кремния слиться не могут — из-за большого заряда слишком велико электрическое отталкивание между ними. Поэтому начинает идти множество разных реакций с участием альфа-частиц. Термин «горение кремния» достаточно условен, поскольку разных каналов реакций в самом деле много. На этой стадии возникают разные элементы вплоть до железа. ▶

ЯДРА, ЭЛЕМЕНТЫ И ИЗОТОПЫ

Протоны и нейтроны (собираетельно их называют *нуклонами*) не являются в строгом смысле слова элементарными частицами. Они состоят из трех кварков, накрепко связанных *сильным ядерным взаимодействием*. Разбить нуклон на отдельные кварки невозможно: требуемой для этого энергии достаточно для рождения новых кварков, которые, объединившись с осколками исходного нуклона, вновь образуют составные частицы.

Сильное взаимодействие не полностью замкнуто внутри нуклонов, а действует еще и на небольшом расстоянии от них. Если два нуклона, скажем, протон и нейтрон, сблизятся почти вплотную, ядерные силы свяжут их вместе и появится составное *атомное ядро* — в данном случае дейтерий (тяжелый водород). Соединяя вместе разное число протонов и нейтронов, можно получить все многообразие ядер, но далеко не каждое из них будет устойчивым. Ядро, в котором слишком много протонов или нейтронов, разваливается на части, даже не успев толком образоваться.

Физикам известно более трех тысяч сочетаний протонов и нейтронов, способных хотя бы некоторое время продержаться вместе. Есть ядра, которые живут лишь краткую долю секунды, другие — десятки лет, а есть и такие, что способны ждать своего часа миллиарды лет. И лишь несколько сотен ядер считаются стабильными — их распад никогда не наблюдался.

Химики обычно не столь дотошны, как физики, и различают не любые два ядра, а только разные *элементы*, то есть ядра с разным числом протонов. Собственно, химики вообще в ядро не загляды-

вают, а изучают лишь поведение электронов, окружающих его в спокойной обстановке. Их число как раз равно числу протонов, что делает атомы электрически нейтральными.

Всего на сегодня известно 118 элементов, но только 92 из них обнаружены в природной среде, остальные получены искусственно на ядерных реакторах и ускорителях. Большинство элементов представлено ядрами с разным числом нейтронов. Такие вариации называют *изотопами*. У некоторых элементов известно до сорока изотопов, при упоминании их различают, указывая число нуклонов в ядре. Например, уран-235 и уран-238 — два изотопа 92-го элемента урана со 143 и 146 нейтронами соответственно.

Большинство изотопов каждого элемента (а у некоторых и все) неустойчивы и подвержены *радиоактивному распаду*. Это делает изотопный состав важным источником информации об истории вещества. Например, по соотношению радиоактивных изотопов и продуктов их распада определяют возраст органических остатков, горных пород, метеоритов и даже некоторых звезд. Впрочем, и соотношение стабильных изотопов тоже может о многом рассказать. Например, климат Земли в далеком прошлом определяют по изотопам кислорода-16 и -18 в отложениях антарктических льдов: молекулы воды с тяжелым изотопом кислорода менее охотно испаряются с поверхности океана, и их становится больше при теплом климате. Для любых таких изотопных исследований принципиально, чтобы изучаемый образец с момента возникновения не обменивался веществом с окружающей средой.

КАРТА ВСЕХ ИЗВЕСТНЫХ ИЗОТОПОВ

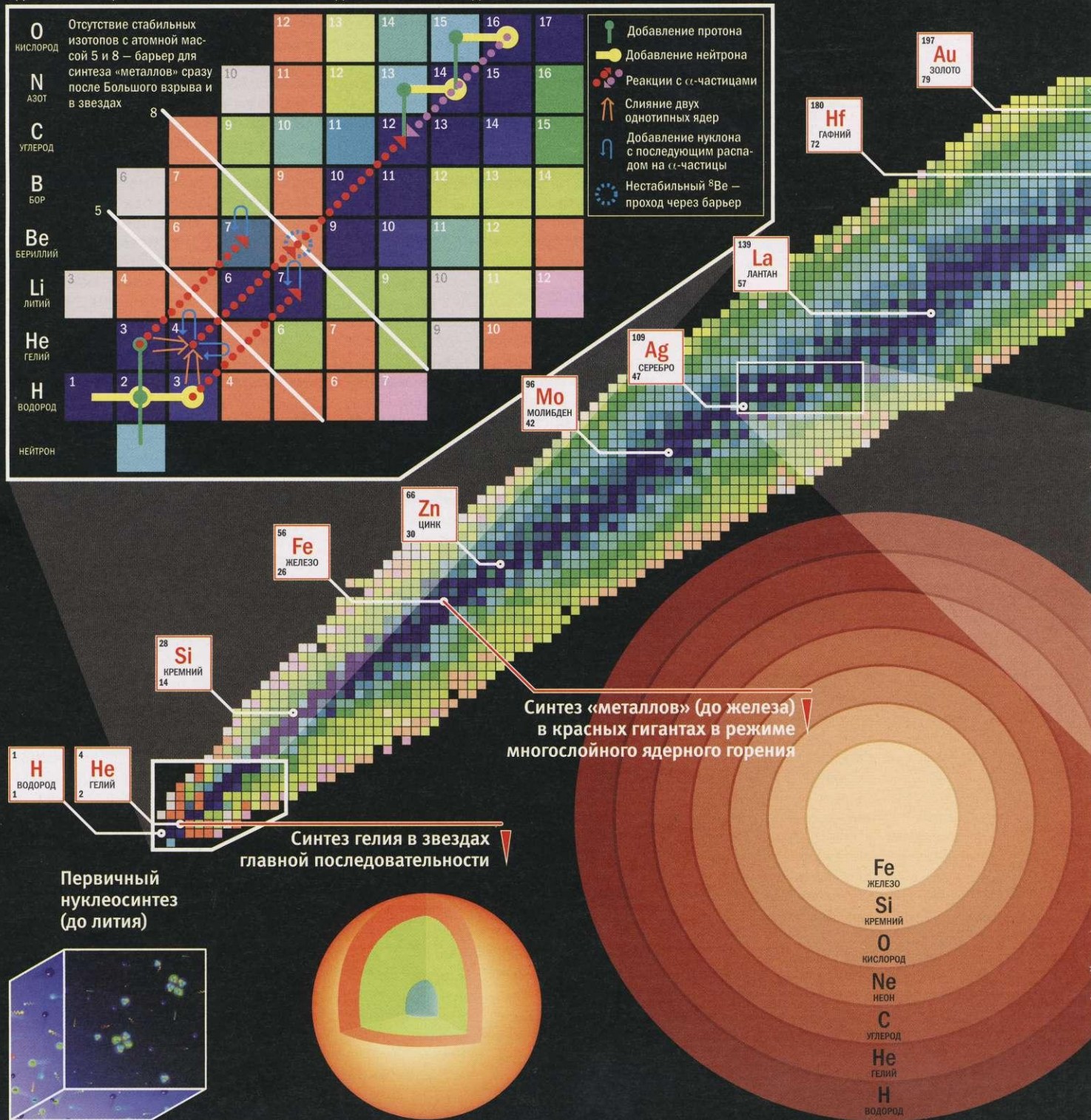
Z, число протонов в ядре (заряд ядра, номер элемента)

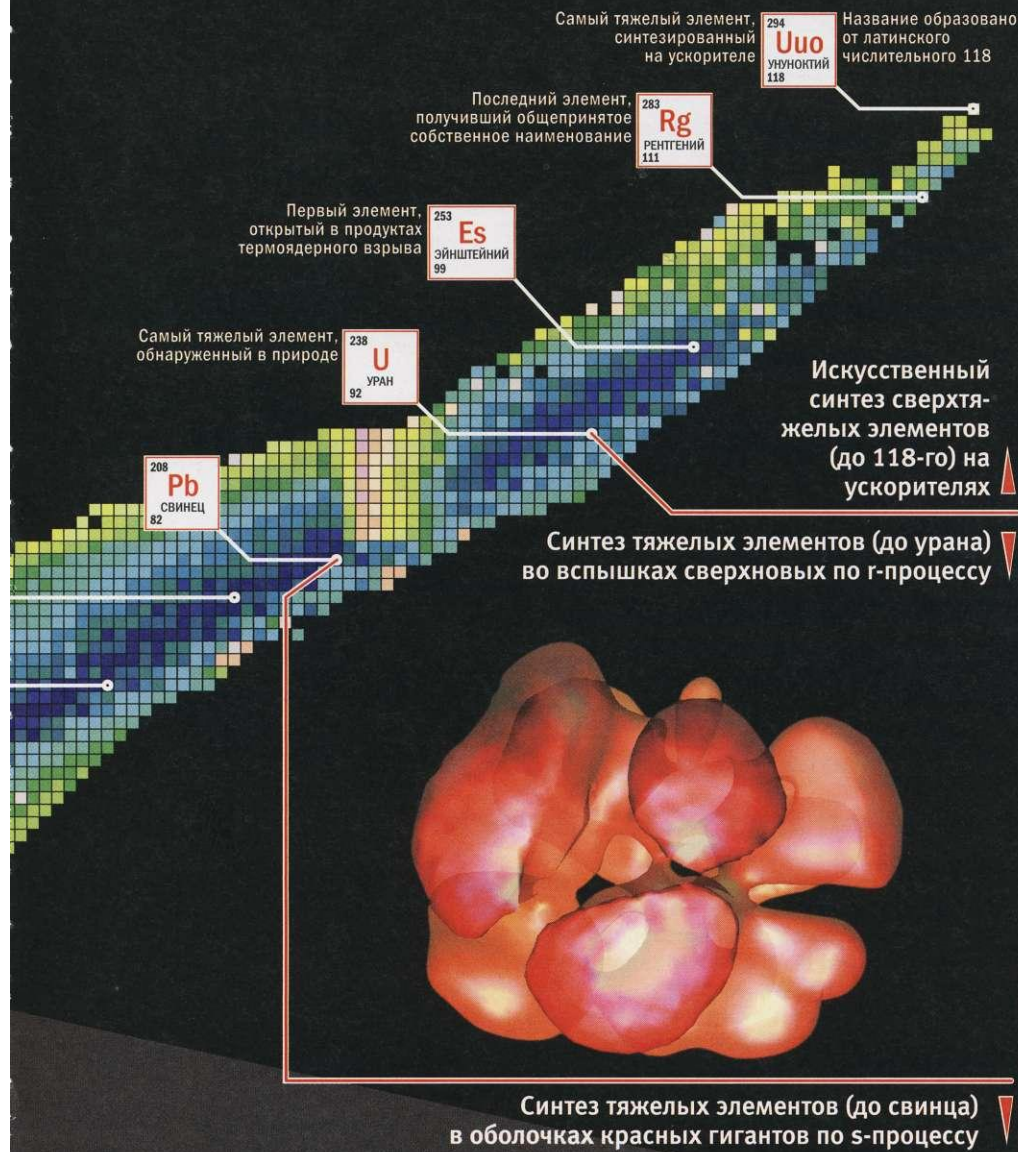
В привычной Таблице Менделеева не различаются изотопы элементов. На этой схеме клетки каждой строки соответствуют всем известным изотопам каждого элемента. По вертикали отложено число протонов в ядре, по горизонтали — число нейтронов, а вдоль диагонали возрастает атомный вес изотопа. Цвет клеток указывает на среднее время

жизни каждого ядра. В середине полосы располагаются долгоживущие ядра, а справа и слева от них — сильно неустойчивые. Элементы до гелия образуются в ходе первичного нуклеосинтеза после Большого взрыва и в ядрах звезд главной последовательности. В ядрах красных гигантов синтез доходит до никеля и железа. А в оболочках

этих звезд за счет присоединения нейтронов образуются тяжелые элементы (до свинца и висмута). Еще дальше синтез заходит в моменты взрывов сверхновых, однако элементы тяжелее урана в природе не сохраняются из-за радиоактивного распада. Их изучают, искусственно создавая в атомных реакторах и на ускорителях

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ И ЗВЕЗДАХ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ





Железо (и близкий к нему никель) выделяется из всех элементов тем, что у него максимальная энергия связи. Нуклоны нельзя упаковать эффективнее: и на то, чтобы разбить ядро железа на части, и на то, чтобы создать из него более тяжелые ядра, требуется затратить энергию. Поэтому первое время было непонятно, как может образование элементов в звездах идти дальше железа, и существование во Вселенной тяжелых ядер, как, например, у золота или урана, оставалось совершенно необъяснимым. Подход к объяснению был найден в середине 1950-х годов, когда были предложены сразу два механизма образования в звездах элементов тяжелее железа. Оба они основываются на способности ядер захватывать нейтроны.

ВЕЛИКИЕ МЕДЛЕННЫЕ КОРОЛИ

Первый из этих механизмов получил название медленного захвата нейтронов, или s-процесса (от англ. slow — «медленный»). Он протекает в конце жизни звезд с массой от 1 до 3 солнечных, когда они достигают стадии красного гиганта. Причем идет этот процесс не в плотном горячем ядре звезды, а в слоях, лежащих выше. У таких относительно легких звезд стадия гиганта имеет большую продолжительность, измеряемую десятками миллионов лет, и этого хватает для существенного преобразования вещества.

Отраженная в названии медлительность s-процесса связана с тем, что он протекает в течение длительного времени при низкой концентрации нейтронов. Однако и небольшое количество нейтронов надо откуда-то брать — никакого запаса этих частиц быть не может. В звездах-гигантах идет несколько видов реакций, в которых выделяются нейтроны. Например, углерод-13, захватив альфа-частицу, превращается в кислород-16, и при этом испускается нейтрон. Свободные нейтроны, поскольку им не мешает кулоновское отталкивание, легко проникают в ядра атомов и увеличивают их массу. Правда, если нейтронов станет слишком много, ядро потеряет устойчивость и развалится на части. Но поскольку свободных нейтронов в красных гигантах немного, у ядра есть время, чтобы относительно безболезненно ассимилировать пришельца, испустив при необходимости электрон. При этом один из нейтронов в ядре становится протоном, и заряд ядра на единицу увеличивается, что соответствует превращению одного элемента в другой — следующий по порядку в таблице Менделеева. Таким путем можно получить очень тяжелые элементы, например свинец и барий. Или технеций. В свое время ▶

ФРАГМЕНТ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ В РАМКАХ S-ПРОЦЕССА



СРЕДНЯЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ РАЗЛИЧНЫХ ИЗОТОПОВ (по данным NuDat 2.4, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2>)



ПЛАНЕТАРИЙ

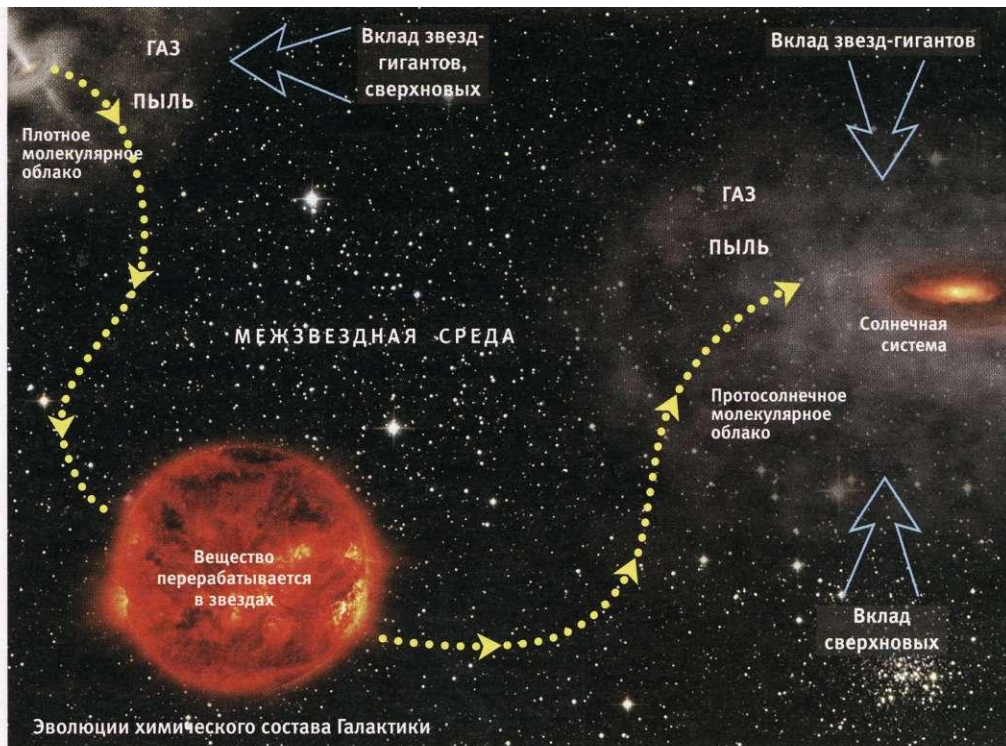
открытие этого тяжелого и достаточно быстро распадающегося элемента в атмосферах красных гигантов было даже истолковано некоторыми учеными как свидетельство в пользу существования внеземных цивилизаций! На самом же деле он просто выносится из недр на поверхность за счет перемешивания вещества.

Когда жизнь такого красного гиганта подходит к концу, его ядро превращается в плотного белого карлика, а оболочка рассеивается в окружающем пространстве за счет звездного ветра или образования планетарной туманности. Тем самым межзвездная среда пополняется наработанными за время жизни звезды тяжелыми элементами, и постепенно химический состав Галактики эволюционирует за счет звездного нуклеосинтеза. К тому моменту, когда образовалась Солнечная система, этот процесс шел уже 8 миллиардов лет, и около 1% межзвездного вещества успело превратиться в тяжелые элементы, из которых, в частности, сложена наша планета.

ОРДЕН ФЕНИКСА

Практически все атомы вашего тела в свое время побывали в недрах звезд. Многие из них пережили катастрофические взрывы сверхновых, и, более того, некоторые образовались именно в моменты таких взрывов. Мы, как феникс, родились из пепла, но из пепла звезд. Взрывы сверхновых очень важны уже потому, что это эффективный способ выбросить в космос наработанные в звезде элементы. Если итогом взрыва, как это чаще всего бывает, становится нейтронная звезда, в нее превращается только относительно небольшое ядро красного гиганта, состоящее в основном из железа и никеля. Например, при начальной массе звезды в 20 солнечных в нейтронную звезду превратится не более 7% вещества, все остальное выметается взрывом в космос и доступно для формирования новых светил.

Однако поддержанием этого космического круговорота вещества роль



Химический состав Галактики постоянно эволюционирует за счет выброса звездами тяжелых элементов

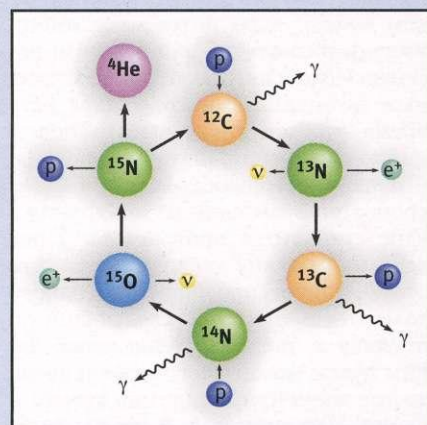
сверхновых не исчерпывается. Прямо во время взрыва в них могут образовываться новые элементы. Примерно 10 секунд новорожденная нейтронная звезда успевает побыть «алхимиком». Перед самым взрывом структура массивной звезды подобна луковице. Ядро окружено несколькими оболочками, состоящими из все более легких элементов. В тот самый момент, когда ядро начинает катастрофически сжиматься, превращаясь в нейтронную звезду или черную дыру, по лежащим выше слоям от центра наружу пробегает волна взрывного ядерного горения. В результате химический состав вещества сильно сдвигается в сторону тяжелых элементов.

Считается, что наиболее эффективно обогащают Вселенную тяжелыми элементами звезды с массами от 12 до 25 солнечных. Их железное ядро окружает мощная кремниво-кисло-

родная оболочка, которая после сброса дает элементы от натрия до германия (включая железо). В более массивных звездах слишком много вещества, состоящего из тяжелых элементов, проваливается внутрь черной дыры, и наружу ускользают только достаточно легкие. Звезды поменьше, с массами в 8—12 солнечных, не обладают такой оболочкой, и поэтому элементов группы железа в них образуется мало. Зато... появляются много более тяжелые элементы.

СВЕЖИЙ НЕЙТРИННЫЙ ВЕТЕР

Когда чудовищные силы гравитации сжимают уставшее сопротивляться ядро звезды, ядра атомов буквально спрессовываются друг с другом. Носящиеся между ними электроны, оказавшись в ловушке, вдавливаются в ядра и сливаются с протонами, превращая их в нейтроны. При этом▶



КАТАЛИЗАТОРЫ ЗВЕЗДНОЙ ЖИЗНИ

В массивных звездах переработка водорода в гелий идет иначе, нежели в звездах-карликах вроде Солнца. При температуре около 20 миллионов градусов работает так называемый углеродно-азотно-кислородный (CNO) цикл. Углерод в нем играет роль ядерного катализатора, а сам в реакциях не расходуется. Чтобы реакции были эффективны, его нужно совсем немного, но все же CNO-цикл возможен только в звездах современного химического состава, вещество которых уже обогатилось углеродом в ходе жизни предыдущих поколений звезд.

Углерод-12 захватывает протон и превращается в азот-13, а тот, испустив позитрон, — в углерод-13. Далее, захватывая подряд два протона, он становится сначала азотом-14 и потом кислородом-15. Тот снова выбрасывает позитрон и превращается в азот-15, который, сталкиваясь с уже четвертым по счету протоном, распадается на альфа-частицу (то есть ядро гелия) и углерод-12. В итоге мы возвращаемся к исходному ядру углерода, но по пути превращаем 4 протона в ядро гелия. Правда, изредка (в одном из 880 случаев) на последнем этапе цикла азот-15 может слиться с протоном в устойчивое ядро кислорода-16. Это приводит к медленному расходованию катализатора-углерода.

выделяются нейтрино — трудноуловимые частицы, которые обычно легко пронизывают всю толщу звезды и уходят в космос. Однако в момент образования нейтронной звезды их становится так много, что пренебрегать ими уже нельзя.

Возникает так называемый нейтринный ветер. Подобно тому как давление света в массивных звездах приводит к истеканию вещества в виде звездного ветра, нейтрино увлекают протоны и нейтроны. Даже если вначале нейтронов было не слишком много, они появляются в результате реакций между протонами и нейтрино. В веществе образуется избыток нейтронов, которые могут проникать в ядра, формируя все более и более тяжелые изотопы. Из-за огромного потока нейтронов ядра ими буквально переполняются, отчего становятся крайне нестабильными и начинают очень быстро избавляться от избыточной нейтронизации — нейтроны в них превращаются в протоны. Но едва только это происходит, как новые волны нейтронов опять доводят ядра «до предела».

Вся эта вакханалия, длящаяся лишь несколько секунд, получила название r-процесса (от англ. rapid — «быстрый»). Ее итогом становятся ядра всех масс вплоть до самых тяжелых. Например, для выявления последних r-процесса часто ищут следы такого редкого элемента, как европий, поскольку он, вероятнее всего, рождается только с помощью этого механизма. В r-процессе образуются, например, платина и актиноиды — тяжелые радиоактивные элементы, к которым относится, в частности, уран. Относительное содержание изотопов последнего, равно как и тория, часто используют для оценки возраста звезд.

Также в ветре новорожденной нейтронной звезды могут идти реакции с участием заряженных частиц — протонов и ядер гелия, — увлеченных потоком нейтрино. Так образуются цирконий, серебро, йод, молибден, палладий и многие другие элементы. Теория всех этих процессов очень сложна, поскольку одновременно требуется учитывать множество эффектов, среди которых не все еще полностью ясно. Причем речь тут не только об астрофизических эффектах, но и о неопределенностях в рамках ядерной физики — далеко не все параметры идущих на данном этапе реакции точно определены.

Продолжаются и споры ученых относительно того, может ли этот сценарий претендовать на полноту: способен ли он объяснить рождение тяжелых элементов в наблюдаемых нами пропорциях. Поэтому исследования в этой



Взрыв сверхновой происходит несимметрично, что сильно затрудняет его компьютерное моделирование

SPL/EAST NEWS

Каждая частичка нашего тела прошла через космическое горнило: горела в звездах, взрывалась сверхновыми

области идут полным ходом, и, возможно, нас еще ждут интересные открытия. Например, обсуждаются сценарии, в которых вещество, захваченное в сверхсильных магнитных полях новорожденных магнитаров (намагниченных нейтронных звезд), позволяет производить тяжелые элементы в r-процессе. Для проверки подобных идей требуются сложные трехмерные расчеты на суперкомпьютерах, которые еще только предстоит произвести.

ГОМУНКУЛУС

И вот наконец по прошествии миллиардов лет в гигантской реторте Вселенной сложились условия для того, чтобы смог появиться гомункулус. Жизнь, какой мы ее знаем, не могла бы возникнуть в течение первого миллиарда лет после Большого взрыва — тогда просто не было в достаточном количестве многих необходимых элементов.

Каждая частичка нашего тела прошла через космическое горнило. Часть атомов водорода могла остаться неизменной со времени «первых трех минут», но основная доля составляющих его элементов появилась в звездах на стадии устойчивого термоядерного горения. Многие ядра возникли во время вспышек сверхновых. Другие — были выброшены звездами в виде кружева планетарных туманностей. Возможно, крохотная доля ядер связана со столкновениями космических лучей с веществом межзвездного

газа, когда идут интереснейшие «реакции скальвания», в которых быстрая частица выбивает ядра легких элементов. Для появления человека понадобилась целая «лаборатория» космического алхимика.

Состав вещества во Вселенной продолжает медленно изменяться и в наши дни: усилиями триллионов звезд доля элементов тяжелее гелия постепенно растет. Наблюдения показывают, что у звезд с большей «металличностью», то есть содержанием элементов тяжелее гелия, выше вероятность возникновения планетных систем. А значит, химическая эволюция Вселенной пока благоприятствует появлению разумных существ, сделанных из «звездного вещества». И все же стоит помнить, что подобной переработке подвергается лишь малая часть материи во Вселенной. В целом же водород так и останется самым распространенным ее элементом, просто потому, что далеко не все вещество сможет попасть в звезды (например, у межгалактического газа нет такой перспективы). Если же вспомнить, что и это вещество составляет от силы пять процентов на фоне колоссальной массы темной материи и темной энергии, то вы почувствуете, насколько же невероятно повезло в этом тому комочку вещества, который смог оглянуться по сторонам и оценить величие окружающего мироздания. ●