

*Дмитрий Вибс\**



Поиски жизни во Вселенной — тема обширная; ее важная и неизбежная часть — исходное вещество, определенные молекулы. Основы наших представлений о том, откуда на Земле появилась жизнь, были заложены в 1920-е годы. Одним из пионеров этих исследований был академик Александр Иванович Опарин, который высказал предположение, что сложные органические вещества, из которых впоследствии появились живые существа, появились непосредственно на Земле, в том, что Опарин называл «первичным бульоном». Аналогичную идею высказал Джон Холдейн; ему принадлежит забавное высказывание: «Я подозре-

ваю, что Вселенная не только страннее, чем мы себе представляем, но и страннее, чем мы можем представить». Опарин предполагал, что на молодой Земле из смеси неорганических веществ в результате каких-то энергетических воздействий, например, из-за вспышек молний, из неорганического вещества появлялась органическая материя.

В 1952 году это предположение было проверено экспериментально. В том же году начались эксперименты Стэнли Миллера и Гарольда Юри, ученых, которые проверяли возможность органического синтеза из неорганических веществ. Они брали смесь воды, метана, аммиака, водорода и оксида углерода, пускали через это всё электрические разряды, и через 1–2 недели в этой смеси начали появляться органические вещества, а именно аминокислоты, ко-

\* Вибс Дмитрий Фридрихович, профессор РАН, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики и эволюции звезд Института астрономии РАН.

торые являются основными строительными кирпичиками для построения белков. И хотя никаких особенно сложных органических соединений в этих экспериментах получено не было, тем не менее, они послужили доказательством того, что, при определенных предположениях об условиях на молодой Земле, на ней мог происходить синтез органического вещества из неорганических исходных материалов. Этот процесс называется абиогенез — синтез органических веществ из неорганических исходных материалов без участия живых существ. Позже эти эксперименты повторены другими исследователями, результаты были подтверждены.

Это были времена энтузиазма по поводу жизни во Вселенной и даже контактов с внеземными цивилизациями. Вышло очень много оптимистических в этом отношении фантастических произведений и в отношении жителей Марса, и в отношении жителей других планет Солнечной системы, и в отношении, вообще, освоения Галактики. Проводились конференции, издавалась литература на эту тему, член-корреспондент АН СССР Иосиф Самуилович Шкловский написал книгу «Вселенная. Жизнь. Разум» и дискутировал со Станиславом Лемом. Но позже энтузиазм постепенно начал сходиться на нет, и сейчас деятельность в рамках поисков внеземных цивилизаций уже далеко не такая активная, какой она была в 1960—1970-е годы.

Между тем стала появляться более основательная информация о том, что жизнь во Вселенной может быть не уникальным явлением. И в процессе осмысления этой информации, создания каких-то моделей развития жизни, сформировалась особая отрасль астрономии — астробиология. Это наука о том, как во Вселенной может зародиться жизнь, какие для этого нужны предпосылки и условия, обязана она зарождаться на планетах или возможны какие-то другие варианты. И один из главных астробиологических результатов последних десятилетий состоит в том, что

важные исходные вещества для того, что мы считаем жизнью, могли появиться не на планетах — они существуют в пространстве между звездами и могут появляться еще до образования планет.

Эта идея возникла, как и жизнь, далеко не сразу, и до определенного момента межзвездная среда казалась местом, крайне неподходящим не только для появления сложных молекул, но и для существования каких бы то ни было молекул вообще. Хотя о том, что между звездами есть еще что-то, что пространство между звездами не пусто, люди догадывались давно. Астроном Вильям Гершель считал, что мутное пятно, которое окружает звезды в туманности Ориона, состоит из некой светящейся жидкости, которая не имеет к звездам прямого отношения. По поглощению звездного света разные ученые: В. Я. Струве в XIX веке, Якобус Каптейн и Эдвард Барнард в XX-м высказывали предположение о том, что в пространстве между звездами могут быть облака пыли.

Однако «по умолчанию» считалось, что это безжизненная материя, не имеющая отношения к биосфере. Перелом в исследованиях межзвездной среды, как и во всей прочей астрофизике, начался с появлением спектроскопии. В начале XIX века Уильям Волластон обнаружил, что в солнечном спектре присутствуют нерегулярно расположенные темные линии. Позже Йозеф Фраунгофер их переписал и присвоил им буквенные обозначения. Эти линии до сих пор называются линиями Фраунгофера, и его обозначения используются. Позже было понято, что на этих частотах разреженный газ в верхних слоях Солнца поглощает излучение с непрерывным спектром, идущее из более глубоких плотных слоев. Поэтому, исследуя линии в спектре Солнца и любой звезды, можно сказать, какие химические элементы входят в состав этой звезды. У каждой линии есть «профиль», точная зависимость интенсивности от частоты, с определенной глубиной

и шириной. Исследуя эти параметры, можно узнать температуру и скорость движения газа.

### Первые молекулы

В 1904 году Йоханнес Хартман обратил внимание на то, что линии в спектрах звезд не все выглядят одинаково. Некоторые линии имеют особенно большую глубину и малую ширину, и он предположил, что эти линии рождаются не в звездной атмосфере, а в межзвездном веществе, которое находится на луче зрения между звездой и наблюдателем. С этого началось изучение состава межзвездной среды. Между тем, помимо звезд, с конца XIX века астрономы наблюдали, например, и кометы. И вот в кометах обнаружили линии, которые принадлежали не атомам, а молекулам. Атом, который попадает в молекулу, остается тем же атомом, у него так же присутствуют электроны, которые переходят с орбиты на орбиту. Просто свойства спектра при этом становятся другими, и эти изменения позволяют сказать, находится атом в свободном состоянии или же входит в состав какой-то молекулы.

Первые молекулы в кометном веществе были обнаружены в 1881 году —  $C_2N_2$ , цианоген, ядовитый газ. И в 1910 году обнаружение этих молекул в хвосте кометы Галлея стало даже причиной большой паники. Однако Земля, естественно, благополучно прошла через кометный хвост, не понеся при этом никаких потерь. В межзвездной же среде молекулы были впервые обнаружены в конце 30-х годов. До этого предполагалось, что никаких молекул в межзвездной среде быть не может. Однако оказалось, что все линии, которые наблюдаются в звездных спектрах, одними только атомами объяснить невозможно. В 1937 году было выявлено несколько неопознанных линий и высказано предположение, что эти линии принадлежат молекулам СН и CN. Исследования межзвездных молекул после этого стали быстро разви-

ваться, молекулы были надежно идентифицированы, в 1941-м в июне прошла первая научная конференция, посвященная этим молекулам.

Однако подлинный расцвет исследования межзвездных молекул потребовал других методов, методов, которые не связаны с наблюдениями в оптическом диапазоне. И этот расцвет мог начаться только после того, как появилось новое направление наблюдательной астрономии — радиоастрономия. В 1932 году Карл Янский исследовал помехи для межконтинентальной радиосвязи и обнаружил, что часть этих помех приходит из космоса. Пионером исследований межзвездной среды в радиодиапазоне стал Хендрик ван де Хюлст, который в 1945 году высказал предположение, что в радиодиапазоне можно наблюдать линии водорода. Эти линии связаны не с переходами электрона с одного уровня на другой, а с изменением состояния электронов внутри одного уровня, с изменением направления спина электрона относительно спина ядра атома водорода. Эти два состояния имеют лишь немного разную энергию, поэтому излучение приходится не на оптический, а на радиодиапазон, на длину волны 21 см. Ван де Хюлст вспоминал, что он этой задачей занялся по предложению Яна Оорта, который сказал: «Постарайся найти в радиодиапазоне хотя бы одну линию. Если эта линия будет, то тогда у радиоастрономии есть будущее». И вот ван де Хюлст такую линию нашел теоретически, а в 1951 году она была впервые обнаружена.

Искать спектральные линии не атомов водорода, а разных молекул предложил И. С. Шкловский. Возникновение спектральных линий молекул связано также с переходами их с одного уровня на другой, но это — уровни энергии молекул, они тоже квантованы, но их энергии меньше, и излучение попадает в дальний инфракрасный или радиодиапазон. Наблюдения в этих диапазонах потребовали создания радиотелескопов. В 1963 году была открыта первая двухатомная молекула по на-

блюдениям в радиодиапазоне — ОН, в 1969 — первая межзвездная органическая молекула, формальдегид. И с тех пор каждый год открывается по несколько молекул. Сегодня известно около 200 различных межзвездных молекул.

### Ну, вот и органика

Практически все молекулы, обнаруженные в космосе и включающие в себя 4 атома и больше, — это молекулы органические — метан  $\text{CH}_4$ , метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$ , этанол  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Даже есть отдельные указания на то, что простейшая аминокислота, глицин, присутствует в межзвездной среде, хотя эти указания неопределенные, о чем я скажу несколько позже. Самая большая обнаруженная молекула состоит из 13 атомов, это —  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CN}$ .

Есть признаки, указывающие на то, что в межзвездной среде присутствуют и существенно более сложные соединения, которые называются полициклическими ароматическими углеводородами и с которыми все мы сталкиваемся практически регулярно. Еще один вид сложных соединений, который тоже относительно недавно был обнаружен в межзвездной среде, — это фуллерены. Когда появились сведения о том, что в межзвездной среде присутствует настолько сложная органика, появились энтузиасты, Фред Хойл и Чандра Викрамасингх, которые сочли, что это органическое вещество является продуктом существования жизни в межзвездной среде. И те молекулы полициклических ароматических углеводородов и фуллеренов, которые наблюдаются в межзвездной среде, это, на самом деле, продукты распада межзвездных бактерий. Но трудно предположить, что в межзвездной среде могут появляться живые существа, да и сама идентификация этих соединений как сложной органики не окончательна.

Проблем с идентификацией межзвездных молекул, на самом деле, очень и очень много. Каждая молекула может испытывать очень мно-

го различных движений. С каждым из этих движений связан набор линий. В результате у одной молекулы количество линий может исчисляться тысячами. Молекул много, спектры их накладываются друг на друга. Вот пример — относительно близкое к нам молекулярное облако в созвездии Ориона. В широких спектральных обзорах этого облака, которые проводились в разные времена, было обнаружено 16 тысяч спектральных линий. Из них до 2005 года половина оставались неотожествленными, в 2005 году количество неотожествленных линий сократилось до 6 тысяч, но происхождение еще 6 тысяч линий мы до сих пор объяснить не можем. Именно со сложностями идентификации связана неопределенность в обнаружении глицина.

Молекулы в межзвездном пространстве разбросаны неравномерно. Молекулярный газ Галактики тяготеет к спиральным рукавам. На долю молекулярных облаков приходится примерно половина всей массы межзвездного вещества нашей Галактики, хотя занимают они около 1% объема. По астрономическим меркам это довольно плотные образования. Массы молекулярных облаков достигают миллионов масс Солнца. Размеры — многие десятки световых лет. Температура от 10 до 50 кельвинов, плотность — 200 частиц на кубический сантиметр или выше. Условия для протекания химических реакций неблагоприятные. Сложность образования межзвездных молекул состоит и в том, что холодно, и в том, что в межзвездной среде очень мало атомов, из которых эти молекулы формируются. Точнее, в межзвездной среде очень много атомов водорода, всех прочих — мало. Самая обильная молекула — это молекула оксида углерода,  $\text{CO}$ , ее в 10 тысяч раз меньше, чем молекулярного водорода. Всех прочих молекул, в том числе и молекул органических, еще меньше. Как правило, это одна миллиардная, одна 100-миллионная доля от общего содержания межзвездного газа. Тем не менее, эти молекулы наблюдаются

ся, эти молекулы можно исследовать, и для того, чтобы их исследовать, возникла в астрономии новая отрасль, которая называется астрохимия.

### Откуда в космосе органика?

В первые годы после открытия межзвездных молекул предполагалось, что молекулы, как и атомы, синтезируются в звездах. В звездах тепло, в звездах высокая плотность, может быть, полагали тогда, молекулы синтезируются в оболочках умирающих звезд, планетарных туманностях, потом они выбрасываются в межзвездное пространство, и мы их в межзвездном пространстве наблюдаем уже как вторичные продукты. Однако, в 1973 году Вильям Ватсон, Эрик Хербст и Вильям Клемперер нашли объяснение того, как в межзвездной среде может инициироваться сложная последовательность химических реакций.

Они предположили, что, как ни странно, катализатором межзвездных химических процессов также является очень высокоэнергетичный фактор, который, казалось бы, должен был разваливать молекулы. Это космические лучи. Они ионизируют молекулу водорода, та превращается очень быстро в ион  $H_3^+$ . Этот ион является тем стартовым элементом, с которого начинается образование простых двухатомных молекул. Например, атом кислорода реагирует с ионом, и дальше начинается постепенное усложнение. Сначала появляется ион  $OH^+$ , ион  $H_2O^+$ , они рекомбинируют с электроном, и возникают первые простые молекулы, то же самое происходит и с азотом. Эта простая цепочка заканчивается образованием аммиака, и, естественно, что-то похожее происходит и с углеродом. В данном случае эта цепочка завершается синтезом метана. По мере того, как в среде накапливаются простые молекулы, они начинают реагировать уже не только с водородом, но и друг с другом. И в результате постепенно усложняется и усложняется молекулярный состав, и,

в частности, мы приходим к молекуле HCN.

Эта молекула очень интересная с точки зрения биохимии, с точки зрения астробиологии, поскольку полимеризация молекулы HCN приводит к появлению азотистых оснований, например, аденина и других молекул, которые уже имеют биологическое значение. В синтезе других сложных органических молекул стартовым элементом оказывается ион  $CH_3^+$ , реагирующий с более простыми молекулами, и в этих реакциях рождается еще более сложная органика. Для исследований всех этих процессов в мире сейчас существует некоторое количество специальных баз данных, в которых собрана вся информация о химических реакциях. И реакции, собранные в этих базах данных, прекрасно позволяют описать эволюцию большинства молекул, которые наблюдаются в молекулярных облаках. Однако есть некоторые исключения, например, газофазными реакциями не удается объяснить происхождение молекулярного водорода. Приходится допустить, что молекула  $H_2$  образуется не в газовой фазе, а на пылинках, при столкновении двух атомов H, мигрирующих по поверхности пылевой частицы. Там же образуется метанол, диметилловый эфир, этанол и обширный набор органических соединений, который еще более расширяется, когда эта пылинка, на которую намерзла сложная органическая мантия, попадает в окрестности яркой звезды. В этом случае под воздействием ультрафиолетового излучения появляются еще более сложные соединения, от которых до аминокислот остается буквально шаг.

И хотя существование аминокислот в межзвездной среде уверенно не доказано, нет никаких препятствий к тому, чтобы они там были. То, что мы их не можем пока обнаружить, связано с недостаточными техническими возможностями. Горячие органические оболочки вокруг звезд мы реально наблюдаем, одна из наиболее известных оболочек находится в созвездии Стрельца, неподале-

ку от центра Галактики. Это знаменитое облако Стрелец B2N, в котором обнаружено большинство молекул. Но и в других подобных горячих ядрах разнообразие органических молекул тоже весьма и весьма обширное.

Итак, в межзвездной среде мы обнаруживаем огромное количество органики. Но какое это все имеет отношение к появлению жизни? Насколько эта органика в состоянии попадать на планеты? Следующий шаг эволюции — протопланетный диск. В этих объектах тоже наблюдаются молекулы, правда, наблюдать их очень сложно, и количество молекул, которые обнаруживаются, не такое впечатляющее, как в случае с межзвездной средой, но там тоже есть органика: формальдегид, метанол, HCN. Она может образовываться на месте, она может приходиться из исходного молекулярного облака. Правда, по всей видимости, не вся эта органика в протопланетных дисках сохраняется, там, где горячо, она разрушается, но в той части, где образуются планеты, там холоднее, и органика может уцелеть.

### Наш собственный диск

Протопланетные диски наблюдать трудно, но один из них у нас поблизости, наш собственный, точнее — остатки от него. Некоторые метеориты, попадающие на Землю, очень старые — остатки того вещества, которое в Солнечной системе существовало до образования планет. Некоторые из метеоритов содержат много органических веществ. Тут вам, пожалуйста, и аминокислоты, и бензол, и его производные, тут вам и азотистые основания и всё, что, казалось бы, нужно для жизни — всё в метеоритах есть. Причем анализ органического вещества в метеоритах показывает, что оно имеет звездную природу — по изотопному составу оно не совпадает с составом сегодняшней земной органики, но зато согласуется с изотопным составом тех молекул, которые наблюдаются в межзвездной среде. В частности, это от-

носится к значительному обогащению этих органических молекул атомами азота-15 и дейтерия.

Одним словом, к каким мы приходим итогам? В межзвездной среде и в звездах нашей и других галактик изобильно формируются органические соединения практически любой сложности. Эти соединения могут сохраняться в протопланетных дисках и входить в состав протопланетного вещества. И в последующей эволюции планет эта органика может доставляться на поверхность планет в нетронутым виде во время падения метеоритов. Это мы, собственно говоря, наблюдаем и в наши дни, когда имеем возможность буквально руками трогать вот эту межпланетную органику. То есть она прилетает в совершенно нетронутым состоянии. Правда, не все гладко с этой органикой. Не все позволяет ее однозначно привязать к появлению жизни на Земле.

Дело в том, что у органических молекул есть такое свойство, которое называется хиральность. Эти молекулы обладают свойством симметрии правого и левого. То есть, как две руки человека, они абсолютно идентичны, но совместить их, наложить друг на дружку нельзя: они разные. Точно так же и органические молекулы, как и руки у человека, бывают правые и левые. По каким-то причинам земная жизнь использует органические молекулы только одной симметрии. Она использует только левые аминокислоты и только правые сахара. Тогда как межзвездная и межпланетная органика практически в равной степени содержит в себе и правые и левые молекулы. Правда, существуют несколько публикаций (последняя — Фаршид Джафарпур, Томазо Бианкалани, Нигель Гольденфельд, 2015), где показано, что это свойство земной жизни могло возникнуть самопроизвольно, на более поздних стадиях эволюции.