

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

523.161

МОЛЕКУЛЫ В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ

До недавнего времени молекулы были объектом изучения для химика, а не астронома. Однако, как отмечают Л. Снайдер и Д. Бул¹, на состоявшейся в августе 1970 г. ассамблее Международного Астрономического союза (Брайтон, Англия) в обсуждении вопроса о межзвездных молекулах приняли активное участие и физики, и химики, и астрономы. Это обсуждение показало, что отныне уже невозможно игнорировать существование в межзвездном пространстве довольно сложных молекул, и это обстоятельство требует нового, химического, подхода к вопросу о распространенности различных молекул все более экзотического состава, недавно обнаруженных в облаках межзвездного газа. Само же искусство обнаружения межзвездных молекул все более становится прерогативой радиоастрономов, а не оптических астрономов.

Первыми в межзвездном пространстве были обнаружены двухатомные молекулы CN , CN^+ и CN . Они были найдены по характерным деталям поглощения в спектрах горячих звезд. В числе пионеров, открывших и отождествивших в 30-х — начале 40-х гг. эти молекулы, были П. Свингс, Э. Мак-Келлар, Г. Герцберг, У. Адамс, Т. Данхем и П. Меррилл.

В 1963 г. при помощи крупного радиотелескопа С. Уэйрбей и его сотрудники из Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института открыли в межзвездной среде молекулы гидроксидла O^{16}H — по линии поглощения на λ 18 см в спектре дискретного источника космического радиоизлучения Кассиопея А. В 1965 г. две группы исследователей из Калифорнийского университета одновременно обнаружили аномальную эмиссию OH . Аномальность заключалась в высокой интенсивности, необычных отношениях интенсивностей различных линий и необычных профилях эмиссионных спектров OH . Перечисленные особенности первоначально породили подозрение, что наблюдавшееся излучение вызвано не OH , а неизвестной составляющей межзвездной среды, условно названной «мистериумом». Однако обнаружение других компонент спектра OH близ λ 18 см подтвердило, что это излучение действительно вызывается молекулами OH , но при необычных условиях возбуждения, которые лучше всего можно описать как «межзвездный мазер».

В 1966 г. А. Роджерс и А. Баррет из Массачусетского технологического института обнаружили в межзвездной среде молекулы O^{18}H .

Следует отметить, что за время, протекшее между обнаружением межзвездных молекул CN и OH , астрономы выработали определенные представления о химическом составе и структуре облаков межзвездного газа. Было общепринято, что типичное облако — это газ, состоящий в основном из отдельных атомов, с небольшой примесью двухатомных молекул, в который «вкраплены» сравнительно крупные частички «межзвездной пыли». Отсутствие многоатомных молекул в межзвездном пространстве объяснялось воздействием поля излучения звезд, противостоять которому могли лишь несложные двухатомные молекулы типа CN или OH . К тому же плотности и температуры межзвездных облаков считались слишком низкими для формирования сложных молекул. Ввиду этого поиски более сложных молекул считались бесперспективными. Однако последующие события показали, что скорость диссоциации межзвездных молекул была явно завышена, а скорость их образования — недооценена.

В 1968 г. группа исследователей из Беркли опубликовала сообщение об открытии радиоизлучения молекул межзвездного аммиака (N^{14}H_3) на λ 1,26 см в созвездии Стрельца. Первоначально были обнаружены радиолитии, соответствующие двум инверсионным переходам в молекулах аммиака; в дальнейшем в направлении на центр Галактики были найдены еще три. Эти пять линий с длинами волн от 1,26 до 1,20 см были обнаружены на 6-метровом радиотелескопе обсерватории Хэт Крик Калифорнийского университета.

В начале 1969 г. та же группа, используя прежний инструмент, отождествила сильные эмиссии межзвездного водяного пара (H_2O) на λ 1,35 см в трех радиосточниках: Стрелец В2, Орион А и W49. Обнаруженное излучение оказалось исключительно интенсивным, что наводило на мысль о мазерном механизме, предложенном для ОН.

В течение 1969 г. были зарегистрированы еще несколько радиосточников с заметными эмиссиями водяного пара. Весьма интригующа проблема интенсивности излучения молекул H_2O . Если бы они находились в тепловом равновесии, то регистрируемый сигнал от источника W 49 дал бы антенную температуру при наблюдениях на 42-метровом радиотелескопе менее 1° . На самом же деле антенная температура от излучения молекул H_2O в источнике W 49 превышает 2000° !

Более того, ряд эмиссионных деталей в спектре водяного пара меняется со временем, что значительно затрудняет теоретическое объяснение мазерного механизма. Зарегистрированы существенные изменения в течение нескольких дней, а временами некоторые радиолинии полностью исчезают.

В Брайтоне Салливан сообщил о появлении в спектре W 49 интенсивной спектральной детали с антенной температурой 5000° . В туманности Ориона излучение водяного пара также подвержено сильным временным изменениям; более слабые изменения интенсивности отмечены в ряде других источников. Понимание механизма излучения молекул H_2O существенно зависит от размеров излучающих областей. В настоящее время наиболее подходящие методы для этих определений — это интерферометрия с большими базами и наблюдение покрытий Луной.

Хотя подавляющее большинство известных радиосточников с эмиссиями H_2O нельзя отождествить со звездами, излучение на λ 1,35 см было обнаружено у звезды U Геркулеса — переменной звезды типа Миры Кита. Инфракрасные полосы поглощения H_2O отождествлены в атмосферах нескольких переменных звезд типа Миры Кита, так что объединение оптических и радиоданных, возможно, поможет понять сложные процессы, происходящие в атмосферах этих звезд.

В марте 1969 г. Л. Снайдер и Д. Бул совместно с Б. Цукерманом и П. Пальмером, используя 42-метровый радиотелескоп Национальной радиообсерватории США в Грин Банк, зарегистрировали поглощение межзвездного формальдегида $H_2C^{12}O^{16}$ на λ 6,21 см. Сначала это отождествление было поставлено под сомнение, однако позднее был открыт «тяжелый» формальдегид $H_2C^{13}O^{16}$. Ивнс с сотрудниками обнаружил формальдегид $H_2C^{12}O^{16}$ по переходу на λ 2,07 см, а Уэли — переход 1,03 см. Это была вторая после аммиака полиатомная молекула, обнаруженная в межзвездном пространстве, а также первая органическая межзвездная молекула.

В противовес аммиаку и водяному пару, формальдегид был обнаружен во многих различных областях Галактики; не исключено, что его наличие — характерная особенность спиралей нашей Галактики.

Вскоре после открытия межзвездного формальдегида выяснилось, что его линии могут наблюдаться в поглощении, когда источник радиоизлучения явно отсутствует. Отсюда был сделан вывод, что молекулы формальдегида активно поглощают «3-градусное» фоновое радиоизлучение Метагалактики. Если это действительно так, то формальдегид в темных туманностях не может находиться в тепловом равновесии с 3-градусным излучением, а должен быть «холоднее». В результате населенность нижнего энергетического уровня должна оказаться больше, чем верхнего, по сравнению с равновесным распределением. Эта ситуация в точности обратна мазеру, у которого перенаселен верхний уровень; таким образом, поглощение межзвездными молекулами формальдегида можно назвать «обратным мазерным эффектом». Согласно теории, разработанной Таунсом и Чунгом, аномальная населенность уровней, необходимая для «обратного мезара», может вызываться столкновениями молекул H_2CO с другими молекулами или атомами в межзвездном пространстве. По мнению Литвака, многие из наблюдаемых эффектов «накачки», по-видимому, обязаны нагреванию сходящимися ударными волнами в гравитационно неустойчивых пылевых облаках. Не исключено, что именно подобная «накачка» молекул формальдегида приводит к отклонению 3° -ного микроволнового излучения от спектра черного тела.

Во второй половине 1969 г. и начале 1970 г., несмотря на усиленные поиски, новых межзвездных молекул найдено не было. Искали межзвездный кетон H_2C_2O , муравьиную кислоту $HCOOH$, гидразин N_2H_4 , окись азота NO , гидрид серы SH , триметиленоксид $(CH_2)_3O$, но ни одна из этих молекул не была обнаружена.

В апреле 1970 г. Р. Вильсон, К. Джеффрис и А. Пенциас при помощи 11-метрового радиотелескопа обсерватории Китт Пик обнаружили радиоизлучение межзвездных молекул CO и радикала CN на $\lambda\lambda$ 2,60 и 2,64 мм соответственно.

Молекула CO особенно интересна тем, что она образует «ядро» молекулы формальдегида. Таким образом, межзвездные молекулы CO могут свидетельствовать либо о процессе образования молекул H_2CO , либо о процессе их распада под влиянием достаточно мощного излучения. Поэтому можно ожидать сильной корреляции или антикорреляции между межзвездными молекулами H_2CO и CO . Так, к примеру, сильное излучение CO обнаружено в Орионе А, где полностью отсутствует излучение H_2CO .

Тщательные поиски подобных закономерностей помогут лучше понять химическую эволюцию межзвездных облаков.

Интересно, что переход λ 2,64 мкм в молекуле CN — одной из первых молекул, обнаруженных в межзвездном пространстве, — до сих пор не удалось наблюдать в лабораторных условиях, и можно полагать, что молекулярные константы для основного состояния молекулы CN будут определены из радионаблюдений межзвездной среды, а не из эксперимента. Наблюдения молекул CN впервые дают возможность параллельно проводить оптические и радионаблюдения одной и той же молекулы, и сравнение радионаблюдений излучения CO и CN позволит лучше понять механизм заселения энергетических уровней этих молекул.

В июне 1970 г. Л. Снайдер и Д. Бул, используя 11-метровый радиотелескоп, обнаружили излучение молекулы цианистого водорода HC^{12}N и HC^{13}N на $\lambda\lambda$ 3,38 и 3,47 мкм соответственно. Весьма существенно, что в лабораторных условиях реакции с участием молекул HCN играют важную роль в образовании простых аминокислот, пуринов и пиримидинов. Хотя HCN обнаружен лишь в нескольких источниках, вполне возможно, что улучшение методов наблюдений в миллиметровом диапазоне значительно расширит число источников межзвездного цианистого водорода.

Во время поисков HCN в некоторых радиоисточниках была обнаружена молекулярная эмиссия на λ 3,36 мкм. Источник ее в настоящее время неизвестен, хотя эта молекула не редкость в межзвездной среде и интенсивность ее линий сравнима с интенсивностью линий HCN. Открытие этой молекулы еще раз свидетельствует, что межзвездные облака — это подлинные химические «фабрики» экзотических соединений.

В июне 1970 г. Дж. Кэрретерс (Годдардовский центр космических исследований) сообщил об обнаружении межзвездного молекулярного водорода при помощи ракетного УФ спектрометра². Он нашел 8 колебательных переходов лаймановской резонансной серии H_2 в области 1000—1120 Å. Это — первая за три десятилетия межзвездная молекула, найденная не с помощью радиометодов.

Несколько попыток обнаружения пониженого молекулярного водорода H_2^+ окончились безрезультатно.

В июле 1970 г. Тернер на 42-метровом радиотелескопе Национальной радиосерватории обнаружил цианэтилен HC_2N на λ 3,30 см. Эта молекула была обнаружена в радиоисточнике Стрелец А (галактический центр), где имеются также OH, CO, NH_3 , H_2O и H_2CO . Правда, HCN там не обнаружен, и это непонятно ввиду явного химического сходства между HCN и HC_2N .

Недавно появилось сообщение об открытии межзвездных молекул муравьиной кислоты HCOOH ³. 10 июня 1970 г. группа из Гарвардского университета (Готтлиб, Болл, Лилли и Рэффорд) сообщила об открытии излучения молекул метанола (древесного спирта) CH_3OH в направлении на галактический центр посредством 42-метрового радиотелескопа в Грин Банк (см. 4).

* * *

Молекулы можно условно представить в виде роя орбитальных электронов и центральной сердцевинки, состоящей из взаимодействующих ядер атомов, входящих в состав молекулы. Сердцевина молекулы может колебаться и вращаться, а электроны обращаются вокруг нее по замкнутым орбитам.

В общем движение легких электронов происходит с большей частотой, чем колебания сердцевинки, а последние в свою очередь характеризуются большими частотами, чем вращения сердцевинки.

Квантованные состояния молекул характеризуются различными энергетическими уровнями; переход молекулы с одного уровня на другой определяется поглощением или излучением квантов излучения в соответствии с формулой Планка $\Delta E = hf$. Частоты в УФ и видимой областях спектра (фотоны $\lambda\lambda$ 2000—8000 Å или волновые числа от 50 000 до 13 000 см^{-1}) соответствуют изменениям электронных орбит. Близкие и средние ИК частоты обычно порождаются изменениями колебательных уровней молекулярных ядер; они отвечают фотонам с волновыми числами от 13 000 до 1000 см^{-1} .

Для далеких ИК и радиопереходов характерны волновые числа меньше 1000 см^{-1} ; обычно они вызываются вращательными переходами. Однако в радиочастотном диапазоне могут стать существенными возмущения, вызывающие расщепление вращательных уровней. Примером может служить Λ -удвоение в спектре молекул OH и связанные инверсионные колебания в молекулах аммиака.

За исключением молекул H_2 , все обнаруженные до сих пор межзвездные молекулы имеют постоянные электрические дипольные моменты. При этом существенно, являются ли запрещенными или разрешенными переходы в межзвездных молекулах, которые мы пытаемся обнаружить.

Изучение обилий различных молекул в межзвездном пространстве может дать ценные сведения о химической эволюции межзвездных облаков газа. Тем самым откры-

вается новая область химии, характеризующейся крайне слабыми концентрациями (порядка 1 молекулы на 1 см^3) и низкими температурами (ниже 100°K). В этом разреженном газе распределены твердые частицы микронных размеров, состоящие в основном из углерода с различными конфигурациями решетки. По-видимому, межзвездные молекулы в основном образуются на поверхности этих частиц, а затем переходят в окружающее пространство под действием радиации или соударений ⁴.

Интерпретация наблюдаемых обилий молекул еще во многом противоречива. Приходится принимать во внимание эффекты насыщения, если межзвездные облака состоят из набора маленьких плотных облачков с различными скоростями вдоль луча зрения.

Если мы наблюдаем неразрешенную картину от такого комплекса, то истинная оптическая толща может оказаться много больше наблюдаемой величины, и вычисленная плотность является лишь нижним пределом. Возможно, именно этим объясняется аномалия, обнаруженная в Стрельце А (галактический центр). Наблюдения дают отношения обилий $\text{C}^{12}/\text{C}^{13} = 10$, тогда как земное значение равно 89. Это несоответствие можно устранить, предположив, что истинная оптическая толща в C^{12} равна 10, а не 0,1, и только 10% расположенного дальше источника непрерывного радиоизлучения покрывается облаками формальдегида.

Другая трудность вытекает из определения температуры межзвездного облака. Облака обычно не находятся в тепловом равновесии, и молекулы подвергаются действию как излучения с температурой 3°K в областях, удаленных от звезд, так и кинетической температуры порядка 100°K . При низких межзвездных плотностях столкновения редки и определяющим фактором распределения населенностей различных энергетических уровней будет радиация. Но в плотных облачках столкновения могут стать преобладающим механизмом, обеспечивающим «накачку» формальдегидного «холодильника» и, возможно, мазерное излучение OH и H_2O . Любопытно, что наблюдаемые обилия молекул в межзвездной среде теснее связаны между собой, чем предсказанные значения на основе известных космических обилий элементов.

Хотя эта связь меняется от источника к источнику, химия межзвездной среды явно благоприятствует реакциям, при которых образуются органические молекулы H_2CO , CO , HCN и CN по сравнению с реакциями, образующими OH и NH_3 . Существуют и аномалии. Так, обилие CO особенно высоко в Орионе, а аммиак и цианатилен обнаружены только в галактическом центре. Наиболее сложны данные для обилий водяного пара и формальдегида.

В дальнейшем наблюдения формальдегида помогут составить карты некоторых районов Галактики. В некоторых облаках молекулы могут сыграть роль локальных «термометров» и помочь определить их температуры. После разрешения проблемы определения обилий мы можем многое узнать о химических реакциях и даже синтезе

Обилие молекул ($\text{OH} = 1$)

Молекула	Наблюдения	Предсказания	Молекула	Наблюдения	Предсказания
CO	1000	1/3000	CN	1	1/30 000
OH	1	1	H_2O	1/10	1/3000
NH_3	1	1/10	HCN	1/30	1/30 000

Отношения обилий элементов

$\text{O} : \text{H}$	$7 \cdot 10^{-4}$
$\text{N} : \text{H}$	$9 \cdot 10^{-5}$
$\text{C} : \text{H}$	$3 \cdot 10^{-4}$

молекул в отдельных межзвездных облаках. Наконец, в межзвездном пространстве могут возникнуть молекулы, неизвестные в лаборатории.

Особенно интересен вопрос о химической эволюции Галактики. Межзвездный газ может содержать аминокислоты, такие, как глицин и аланин. Сегодня возражения против существования в межзвездном пространстве «облаков жизни» уже не так сильны, как два-три года назад.

Л. В. Самсоненко

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. E. S n y d e r, D. B u h l, Sky and Telescope 40 (5), 267 (1970),
2. J. C a r r u t h e r s, Sky and Telescope 40 (3), 139 (1970).
3. IAU Circular No. 2268.
4. L. E. S n y d e r, D. B u h l, Sky and Telescope 40 (6), 348 (1970).