Том 112, вып.

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.152.2(023)

МОЛЕКУЛЫ И ПЛОТНЫЕ ОБЛАКА В МЕЖЗВЕЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ *)

Д. Рэнк, Ч. Таунс, У. Уэлч

Недавно открытое в межзвездной среде широкое разнообразие молекул, включая сложные органические образования, показывает, что она должна иметь более богатый состав, чем это предполагалось на основании прежних наблюдений. Незадолго перед 1940 г. было обнаружено в ультрафиолетовой части спектра излучение двухатомных молекул СN, CH и CH⁺. Молекула гидроксила была найдена в 1963 г. по ее излучению в радиодиапазоне на волне длиною 18 см. После обнаружения радиоизлучения от многоатомной молекулы аммиака в конце 1968 г. радиообсерватории посвятили значительное время поискам других молекул. Список обнаруженных к настоящему моменту молекул вырос почти до 20, включая CN, CH, CH⁺, H₂, OH, NH₃, H₂O, H₂CO, CO, CS, SiO, OCS, HCN, CH₃CN, HNCO, HC₃N, HCOOH, CH₃OH. NH₂HCO и по крайней мере одну неидентифицированную молекулу **). Молекулы водорода были открыты по их излучению в далекой ультрафиолетовой области с помощью ракетной техники, другие новые молекулы — на радиотелескопах.

Эти открытия имеют непосредственное отношение ко многим интересным вопросам и поднимают также другие вопросы. Они, несомненно, доставляют нам новые знания о строении Вселенной. Кроме того, изучение возбуждений и распространенностей молекул, хотя их очень немного. в среднем менее одной миллионной доли количества нейтрального водорода, дает важные сведения о современных физических условиях и об истории газовых и пылевых облаков в межзвездном пространстве. Некоторые молекулы могут также играть важную роль в радиационном охлаждении этих облаков. Кроме того, желательно знать, как образуются молекулы и каково их время жизни. Выбрасываются ли они из звездных атмосфер, образуются ли в результате последовательных парных столкновений или в химических реакциях внутри пылинок? Если имеет место последняя возможность, каким образом они покидают пылинки? Исследование состояний возбуждения этих молекул дает нам информацию об интенсивности излучения в их окрестности. Наконец, эти наблюдения имеют интересную связь с биологией. Смеси таких молекул, как H₂O, HCN, NH₃ и H₂CO, являются обычными отправными точками в простейших земных

^{*)} D. M. R a n k, C. H. T o w n e s, W. J. W e l c h, Interstellar Molecules and Dense Clouds, Science 174 (4041), 1083 (1971). Перевод и примечания С. В. Буланова. Д. Рэнк и Ч. Таунс—сотрудники физического отдела, У. Уэлч—сотрудник Радиоастрономической лаборатории и Отдела электротехники и вычислительной техники Кониссирии и Симана составлятия и сама и

Калифорнийского университета в Беркли, США. **) В последнее время были открыты следующие молекулы: H₂CS ¹⁰⁷*, H₂S ¹⁰⁸*, CH₂NH ¹⁰⁹*.

экспериментах по исследованию возможных процессов, в которых может образоваться жизнь. В таких экспериментах HC₃N и HNCO — типичные важнейшие составляющие, могущие играть роль в будущих синтезах. Хотя межзвездные молекулы и не могут выжить при рождении Солнечной системы и, следовательно, не могут находиться с самого начала в первозданных планетных атмосферах, то обстоятельство, что такие молекулы могут образовываться в явно «враждебной» им межзвездной среде, поддерживает точку зрения о том, что они (и более сложные молекулы) могут легко быть образованы в планетных атмосферах.

Прежде чем подробно обсуждать эти последние открытия, было бы полезно напомнить некоторые общие свойства межзвездной среды. После звезд нейтральный водород является важнейшей составляющей галактики. Его средняя концентрация во всей галактике равна приблизительно одному атому на кубический сантиметр. В больших масштабах газ и звезды организованы в спиральную структуру подобно спиралям большой галактики в Андромеде. Спирали вращаются как целое вокруг центра Галактики, хотя и не подобно вращению твердого тела. Скорость вращения на расстоянии, на котором находится Солнце от галактического центра, составляет около 250 км/сек.

В меньших масштабах распределение материи нерегулярно. Газ и пыль концентрируются в относительно холодные, плотные облака, окруженные менее плотным и более горячим газом. Облака занимают 5 или 10% объема нашей галактики. Между облаками имеются значительные различия: размеры варьируют, возможно, от 0,1 до 50 световых лет, а концентрации газа — от 10 до более чем 10^5 см⁻³. Кинетические температуры изменяются в интервале от 20 до 200° К внутри большинства облаков. Турбулентные скорости имеют значения от нескольких десятков метров в секунду до приблизительно $20 \ \kappa m/се\kappa$. Пылинки имеют маленькие размеры, порядка нескольких десятых микрона, и неопределенный состав. Обычно около одного процента массы облака содержится в пыли, в силу чего одна пылинка приходится на каждые 10^{12} молекул водорода. Концентрация атомов газа между облаками порядка $0,1 \ cm^{-3}$, с температурами в интервале от 100 до 1000 °К или выше, усредненная по всей галактике электронная концентрация равна приблизительно $0,05 \ cm^{-3}$, но может быть значительно выше в менее плотных районах. Средняя концентрация тяжелых атомов равна $10^{-3} \ cm^{-3}$ или меньше.

Не существует единой температуры описывающей галактическое поле излучения. В основном излучение состоит из двух главных компонент: света звезд и изотропного микроволнового фона. Свет звезд имеет цветовую температуру порядка 10 000 °K, но его интенсивность равна интенсивности излучения черного тела с этой температурой, уменьшенной в 10¹⁴ раз. Фоновое излучение, обычно интерпретируемое как оставшееся в наследство от начальных стадий развития Вселенной, лежит в основном в микроволновом диапазоне и соответствует приблизительно излучению черного тела с температурой 2,7 °K. Обе компоненты имеют приблизительно одинаковую плотность энергии.

Галактика также наполнена высокоэнергетичными частицами или космическими лучами. Это в основном протоны и тяжелые ядра с энергиями до 10²⁰ эв на нуклон и с энергетическим спектром, близким к степенному для энергий больше нескольких миллионов электрон-вольт. Плотность энергии всех этих частиц около 10⁻¹² эрг·см⁻³ и сравнима с плотностью энергии электромагнитного излучения. Основная часть энергии космических лучей содержится в частицах малых энергий. Ультрарелятивистские электроны космических лучей, вращаясь в магнитных полях средней напряженности в несколько микрогаусс, излучают синхротронным образом. Это — общее излучение Галактики в радиодиапазоне с длинами волн больше ~ 30 см.

Наиболее яркие звезды с поверхностными температурами больше 1000 °К излучают достаточно ультрафиолетового света, чтобы полностью ионизовать водород в их окрестностях. Эти ионизованные районы — так называемые HII-области — часто представляют собой протяженные диффузные туманности, заметные на фотографиях Млечного Пути. Одна из самых ярких — Большая туманность в Орионе. Она выделяется на фоне темного пылевого облака, заслоняющего свет от лежащих за ней звезд. В направлении этой туманности можно найти излучение большинства из ранее открытых молекул.

Различные селективные эффекты, как естественные, так и искусственного происхождения, влияют на изучение межзвездных молекул. Наблюдатель должен преодолевать многие природные условия. Во-первых, то, что земная атмосфера прозрачна только для части электромагнитного спектра. Атмосферные газы обрезают прохождение на длинах волн вне интервала от 3000 до 10 000 Å «окна прозрачности» для видимых лучей. Прохождение инфракрасного излучения довольно хорошее в ряде полос между 1 и 14 мкм. Атмосфера довольно непрозрачна для длин волн от 14 мкм до 1 мм. В области длин волн от 1 мм до нескольких метров, где атмосфера становится непрозрачной, пропускание излучения хорошее, за исключением нескольких специфических интервалов, где существенно поглощение молекулами кислорода и водяного пара. До сих пор большинство наблюдений проводится с поверхности Земли и должно использовать эти «окна». Современное развитие методов наблюдений, использующих ракеты, баллоны и спутники, начало делать доступной оставшуюся часть спектра.

Различные молекулярные переходы расположены в характерных участках спектра: электронные переходы в видимой и ультрафиолетовой областях, чисто колебательные переходы в инфракрасной и чисто вращательные переходы в основном в далекой инфракрасной и ультрамикроволновой областях. На более длинных радповолнах наиболее важны переходы в сверхтонкой структуре, в А- и К-дублетах. Так как столкновения с частицами и фотонами происходят не часто, молекулы или атомы обычно находятся в невозбужденном состоянии, кроме Н II-областей. Таким образом, электронный переход можно заметить только по линии поглощения, производимой облаком в свете звезд, находящихся за ним. С другой стороны, переходы в сверхтонкой структуре, возникающие между уровнями вблизи основного состояния, могут давать заметное общее микроволновое излучение молекулярного облака. Другая трудность в изучении молекул в видимой части спектра — это общее ослабление (экстинкция) света звезд пылью, особенно в ближней ультрафиолетовой области. Из-за этого трудно наблюдать объекты, удаленные на расстояния больше 3000 световых лет. Инфракрасные и радиоволны не так подвержены влиянию пыли, поэтому на всех волнах длиннее, чем ближние инфракрасные, можно изучать облака в более удаленных районах галактики. С другой стороны, более длинные волны обычно обеспечивают худшее угловое разрешение. Типичный радиотелескоп дает очень размытые картины пространственных

Излучение обычных звезд в радиодиапазоне слишком слабо для того, чтобы быть замеченным на среднем радиотелескопе. По этой причине для изучения поглощения в облаках используются такие источники, как находящиеся за облаками протяженные остатки сверхновых, области Н II или общее фоновое синхротронное излучение. У этих источников яркостная температура понижается с уменьшением длины волны. На волнах короче ~ 1 см имеется всего несколько источников и с интенсивностью, достаточной для того, чтобы быть использованными в качестве фоновых источников для наблюдений поглощения. Следовательно, в диапазоне между 1 см и 1 мм, где лежит много интересных вращательных переходов, можно изучать только те молекулярные переходы, которые достаточно возбуждены, чтобы давать заметное излучение. Неудивительно, что большинство открытий молекулярных линий стало возмож-

Неудивительно, что большинство открытий молекулярных линий стало возможным в последние годы после усовершенствований радиотелескопов, в особенности на коротких волнах. Важную роль сыграли как повышение чувствительности приемников, так и развитие коротковолнового спектроскопического оборудования.

Часто только одна или несколько спектральных линий данной молекулы наблюдается в радиодиапазоне. Однако общее число молекулярных линий с подходящей интенсивностью и степенью определенности, с которой их частоты могут быть измерены, обычно оставляет мало сомнения в достоверности идентификации обусловливающих их видов молекул, если только сигнал в линии достаточно силен и ясно обнаруживается на фоне шума. В результате обширных лабораторных исследований, проводившихся в течение последних 25 лет, были идентифицированы и каталогизированы ¹ микроволновые спектры большинства относительно простых молекул с заметным давлением паров. Вследствие этого известно около 10 000 линий на октаву частот в наиболее исследованном микроволновом диапазоне. Межзвездные линии обычно измеряются с точностью около одной двадцатитысячной и иногда более точно. Это означает, что не более чем одна или две известные частоты могут случайно совпадать с измеряемой частотой таким образом, что это приведет к путанице в идентификации источника линии. Кроме того, огромное большинство молекулярных линий, известных из лабораторных исследований, обусловлено очень редкими в межзвездном пространстве или почти в любом другом месте молекулами. Далее, идентификация облегчается тем фактом, что многие из линий возникают тесно расположенными или связанными группами, ассоциируемыми со сверхтонкой структурой (см. ниже рис. 2, д), вращательно-колебательными взаимодействиями или линиями редких изотопов. Таким образом, присутствие одной такой линии наряду с другими родственными линиями или без них дает другой легкий критерий для идентификации. Вообще обнаружение отдельной линии, интенсивность которой в достаточной мере превышает уровень шумов, соответствующей известному молекулярному резонансу, делает возможной идентификацию, которая вряд ли может подвергаться сомнению. Часто находят более чем одну линию, ассоциируемую с данной молекулой. В этом случае идентификация, даже на основании одних частотных критериев, обычно неоспорима. В обсуждавшихся до сих пор случаях нет неопределенности из-за близкого совпадения молекулярных линий. Исключение составляют NH2HCO, чьи линии более или менее совпадают с рекомбинационными линиями водорода, и НСООН, чей резонанс близок к резонансам ¹⁸ОН. Так как переходы молекулы ¹⁸ОН также обнаружены, линии НСООН, очевидно, различимы.

ОПТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ МОЛЕКУЛ

В конце 30-х годов Данхэм и Адамс² в Маунт Вилсон наблюдали в ультрафиолетовой области с высоким разрешением излучение рядаярких голубых звезд и обнаружили несколько отчетливых межзвездных линий поглощения. Эти линии впоследствии были идентифицированы с молекулами CH⁺, CH и CN ³⁻⁵. Это были первые сведения о молекулах в межзвездной среде. Хотя линии были слабыми, Адамс смог зарегистрировать их в 25% 300 ярких звезд, которые он наблюдал в разных направлениях. Это указывало на широкую распространенность таких молекул.

Ранние идентификации основывались по крайней мере на двух линиях для каждой двухатомной молекулы. Впоследствии были обнаружены другие предсказанные линии. Лучевые допплеровские скорости молекул находятся в близком соответствии со скоростями атомов натрия и кальция в межзвездной среде перед каждой звездой. Это указывает на то, что атомы и молекулы сосуществуют в одном и том же месте. Атомные линии сильнее, и когда они наблюдаются с очень высоким разрешением ⁶, то разделяются на несколько компонент с разными длинами волн. Обычно эти компоненты интерпретируются так, что они представляют различные допплеровские скорости дискретных облаков вдоль луча зрения.

Намного больше звезд указывает на поглощение молекулами СН и СН⁺, чем молекулой СN. Это не является неожиданным, так как водород приблизительно в 10⁴ раз более распространен в космосе, чем азот. Однако в тех звездах, которые указывают на поглощение молекулой СN, поглощение этой молекулой сравнимо с поглощением молекулой СН, и так как силы осцилляторов соответствующих переходов близки, распространенности сравнимы ⁷. В этих случаях доминирующую роль в определении молекулярных распространенностей должны играть химические условия внутри облака. Числа молекул на луче зрения обычно 10^{12} см⁻² как для СН, так и для СN. Следовательно, средние молекулярные концентрации в пространстве между Солнцем и звездой обычно равны 10^{-9} см⁻³. Если принять во внимание тот факт, что газ находится главным образом в облаках, концентрации в облаках приблизительно равны 10^{-8} см⁻³.

Присутствие пыли в межзвездной среде непосредственно заметно из-за покраснения света звезд вследствие рассеяния на частицах пыли. В целом для большинства звезд силы молекулярных линий коррелируют с величиной покраснения. Это означает, что имеется корреляция между количеством пыли и молекул и что пыль, вероятно, находится в облаках, содержащих молекулы. Есть, однако, близкие к Солнцу звезды, в которых покраснение невелико, но имеются следы межзвездных молекул CH⁺ и CH. В этих случаях относительные скорости между звездами и молекулярными облаками наводят ца мысль, что облака близки к этим звездам и могут даже окружать их.

За одним исключением, молекулярное поглощение происходит вследствие электронных переходов из основного состояния в различные возбужденные колебательные состояния. Это является доказательством общего закона возбуждения уровней межзвездной материи. Исключением является молекула СN, у которой переходы происходят из первого возбужденного вращательного состояния, лежащего на 3,78 см⁻¹ выше основного вращательного состояния. Из отношения интенсивностей линий возбужденных и основных состояний, которые Адамс наблюдал в звезде ζ Змееносца, Мак-Келлар ⁵ вывел вращательную температуру 2,3° К для межзвездной среды ⁴. Значение этой температуры не было полностью оценено до тех пор, пока в 1965 г. Пензиасом и Уилсоном ⁸ не было открыто универсальное микроволновое 2,7 °К-фоновое излучение. Филд и Хитчкок⁹ и Клаузер и Таддеус¹⁰ пересмотрели возбуждения в ζ Змееносца и в ряде других звезд и нашли общее согласие между вращательными температурами и температурами из непосредственных микроволновых измерений¹¹. Вращательные температуры молекулы СN являются мерилом фонового поля излучения на волне длиной 2,6 *мм*.

Дальнейшие исследования в оптических спектрах звезд не дали дополнительных резких линий, которые могли бы быть идентифицированы со спектральными линиями таких простых молекул, как ОН или NH¹². Одно исключение, возможно, имеет место в последних исследованиях Бортоло и Таддеуса¹³: в спектре ζ Змееносца слабая линия слегка смещена от линии ¹²CH⁺. Авторы приписывают ее соответствующей линии ¹³CH⁺ и выводят для изотопического отношения ¹²C: ¹³C значение, приблизительно равное 82. Это отношение близко к земной величине.

В 1936 г. Мерилл¹⁴ сообщил об обнаружении широкой диффузной межзвездной линии или полосы с длиной волны 4427 Å¹⁵. Впоследствии много таких деталей было обнаружено с помощью исследования излучения с различными длинами волн. Хотя был выдвинут ряд предположений, полностью удовлетворительной идентификации для любой из этих деталей еще не было сделано. Герцберг¹⁶ предположил, что они могут быть обусловлены молекулой какого-нибудь вида с уширенными предиссоциацией резонансами. Джонсон¹⁷ нашел, что некоторые из этих резонансов соответствуют частотам молекулы порфирина, хотя еще не ясно, может ли быть эта молекула ответственна за наблюдаемые спектры.

С помощью ракетной техники, позволяющей проводить внеатмосферные наблюдения в дальней ультрафиолетовой части спектра, недавно стало возможным обнаружение ультрафиолетового поглощения молекулами водорода H_2 и окиси углерода СО. Каррузерс ¹⁸ наблюдал звезды є и § Персея и заметил сильное поглощение лаймановскими резонансными полосами молекулы H_2 у второй звезды. Он вывел, что число молекул водорода на луче зрения равно $4 \cdot 10^{19} \ cm^{-2}$. У первой звезды поглощение молекулой H_2 незаметно. В направлении звезды, у которой замечен молекулярный водород, ослабление звездного света, предположительно пылью, составляет около 75% по сравнению с 25% для другой. Это указывает на ожидаемую корреляцию между присутствием молекул H_2 и количеством пыли.

Смит и Стечер ¹⁹ сообщили об обнаружении поглощевия ультрафиолетового излучения межзвездной окисью углерода в направлении одной звезды, ζ Змееносца. Они оценили число молекул СО на луче зрения в ~ 7 ·10¹⁵ молекул/см². Это намного превышает концентрации СN или CH, но на несколько порядков меньше наблюдаемой в радиодиапазоне величины в направлении, например, туманности Ориона. Они также обнаружили молекулу ¹³С¹⁶О и получили для отношения изотопов ¹²С : ¹³С значение порядка 105, близкое к земной величине.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ РАДИОЛИНИИ

Не прошло и 25 лет после обнаружения молекулярных линий в оптическом диапазоне и 12 лет после открытия линии 21 см атомарного водорода, как с помощью радиотелескопа была обнаружена в межзвездной среде первая молекула гидроксила — ОН. В 1963 г. Вейнребом и др.^{20а} в направлении ряда галактических источников непрерывного радиоизлучения были обнаружены линии с длиною волны 18 см, соответствующие поглощению между Λ -дублетами основного состояния молекулы ОН. Молекулы аммиака были открыты Чеунгом и др.²⁰⁶ в наблюдениях эмиссионных линий с длиной волны 1,25 см. После этого список наблюдаемых

Таблица I

Наблюдаемые микроволновые резонансы межзвездных молекуд (тяпы переходов обозначены так: А для А-дублета, ID—для инверсионного дублета и R—для вращательных переходов; знак плюс означает, что обнаружена сверхтонкая структура; излучение и поглощение обозначены как Е и А соответственно)

Год обна- руже- ния	• Молекула	Вращательные квантовые числа	Тип пере- хода	Частота, Ггц	Сверх- тонкая струк- тура	Спектр	Лите- ратура
1963 1969 1970 1968 1969	¹⁶ OH (² π _{3/2}) ¹⁶ OH (² π _{1/2})	$egin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	Λ Λ Λ Λ	$1,665 \\ 6,035 \\ 13,441 \\ 4,766 \\ 8,136$	++++	E, A E E E E	20a, 78 79 80 81 82
1966 1968	¹⁸ ОН (² π _{3/2}) 14NH ₃ (цара) (пара) (орто) (пара) (орто)	$J = \frac{3}{2}$ $(J, K) = 1, 1$ $= 2, 2$ $= 3, 3$ $= 4, 4$ $= 6, 6$	Λ ID ID ID ID ID	$\begin{array}{r} 1,637\\ 23,694\\ 23,723\\ 23,870\\ 24,139\\ 25,056\end{array}$	-]-	A E E E E	5 200,83 83 83 83 83 83
1969	H ₂ ¹⁶ O (орто) H ₂ ¹² C ¹⁶ O (орто)	$J_{K_{-1}K_{1}} = 5_{23} - 6_{16}$ $J_{K_{-1}K_{1}} = 1_{11} - 1_{10}$ $= 2_{12} - 2_{11}$ $= 3_{13} - 3_{12}$ $= 4_{13} - 3_{12}$	R R R R B	22,235 4,830 14,488 28,974	+	E A, E A A F	84 85 86 87 88
1969 1970 1971	$\begin{array}{c} H_2^{-12}C^{16}O & (0p10) \\ H_2^{12}C^{16}O & (napa) \\ H_2^{12}C^{16}O & (opto) \\ H_2^{13}C^{16}O & (opto) \\ 12C^{16}O \\ 13C^{16}O \end{array}$	$\begin{array}{c} -111 - 212 \\ = 1_{01} - 2_{02} \\ = 1_{10} - 2_{11} \\ = 1_{11} - 1_{10} \\ J = 0 - 1 \\ J = 0 - 1 \end{array}$	R R R R B	140,835 145,603 150,489 4,593 145,271 140,204	Нет	E E A E E	89 89 90 91 92
1970	12 <u>С</u> 18О 12 <u>С</u> 14 <u>N</u> H12 <u>С</u> 14 <u>N</u> H13 <u>С</u> 14 <u>N</u> Х-молекула	J = 0 - 1 J = 0 - 1 J = 0 - 1 J = 0 - 1 J = 0 - 1	R R R R	$\begin{array}{c} 110,201\\ 109,782\\ 113,492\\ 88,632\\ 86,339\end{array}$	Нет + + +	E E E E	92 93 94 94
1971	(неизвестна; возможно, НСО ⁺) H ¹² C ₃ ¹⁴ N ¹² CH ₃ ¹⁶ OH ¹² CH ₂ ¹⁶ OH	$J = 0 - 4$ $J_{K-1K_1} = 1_{14} - 1_{10}$ $(JK) = 4, 1 - 4, 2$	R R B	89,190 9,098 0,834 24,933	+	E E E E	95 96 97 98
1970	H12C16O16OH	$ \begin{array}{c} =5,1-5,2\\ =6,1-6,2\\ =7,1-7,2\\ =8,1-8,2\\ J_{K-4K_4}=1_{44}-1_{10} \end{array} $	R R · R R R	$\begin{array}{r} 24,959\\ 25,018\\ 25,125\\ 25,294\\ 1,639\end{array}$		E E E E	99 98 98 98 98 100
1971	¹² C ³² S ²⁸ Si ¹⁶ O ¹² CH ₃ ¹² C ₂ H (opto) H ¹⁴ N ¹² C ¹⁶ O	J = 2 - 3 J = 2 - 3 J = 2 - 3 (J, K) = 4,0 - 5,0 $J_{K-1}K_1 = 3_{03} - 4_{04}$ $= 0_{02} - 1_{04}$	R R R R B	146,969 130,268 85,457 87,925 21,982	Нет Нет	E E E E	101 99 102 102 102
	16O12C32S 12CH ₃ 12C14N (орто) (пара) (пара) (орто) (пара) (пара)	$ \begin{array}{c} 1 = 8 - 9 \\ J = 8 - 9 \\ (J, K) = 5,0 - 6,0 \\ = 5,1 - 6,1 \\ = 5,2 - 6,2 \\ = 5,3 - 6,3 \\ = 5,4 - 6,4 \\ = 5,5 - 6,5 \end{array} $	R R R R R R R	$\begin{array}{c} 109,463\\ 110,384\\ 110,384\\ 110,381\\ 110,375\\ 110,364\\ 110,349\\ 110,330\\ \end{array}$	Нет	EEEEEE	103 104 104 104 104 104 104
	Х ₂ (неизвестна; возможно, HNC)			90,665		E	102

.

молекулы и плотные облака в межзвездном пространстве 331

Год обна- руже- ция	Молекула	Вращательные квантовые числа	Тип пере- хода	Частота, Ггц	Сверх- тонкая струк- тура	Спектр	Лите- ратура
	$14 { m NH}_2 { m H}^{12} { m C}^{16} { m O}$	$J_{K-1K} = 2_{12} - 2_{11}$	R	4,619		Е	105
	$CH_{3}HCO$	$J_{K-1K} = 1_{11} - 1_{10}$	R	1,065		Е	106
1972	H_2S	$J_{K_{-1}K} = 1_{11} - 1_{10}$	R	168,7		E	108*
	CH_2NH	$J_{K_{-1}K} = 1_{11} - 1_{10}$	R	5,29		E	109*
1973	² HCN	J = 0 - 1	R	72.4	+	E	110*
	· · ·]	•		

Продолжение табл. І

на радиотелескопах молекул расширялся и даже с увеличивающейся скоростью. В табл. I представлены молекулярные резонансные линии в радиочастотном диапазоне, которые наблюдались в нашей галактике до середины 1971 г. Было открыто приблизительно 50 линий излучения молекул по крайней мере девятнадцати видов. По-видимому, были обнаружены еще две линии с длиной волны 3 мм. Для них нет еще определенной идентификации ^{95, 102}. Одна из них, до тех пор пока не будет найдена подходящая идентификация, была обозначена как Х-молекула. Предполагают, что это короткоживущий и редкий в лабораторных условиях радикал или молекула, поэтому его спектр до сих пор еще не известен. Вторая неидентифицированная линия, похоже, не коррелирует с первой в распределении интенсивности и, по-видимому, принадлежит молекулам отличного от других вида. Частоты этих молекулярных резонансов покрывают почти весь диапазон радиочастот между 36 см и 2 мм. Хотя в табл. I много простых молекул, таких, как OH, CO и CN, в ней приведено также в достаточном количестве довольно сложные молекулы, такие. как HC₃N и CH₃OH.

Частота межзвездной линии может быть измерена очень аккуратно. Это позволяет легко обнаружить маленькие сдвиги в частотах из-за эффекта Допплера. Большинство нормальных межзвездных радиолиний имеет ширину около 10-4-10-5 от их частот. Следовательно, легко обнаружимы такие маленькие допплеровские смещения, как 10-5 от скорости света, или 1 км/сек. Это делает возможным точные определения лучевых скоростей молекулярных газовых облаков в галактике. Скорости таких облаков по отношению к Солнцу колеблются в пределах вплоть до нескольких сотен километров в секунду. Вообще спиральные рукава в галактике стремятся вращаться приблизи-тельно однородно. Следовательно, можно связать в модели однородного вращения галактики расстояния с лучевыми скоростями, измеряемыми в некоторых направлениях. Помимо этого общего движения, каждое отдельное облако имеет собственную характерную скорость по отношению к вращающейся галактике. Таким образом, допплеровский сдвиг или смещение частоты резонансной линии от ее лабораторного значения может быть связано с отдельными газовыми облаками и их распределением в нашей галактике. В принципе это допплеровское смещение может давать некоторую неопределенность в молекулярной частоте и, следовательно, в ее идентификации. Однако смещения не очень велики и обычно достаточно хорошо известны из других линий, найденных в этой же области пространства.

На рис. 1 показаны спектры излучения нескольких молекул, обпаруженных в направлении на центр нашей галактики. Рис. 1, з — спектр 21-см поглощения нейтрального водорода перед сильным радиоисточником Стрелец А, расположенным в центре нашей галактики. Центральная область, или ядро, галактики может быть ответственна за поглощение при 0 км/сек (нет лучевой скорости). Это может быть следствием просто присутствия очень близкого газа. Возможно, последний случай представляют более сильные линии поглощения с небольшими допплеровскими «мещениями. Детали при 55 км/сек и, возможно, также при — 30 км/сек производятся пересечением двух спиральных рукавов с нашим лучом зрения на галактический центр. Из рис. 1 непосредственно видно, что наиболее сильные линии в молекулярных спектрах Стрельца А не находятся в соответствии с тремя сильнейшими линиями в спектре атомарного водорода. В то время как молекулы ОН и H₂CO обладают определенной





Рис. 1. Спектры микроволнового излучения в направлении центра Галактики.

Шкала частот преобразована в соответствии с формулой Допплера в шкалу лучевых скоростей (V_{II}) по отношению к системе отсчета, связанной со звездами вблизи Солнца. Спектры взяты из работ: ²¹ (a), ²⁰ (b), ⁶⁰ (a), ⁹⁵ (c), ⁹⁴ (d), ⁶² (e), ⁹⁷ (ж), ²² (3). Рис. 2. Спектры микроволнового излучения туманности Ориона.

Как и на рис. 1. по горизовтали отложена лучевая скорость V_{JI} . Спектры взяты из работ: ²³ (a), ²⁴ (б), ⁸⁸ (e), ⁹³ (c), ⁹⁴ (d), ⁸³ (e), ²⁶ (ж). НП — рекомбинационная линия водоропа.

картиной скоростей, соответствующей линии 21 см в спектре водорода, большая концентрация молекул имеет место в области от 25 до 75 км/сек, где находится довольно слабая линия поглощения атомарного водорода. Это предполагает два совершенно различных типа газовых облаков. Один представим резкими линиями, сопутствующими атомарному водороду, в то время как другой указывает на заметное уменьшение интенсивности атомарного водорода по отношению к молекулярным линиям. Их типичным примером являются широкие линии при 50 км/сек на рис. 1. Отношение полного количества водорода к количеству других элементов, таких, как углерод, азот, кислород, по-видимому, одно и то же в обоих случаях. Следовательно, последний случай более благоприятен для образования молекул, где бо́льшая часть атомарного водорода заменена на молекулярный водород. В таких облаках плотность вообще значительно выше, чем в облаках, где водород в основном атомарный. Это находится в соответствии с более значительным молекулярным образованием и возбуждением. Интересно заметить, что максимумы разных молекулярных линий на рис. 1 не совпадают точно в скоростях. Этот эффект, возможно, отражает тенденцию в различиях в условиях образования и возбуждения, приводящую к излучению или поглощению различных молекул в немного отличающихся областях внутри облака.

Спектры туманности Ориона (рис. 2) снова указывают на то, что многие молекулы, такие, как СО, СN и HCN, смещены немного по скоростям относительно максимума линии 109 α *) рекомбинационного излучения водорода (рис. 2, \varkappa). Это показывает, что молекулы и ионизованный водород, по-видимому, не могут существовать в одной и той же области этого газового облака.

Вскоре после обнаружения поглощения гидроксила на волне 18 см (1966 Мгц) Уивер и др. 785 наблюдали сильные эмиссионные линии этой молекулы, ассоциируемые с областями НІІ в галактике. Детали спектра туманности Ориона (см. рис. 2) иллюстрируют этот тип излучения OH. Спектральные линии гидроксила существенно уже, чем обычные линии, обусловленные турбулентными скоростями галактических газовых облаков. Кроме того, большая часть линий обладает сильной поляризацией, высокой яркостной температурой (>10⁹ °K) и быстрыми флуктуациями интенсивности. Эти факты свидетельствуют о нетепловом распределении населенности молекулярных состояний, соответствующих инверсии населенностей и, следовательно, мазерному механизму излучения, который будет подробно обсуждаться ниже. Кроме основного состояния гидроксила, молекулы воды и некоторые возбужденные вращательные уровни гидроксила обладают мазерным излучением в астрономических источниках. До сих пор обнаруженное мазерное излучение от H₂O всегда возникает в источниках, указывающих также на мазерное излучение ОН. Излучение молекул воды из таких облаков менее поляризовано, чем излучение гидроксила, и часто более интенсивно, с яркостными температурами вплоть до 6.10¹³ °К.

Мазеры проявляются в ряде характерных наблюдательных деталей. В большинстве случаев мазерное действие ассоциируется с тремя общими классами астрономических объектов: 1) НП-области, 2) остатки сверхновых, 3) некоторые инфракрасные звезды. Мазерное излучение от ОН имеет тенденцию быть более интенсивным для линий 1665 или 1667 *Мгц* сверхтонкой структуры вблизи НП-областей и для линий 1612 *Мгц* сверхтонкой структуры в инфракрасных звездах ²⁶. Реже компонента 1720 *Мгц* может быть более интенсивной. Часто существует корреляция между допнлеровскими сдвигами, поляризациями и флуктуациями интенсизностей для возбужденных состояний гидроксила и основным состоянием для одной и той же области пространства. Флуктуации излучения H₂O могут происходить в течение недель, в то время как излучение OH флуктуирует более медленно.

Хотя гидроксил OH проявляет себя как в излучении, так и в поглощении в протяженных областях, молекула H₂O заметна только в излучении из очень маленьких, ярких источников. Это не является неожиданным, так как у молекулы воды переходы происходят между достаточно высоко возбужденными состояниями, высвечивающимися слишком быстро для того, чтобы быть в большом количестве в разреженном окружении протяженных облаков.

^{*)} α обозначает переход с уровня n+1 на уровень n. Число, стоящее перед α . обозначает главное квантовое число нижнего состояния.

Направленные на определение размеров компактных излучающих областей ОН и H_2O усилия привели, наконец, к созданию сверхдальней радиоинтероферометрии, включая континентальные и межконтинентальные основания ²⁸. Этот метод использует независимые точные, эталонные генераторы колебаний и высокоскоростные записывающие устройства на двух далеко разнесенных наблюдательных станциях. Принимаемые от данного источника сигналы независимо записываются на двух станциях. Потом их совместно обрабатывают на вычислительной машине, что дает интерферометр Майкельсона с весьма длинным основанием. Основание наибольшей длины, используемое в этих исследованиях, простиралось от Хэт Крик, Калифорния, до Онсала, Швеция ²⁷ *). Из-за того, что радиочастотные оггналы записываются на магнитную иленку, эффективное время наблюдений очень ограничено и до сих пор только несколь-ко наиболее сильных источников было детально изучено с помощью этой техники.

Наблюдения компактных областей ОН-излучения показывают следующую общую картину. В каждой области имеется одно или более скоплений компактных источников. Скопления разделены по углу несколькими десятками угловых секунд. Размер отдельного скопления обычно



Рис. 3. Карта мазерных источников H₂O в W 49.

Показаны положения источников относительно точки — 1,8 км/сек и верхние пределы неопределенности в относительном положении каждого источника (из работы Джонстона и др.²⁶). Скорость каждого источника указана в скобках. θ_x и θ_y представляют угловое смещение в направлениях увеличения прямого восхождения и склонения соответственно.

угловой равен одной секунде. Каждое скопление содержит некоторое количество источников очень малых размеров, с соответствующей каждому источнику допплеровской деталью в общем спектре излучения источника. Излучение в отдельной линии часто полностью циркулярно или линейно поляризовано. Явная корреляция между положением и лучевой скоростью источников внутри скопления отсутствует. В настоящее время абсолютные положения скоплений известны только с точностью в несколько угловых секунд, поэтому их местоположение по отношению к оптическим объектам или к другим радиоисточникам неможет быть пока точно определено. Размеры отдельных источников лежат в пределах от 0,005 до 0,05 угловой секунды. Наибольшие угловые размеры имеют источники, расположенные в наиболее удален-

ных областях. Действительные размеры источников могут быть много меньше, так как кажущиеся размеры могут быть обусловлены рассеянием 18-см излучения на неоднородностях концентрации свободных электронов в межзвездной среде **).

Источники излучения паров воды в тех же областях, что и OH-источники, обычно имеют много сходных свойств и несколько важных различий. В наиболее удаленном объекте, например W 49 около двенадцати источников с лучевыми скоростями от —15 до +15 км/сек лежат внутри окружности с угловым диаметром около 1,0 угловой секунды, как показано на рис. 3. Скорости взяты по отношению к локальной системе покоя,

,

^{*)} В работах ^{111*}, ^{112*} сообщается о наблюдениях источников мазерного излучния ОН и H₂O с угловым разрешением 0", 0002. Наблюдения проводились на 22-м радиотелескопе Крымской астрофизической обсерватории в Симеизе и на 37-м радиотелескопе Хайстекской обсерватории (Массачусетс, США). Расстояние 7350 км (см. также ^{113*}).

^{**)} Особенности мазерного механизма излучения могут приводить к тому, что видимый размер источника может быть намного меньше реального 114*.

ненодвижной относительно центра масс звезд вблизи Солнца. В этом комилексе отдельные детали пока что не разрешены, так как их угловые диаметры меньше 0,0005 угловой секунды, что соответствует линейному размеру в 8 астрономических единиц в наиболее удаленных частях этого источника. В пределах ошибок паблюдений (около 0,1 угловой секунды в данных работах) источники H₂O лежат в том же направлении, что и группа источников OH, — в направлении W 49. Яркостная температура наиболее ярких из этих деталей выше 5 ·10¹³ °K. Только один источник излучения паров воды был разрешен до сих пор — деталь в направлении туманности Ориона. Этот источник имеет угловые размеры, соответствующие на расстоянии туманности Ориона линейным размерам около 0,4 астрономической единицы. Это приблизительно размер большой звезды.

Увеличение видимых размеров источников из-за рассеяния на электронах пропорционально λ^2 , где λ — длина волны. Этот эффект, следо-

вательно, должен быть в 200 раз меньше для излучения паров воды, чем для излучения гидроксила. Меньшие размеры источников ОН в самом деле находятся в соответствии с этой интерпретацией.

Большинство этих наблюдательных результатов для ОН может быть объяснено в рамках теоретической модели, включающей в себя инфракрасное, ультрафиолетовое или столкновительное возбуждение с последующим излучением. Возможная природа таких мазеров будет обсуждена ниже.

Некоторые другие молекулы обладают нетепловыми распределениями населенности, которые не сопровождаются мазерным излучением. Имеется заметное отличие между вращательными температурами у орто- и парамолекул NH₃²⁹. В одном случае ортоаммиак приблизительно на 50 °K горячее, чем парааммиак. Очень вероятно, что эта неравновесность обу-



Рис. 4. Спектр поглощения молекулы $H_2^{12}C^{16}O(v = 4,8 \Gamma e u)$, измеренный в направлении на темное облако в галактике (из работы ³⁰).

расоты '). У этого облака нет собственного заметного излучения в континууме, следовательно, это спектр поглоцения трехградусного изотропного излучения. T_a — антенная температура, V_{π} — лучевая скорость.

словлена очень большой постоянной времени, связанной с переходом между орто- и парасостояниями. В некоторых очень плотных облаках довольно заметны возбуждения формальдегида (H₂CO). По-видимому, молекулы не находятся в равновесии с изотрошным трехградусным излучением, но холоднее его 30. Рис. 4 представляет спектр поглощения молекулы формальдегида из основного состояния в одном из таких облаков. В этом случае облако не излучает в континууме на частоте 4000 Мгц. Следовательно, молекулы должны поглощать излучение от чернотельного континуума, и эффективная температура ниже 2,7 °К. Эти наблюдения демонстрируют универсальность чернотельного излучения, по крайней мере в масштабах галактики, и излучение Н₂СО, должно быть, - очень подходящий инструмент для изучения. Спектр CH₃OH, показанный на рис. 1, ж, не был обнаружен в поглощении даже на фоне очень сильных источников излучения в непрерывном спектре, для которых фоновая температура порядка 300° К. Эта молекула также может проявляться в вынужденном излучении, хотя основания для этого неубедительны.

Распределение молекул в межзвездном пространстве явно не является хаотическим. Все обнаруженные до настоящего времени молекулы находятся внутри нашей Галактики, за исключением недавно открытого ОН в M 82 и NGC 253³¹. Распределение внутри нашей Галактики сильно концентрируется к галактической плоскости. На рис. 5 — карте небесной сферы — показаны положения всех известных сосредоточений межзвездных молекул. U-образная кривая представляет собой пересечение небесной сферы с галактической плоскостью. Очень заметна высокая концентра-



Рис. 5. Карта небесной сферы с распределением галактических источников излучения молекулярных линий.

Карта представляет собой прямоугольную проекцию координат прямого восхождения (градусы) и склонения (часы). Сплошной линией показана плоскость галактики.

ция молекул в плоскости галактики, особенно в направлении галактического центра, где концентрируется основная часть общей массы галактики. Если молекулы представляют собой местное явление и концентрируются в нашей Галактике вблизи Солнца, то их распределение по небесной сфере было бы существенно однородным и представлялось бы совершенно другой картиной на рис. 5. Так как Солнце лежит очень близко к галактической плоскости. рис. 5 дает меру расстояний от Солнца до молекулярных облаков. Чем больше расстояние от Солнца до облака, тем больше

вероятность того, что облако лежит вблизи пересечения плоскости галактики с небесной сферой. Таким образом, возможно получить грубую оценку расстояния какого-нибудь облака от Солнца, просто зная его положение на небе. Более подробную меру расстояния можно получить, сравнивая допплеровский сдвиг спектральной линии молекулы со сдвигами известных водородных линий, измеренными в том же направлении.

МОЛЕКУЛЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

Как было видно выше, наблюдение молекул и измерение их спектральных параметров дает непосредственную информацию о составе, положении и скоростях молекулярных облаков. Интерпретация измеренных нараметров в свете других знаний может дать богатую информацию о происхождении, условиях и динамике газовых концентраций в межзвездном пространстве. Информация об этих свойствах непрямая и, следовательно, менее определенная, чем об упомянутой выше первой группе свойств. Однако некоторые аспекты в интерпретации достаточно надежны и сейчас. Другая часть будет прояснена с помощью более обширных и более тщательных астрономических измерений или с помощью лабораторных исследований, в то время как другие аспекты должны еще оставаться неопределенными до тех пор, пока не будет дальнейших открытий, возможно с помощью совершенно другой техники. В любом случае наблюдения молекул в космосе, вероятно, сделают огромный вклад в астрономию в этом непрямом направлении исследований при использовании очень специфической информации, доставляемой резонансами об условиях в тех местах, где находятся молекулы. Молекулярные резонансы могут быть рассмотрены в качестве инструмента для исследования (теста) межзвездного пространства, подобно тому как ядерные резонансы после их открытия сначала стали использовать как тесты материалов, в которых находились ядра. Возможные интерпретации паблюдений молекулярных резонансов исследуются ниже. Станет ясно, что многие вопросы еще не разрешены.

Так как возбуждения молекул в межзвездном пространстве обычно не соответствуют тепловому равновесию, интенсивности линий излучения или поглощения молекул часто интерпретировать не просто; из-за этого также каждое измерение иптенсивности может давать независимую и полезную информацию. Возбужденное состояние молекулы определяется комбинацией и часто конкуренцией взаимодействий с частицами и излучением. Частипы включают в себя нейтральные молекулы, чья кинетическая энергия обычно находится в пределах нескольких десятков градусов, и электроны, которые могут быть при более высоких температурах. Излучение состоит из изотропного фонового излучения, приблизительно чернотельного излучения с температурой 2,7 °К и локального излучения в линиях или в непрерывном спектре, которое может иметь более высокую температуру. В холодных пылевых облаках взаимодействия с изотропным излучением и столкновения с нейтральными молекулами определенно имеют место достаточно часто и достаточно сильно конкурируют между собой. Поэтому неясно, находится ли данный молекулярный резонанс в равновесии с излучением и, следовательно, при температуре 2,7 °К, или с молекулярной кинетической энергией и, следовательно, при температуре в несколько десятков градусов. В результате данная пара энергетических состояний может иметь инверсную населенность и приводить к мазерному излучению или может быть охлаждена даже ниже 2.7 °K.

Наиболее непосредственно определимая скорость релаксации мажду двумя уровнями — это скорость релаксации, обусловленной изотропным излучением, которое в комбинации со спонтанным излучением стремится привести населенность уровней молекул в равновесие с температурой излучения. Постоянная времени для релаксации $\tau_r/2$ соответствует эффективной скорости перехода

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{64\pi^4 v^3 |\mu|^2}{3hc^3 \left[1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)\right]} = \frac{8}{3h} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \frac{|\mu|^2}{1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)} , \tag{1}$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света и k — постоянная Больцмана, $|\mu|$ — матричный элемент дипольного момента молекулы для перехода, λ — длина волны, ν — частота перехода, T — температура фонового излучения, приблизительно равная 2,7 °К. Найдено, что время перехода τ_r должно быть в пределах от 10⁵ до 10¹⁰ сек или порядка нескольких лет для большинства переходов в сантиметровом диаиазоне.

Скорость перехода вследствие столкновений может быть записана в виде

$$\frac{1}{\tau_c} = \sum_m (n\sigma v)_m, \tag{2}$$

где индекс *m* указывает сорт сталкивающихся частиц, n — их концентрация, σ — эффективное сечение для данного перехода и v — средняя относительная скорость двух сталкивающихся частиц. Сечение σ применяется к отдельным переходам.

Для нейтральных молекул σ может быть просто оценено из размеров молекул и должно быть порядка 10^{-15} см², в некоторых случаях это сечение было измерено в лаборатории, и имеется достаточно точное его значение ³². Так как космическая распространенность водорода приблизительно в шесть раз выше, чем гелия, и более чем в 10^3 раз выше, чем любого другого элемента, мы можем предположить, что в основном столкновения происходят с нейтралами: атомами водорода или молекулами. Таким образом, важны только один или два члена в уравнении (2) и часто можно аппроксимировать (2)

```
10 yΦH, T, 112, B. 2
```

просто как $1/\tau_c = nv\sigma$, где n -общая концентрация частиц. Сечения для различных нейтралов различаются не очень сильно; наибольшее различие имеется, например, между NH₃ --NH₃-столкновениями, когда $\sigma = 2 \cdot 10^{-14} \ cm^2$ для 3,3-инверсной линии, и NH₃--Не-столкновениями, когда $\sigma = 5 \cdot 10^{-16} \ cm^2$. Для электронов или положительных ионов сечение сильно зависит от электромагнитных характеристик молекулы. Если она имеет дипольный момент μ , то грубая величина для сечения такова: $\sigma \approx \mu e/\hbar v$, где e — заряд и $\hbar = h/2\pi$. Для типичных в микроволновом диапазоне дипольного момента и частоты $v \ \sigma \approx 10^{-11} \ cm^2$, что значительно больше, чем сечение для нейтральных молекул.

Если переходы между верхним и нижним молекулярными уровнями происходят только вследствие столкновений с частицами с температурой T_m и излучением с температурой T_r , то эффективная температура этих двух уровней равна

$$T_{\partial \Phi \Phi} = \frac{\tau_r T_m + \tau_c T_r}{\tau_r + \tau_c} , \qquad (3)$$

здесь предположено, что $hv \ll kT$, где v — частота перехода и T — любая из температур в (3). Это предположение обычно удовлетворительно, но нуждается в модификации в нескольких интересных случаях. Относительная разность в населенностях двух уровней равна $hv/kT_{3\phi\phi}$ — это определение $T_{3\phi\phi}$. Из уравнения (3) следует, что если температура излучения молекул значительно отличается от температуры изотропной радиации (это должно иметь место для резонансов, чтобы быть заметными на фоне этого излучения), то τ_c не должно намного превышать τ_r .

Таким обрасом, наблюдение излучения молекул означает, что они не находятся в равновесии с изотропной радиацией и что столкновения достаточно часты и имеют значение.

Концентрация частиц, при которой τ_c равна τ_r , получается из уравнений (1) и (2):

$$n = \frac{64\pi^4 |\mu|^2}{3h\lambda^3 \sigma v \left[1 - \exp\left(-\frac{hv}{kT}\right)\right]} .$$
(4)

Если предположить, что типичный матричный элемент дипольного момента $\mu \approx 10^{-18}$ CGSE, сечение нейтральных молекул равно $\sigma = 10^{-15}$ см² и скорость $v = 10^5$ см/сек, получим

$$n = \frac{3 \cdot 10^3}{\lambda^3 \left[1 - \exp\left(-\frac{hv}{kT}\right)\right]}'.$$
 (5)

Для очень коротких волн микроволнового диапазона, когда $hv \gg kT$, множитель в квадратных скобках порядка единицы. Для более длинных волн он приблизительноравен hv/kT. Это отношение обычно не меньше 1/10. Уравнение (5) предполагает, что илотность молекул в пылевых облаках достаточно высока ²⁰⁶, ⁸⁹. Это в основном должен быть молекулярный водород. Кроме того, необходимая для образования эмиссионных линий концентрация медленно увеличивается с уменьшением длины волны. Из табл. II видно, что уравнение (5) применимо для нескольких особых молекул.

Таблица II

Концентрации молекул водорода, при которых равны скорости столкновительных и радиационных переходов для различных спектральных линий (см. уравнение (4); обнаружение этих линий в излучении или поглощении трехградусного изотропного излучения означает, что минимальные концентрации сравнимы с этими значениями или что имеются электроны с концентрацией, равной 10⁻⁵ части этих величин)

Молекула	Резонансная частота, Мги См~1		Молекула	Резонансная частота, Мец	Концентра- ция Н2, см-3	
H ₂ CO NH ₃	, 4829,73 1408,39 23694,48	$10^2 \\ 3 \cdot 10^5 \\ 10^3$	CO HCN	115271,2 88631,87	2.103 106	

Играют ли электронные столкновения важную роль в возбуждении большинства наблюдаемых молекулярных микроволновых переходов, полностью не ясно, хотя они, вероятно, не так важны, как столкновения с нейтралами в плотных пылевых облаках. Когда имеется немного пыли, коротковолновое ультрафиолетовое излучение и другое ионизующее излучение могут производить электроны в некотором количестве и они могут давать важный вклад в столкновения. Однако в этих облаках такая радиация диссоциирует молекулы также очень быстро. Можно ожидать, что обычно молекулы заметны только там, где ультрафиолетовое излучение экранируется пылью. Вне пылевых облаков концентрация электронов критически зависит от плохо известного спектра космических лучей в интервале энергий от 1 до 20 Мэв и концентрации молекул, на которых происходит рекомбинация электронов и ионов. Отношение концентраций

электронов и молекулярного и атомарного водорода можно найти из рис. 6. На этом рисунке представлены отношения населенностей, полученных Соломоном и Вернером ³³, как функции отношения скорости ионизации к полной концентрации частиц ζ/n . В космосе скорость ионизации ζ порядка 10-15 см-3сек-1 34. Неизвестно, чем она обусловлена, мягкими рентгеновскими лучами или космическими лучами с энергиями в несколько миллионов электрон-вольт и ниже. Мягкие рентгеновские лучи не могут заметно проникать в пылевые облака. Низкоэнергетичные космические лучи обладают большей проникающей способностью, но не могут пересекать плотные пылевые облака. Максимумы и минимумы электронных концентраций на рис. 6 получены на основании предположения, что весь углерод атомарный и ионизован или что он полностью неионизован соответственно. Так как атомарный водород имеет относительно низкую распространенность и образует молекулы, разумно предположить, что ионизован-





По горизонтали отложены: ла илжней шкале — отношение скорости ионизации $\zeta \approx 10^{-16}$ см⁻³сек⁻¹ к полной концентрации частии, на верхней шкале — полная концентрация водорода атомов и молекул (из работы ³³)

ный атомарный водород редок. Кривая отношения концентраций электронов и атомарного водорода $n_e/n_{\rm H}$ проведена на этом основании. Даже если внутри пылевого облака имеют место относительно высокие скорости ионизации, из рис. 6 следует, что наблюдаемая во многих облаках низкая концентрация атомарного водорода ($\leq 1 \ cm^{-3}$) противоречит существованию достаточно высоких концентраций электронов ($\geq 10^{-2} \ cm^{-3}$), так как электроны должны были бы быть определяющим фактором при возбуждении молекул при столкновениях. Скорее плотные облака, по-видимому, в основном состоят из молекулярного водорода. Этот вывод ссобенно ясен в случае, когда для существования наблюдаемых микроволновых спектров молекул необходимо быстрое возбуждение столкновениями, для чего необходимы концентрации 10^5 или выше нейтральных молекул на кубический сантиметр.

Из концентраций молекулярного водорода из табл. II, следуя уравнению (3), можно найти, что температура возбуждений молекул лежит между кинетической температурой и 2,7 °К изотропного излучения, если важны только два молекулярных уровня при определении их относительной населенности. Несмотря на то, что концентрации молекулярного водорода не обязаны иметь эти точные значения, они не могут быть значительно меньше, так как это означало бы, что температуры настолько близки 2,7 °К, что было бы невозможно наблюдать излучение резонансов на фоне изотропного излучения. Таким образом, наблюдения молекулярных резонансных линий, помимо поглощения газа на фоне сильных источников непрерывного излучения, показывают, что обнаруженные молекулы находятся в местах с высокой концентрацией молекул. Линии HCN и переходы с длиной волны 2 мм (~ 140 000 мгц) молекулы H₂CO требуют поразительно высоких концентраций, около 10⁶ см⁻³.

Хотя концентрации, приведенные в табл. П. представляют собой только нижние пределы, верхние пределы, вероятно, не намного выше из-за того, что это привело бы к очень большим массам и гравитационной неустойчивости. Например, если облако Стрелец В2, как предполагается, имеет диаметр в несколько световых лет и концентрация частиц 10⁶ см⁻³, оно должно обладать массой в 10⁵ солнечных масс. Время сжатия облака с плотностью ρ при свободном падении порядка $t \approx (\rho G)^{-1/2}$, где G гравитационная постоянная. Для концентрации 10⁶ молекул водорода в кубическом сантиметре это время равно только 30 000 лет. Найденные в облаках молекулярные скорости часто указывают на существование турбулентности или вращательного движения, достаточных для предотврашения такого быстрого коллапса, но, вероятно, внутри облака имеется много локальных неустойчивостей. В самом деле, имеется важное свидетельство о том, что распределение плотности в пылевых облаках существенно неоднородно. Это следует, например, из наблюдений того факта, что в данном облаке величины поглощения или непрозрачность вследствие различных микроволновых молекулярных резонансов гораздо в большей степени близки между собой, чем можно было ожидать просто из относительного обилия различных молекулярных состояний. Такие результаты легко объяснимы клочковатой структурой облака, одни части которого более плотны и другие менее плотны. Обладающая мелкозернистой структурой область, состоящая из очень плотных небольших облаков, неразрешимых антенным лучом, например, должна обладать одной и той же оптической плотностью как для сильных, так и для слабых оптических переходов. Неоднородности на больших масштабах легко обнаружимы, если исследовать зависимости молекулярных скоростей и концентраций молекул на луче зрения как функции угла, при наблюдениях с антеннами с высоким разрешением ^{35, 36}.

Количество молекул, излучающих данную резонансную линию, может быть легко вычислено с приемлемой точностью из коэффициента поглощения для газа в облаке $\int \gamma \, dv \, ds$, где γ — относительное поглощение на единицу длины и на данной частоте v и ds — элемент длины вдоль луча зрения. Из хорошо известного выражения для коэффициента поглощения

$$\int \int \gamma \, d\nu \, ds = \frac{8\pi^3}{3hc} \mid \mu \mid^2 \nu \int (n_1 - n_2) \, ds; \qquad (6)$$

здесь n_2 и n_1 — концентрации молекул на верхнем и нижнем уровнях соответственно, $|\mu|$ — матричный элемент дипольного момента для рассматриваемого перехода. Если распределение молекул представляется однородной температурой T и если $hv \ll kT$, что типично для микроволнового диапазона, то $n_2 - n_1 = Nhv/kT$, где N концентрация молекул в обоих состояниях. Уравнение (6) тогда примет вид

$$\int \int \gamma \, d\nu \, ds = \frac{8\pi^3 |\mu|^2 v^2}{3ckT} \int N \, ds. \tag{7}$$

Для большинства линий нормальной формы $\int \gamma \, d\nu pprox \gamma_{\max} \Delta \nu$, где γ_{\max} — поглощение

в максимуме линии и Δv — полная ширина линии на половине максимума. Таким образом, легко оценить этот интеграл.

Полное число молекул на луче зрения дается интегралом $\int N ds$ и часто может быть оценено из выражения (7). Для поглощения интенсивного непрерывного излучения, после того как оно пересечет облако, можно легко найти интегральный коэффициент поглощения, но температура T обычно плохо известна и должна быть оценена. Для излучения непосредственно из облака наблюдаемая температура излучения $T_a =$ $= T \left[1 - \exp\left(-\int \gamma ds\right) \right]$, что для $\int \gamma ds \ll 1$ приводит к $T_a, \max \Delta v \approx \int T_a dv = \frac{8\pi^3 |\mu|^2 v^2}{3ck} \int N ds$, (8)

где $T_{a, \max}$ — температура в максимуме линии. Таким образом, в этом случае не обязательно знать температуру возбуждения молекул, для того чтобы определить количество частиц на луче зрения $\int N \ ds$ непосредственно из измеряемой величины $\int T_a \ dv$.

Наблюдаемые значения количества молекул на луче зрения в Стрельце B2³⁷, плотном облаке, в направлении центра галактики и в направлении туманности Ориона представлены в табл. III. Молекулярные концентрации могут быть получены из этих значений количества молекул на луче зрения (плотностей), если независимо оценить размеры облаков. Следовательно, если облака простираются на 10 световых лет, плотность молекул какого-нибудь вида равна плотности по лучу зрения, деленной на 10^{19} . По причипам, указанным выше, значения плотностей вдоль луча зрения обычно достаточно хорошо известны, если молекулы заметны в излучении, и менее точно известны, если они наблюдаются в поглощении, так как в последнем случае интенсивность существенно зависит от преднолагаемой температуры (обычно от 10 до 1000 °K). Если наблюдается только мазерное излучение от молекулы, как в случае паров воды, то реалистические измерения числа молекул на луче зрения невозможны.

Из табл. III и других данных можно сделать вывод, что в основном газовая материя в плотных облаках находится в форме относительно простых молекул. Сравнение количества этих молекул с количеством водорода, которое, по-видимому, должно находиться в этих облаках, показывает, что по крайней мере существенная часть углерода, кислорода и азота, содержащихся в облаках, объясняется наблюдаемыми молекулами ²⁰⁶. В некоторых случаях в наблюдаемом количестве окиси углерода и кислорода содержится даже больше, чем ожидалось ⁹². Малая распространенность атомарного водорода по сравнению с молекулярным обсуждалась выше. Простые свободные радикалы ОН и CN сосуществуют с менее химически активными молекулами, но табл. III показывает, что они должны быть относительно более редкими по сравнению с более стабильной двухатомной молекулой СО и несущественно более распространенными, чем более сложные HCN, NH₃ или H₂CO. Распространенность молекул понижается с увеличением числа атомов в молекуле. Однако многие молекулы обнаружены на пределе существующей чувствительности. Это позволяет установить нижние пределы на числа молекул по лучу зрения и оставить мало сомнений в том, что много других более сложных молекул должно быть найдено более чувствительной техникой.

Если молекулы газа находятся в тепловом равновесии, то интенсивность микроволнового излучения должна накладывать нижний предел на их температуру. Во многих случаях эта интенсивность соответствует температуре только на один градус превышающей температуру изотропного излучения, так как газовые облака не являются оптически толстыми.

Таблица III

Современные оценки плотностей (числа молекул на квадратный сантиметр) вдоль луча зрения для молекул, обнаруженных в Стрельце В2 и в туманности Ориона (илотности получены из расчета процессов возбуждения (см. уравнения (4) и табл. II), плотности других молекул получаются непосредственно из интегральных интенсивностей линий; см. уравнение (8))

Молекула	Число молекул на луче зрения в Sgr B2, см-2	Число молекул на луче зрения в Орионе, см-2	Примечание	Лите- ратура
\mathbf{H}_{2}	$\geqslant 10^{22}$	$\sim 2 \cdot 10^{23}$	Косвенное определе- ние	83, 89
ОН	$>5 \cdot 10^{16}$?	Предполагается, что	21, 23
			1 = 29° К для Sgr B2; главным образом мазерное излучение из Ориона	
CO	~1019	~1018	Оптически плотные облака: плотность неопределенна	91, 92
CN	Не обнаружена	~10 ¹⁵	Предполагается, что $T = 50$ °K	93
CS	$\sim 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14}$		101
SiO	$\sim 4 \cdot 10^{13}$	Не обнаружена	Предполагается, что $T = 30$ °K	99
H ₂ O	?	?	Мазерное излучение	84
HCN (цианистый водород)	.He определена	~1015	Предполагается, что T=20 °К для Ориона	94
OCS (карбоксил сульфид)	$\geq 3 \cdot 10^{15}$	¦Не_обнаружена	_	103
NH ₃ (аммиак)	≥1017	» »	Предполагается, что T = 35 °K	83
H ₂ CO (формальде- гид)	2·10 ¹⁵	$\sim 3 \cdot 10^{14}$	Предполагается, что T=3 °К	38, 89
(HNCO (изоцианид)	Не определена	He обнаружена		102
HC ₃ N (цианацети- лен)	$\sim 2 \cdot 10^{16}$	» »	Предполагается, что T=50 °K	96
НСООН (муравьи- ная кислота)	$10^{13} - 3 \cdot 10^{15}$	» »	Линия перекрывается с переходами	100
СН ₃ ОН (метиловый спирт)	2·10 ¹⁶	~5·10 ¹⁶	Размеры облака неиз- вестны, возможно мазерное излучение в Sgr B2; очень ма- ленькое облако в Орионе	97, 98, 115*
СН ₃ СN (метилциа- нид)	$\sim 2 \cdot 10^{14}$	∤Не обнаружена	0 Factor	104
СН ₃ С ₂ Н (метилаце- тилен)	Не определена	» »		102
Х-молекула (неиз- вестна)	Не обнаружена	~10 ¹⁵	Частота 89 190 <i>Мгц</i> ; грубая оценка плот- ности	95
Х ₂ (неизвестна)	» »	Не обнаружена	Частота 90 665 <i>Мгц</i> ; найдена в источни- ках W 51, DR 21	102
$\rm NH_{2}HCO$ (формамид)	» »	» »		105
H ₂ CS (тиоформальде- гид)	1015	» »	Частота 3100 <i>Мгц</i>	107*
H ₂ S (сульфид водо- рода)	2.1014	5.10 ¹⁴	Частота 168700 Мгц	108*
СН ₃ NН (матанимин)	3.1014	₍ Не обнаружена	Частота 5290 Мгц	109*

К тому же термодинамическое равновесие не гарантировано. Излучение молекулы СО на волне длиною 2,6 мм ($J = 1 \rightarrow 0$ -вращательный переход) представляет собой случай, когда соблазнительно и, может быть, верно связать температуру излучения с кинетической температурой. В направлении на туманность Ориона это излучение от ¹²С¹⁶О имеет максимум интенсивности, соответствующий 40 °К ³⁴, и почти уверенно можно сказать, что облако оптически толстое. В других направлениях, соответствующих очень темным, вероятно, холодным облакам, температура этого излучения только на два градуса ^{39,55} превышает температуру изотропного

излучения. Обычно менее распространенная молекула ¹³С¹⁶О в обоих случаях имеет интенсивность излучения около одной третьей от интенсивности ¹²С¹⁶О, что дает некоторые указания то, что облако оптически толна стое 39, 55, 92. Если столкновения происходят намного быстрее, чем радиационные переходы, то эти измерения указывают на очень низкую кинетическую температуру, около 8 °К. Однако не является определенным то, что столкновения повсюду часты, и то, что облако однородно оптически толстое. Таким образом, эти температуры должны быть предметом дальнейших исследований.

Есть по крайней мере четыре температуры в межзвездных облаках, которые важны при обсуждении молекулярных резонансов. Это — кинетическая температура газа, температура возбуждения для относительной населенности двух рассматриваемых энергетических уровней, температура пыли-

нок и температура излучения. Так как термодинамическое равновесие маловероятно, обычно нет двух равных из них. Однако если столкновения реже, чем индуцированные трехградусным излучением переходы, то температура возбуждения будет такой же, как и у реликтового фона, и, как замечено выше, никакого излучения от молекулярных резонансов не может быть обнаружено. Если столкновения намного чаще, то температура возбуждения приближается к кинетической.

Инверсионное излучение аммиака на волне длиною 1,25 см ярко иллюстрирует рассматриваемые возбуждения и температуры и, возможно, доставляет нам прекрасный индикатор кинетической температуры. Вращательные и инверсионные уровни молекулы аммиака показаны на рис. 7. Инверсионные переходы, соответствующие «выворачиванию молекулы наизнанку» подобно зонтику, происходят между близко расположенными дублетами на рис. 7 и имеют немного различающиеся частоты для каждого вращательного уровня из-за центробежных сил. Уровни, не обладающие угловым моментом относительно оси симметрии (K = 0), не имеют инверсионных переходов. Почти все близкие столкновения вызывают переходы между двумя инверсионными уровнями. Несколько реже они изменяют полный угловой момент J на единицу и еще реже они изменяют K на три единицы или J на величину больше единицы. Отношения вероятностей переходов для инверсионных уровней при изменении J на





уровней монскуны и инз. Вращательные и инверсионные уровни показаны с разрешенными переходами. По горизонтали отложены значения К проекции углового момента на ось симметрии. Полный угловой момент J указан для каждого уровня. Знаки плюе и минус обозначают четность состодний. единицу или при изменении K грубо равны 1 : (1/10) : (1/100) для столкновений между Не или H₂ и NH₃⁴⁰. Распределения масс и зарядов для двух инверсионных уровней настолько идентичны, что относительное возбуждение для любой пары в результате столкновений скорее всего зависит только от небольшой разницы в их энергиях; следовательно, они приходят в равновесие с кинетической энергией при каждом столкновении. Кроме того, для таких переходов сечение при H₂ — NH₃-столкновениях имеет относительно большое значение, $3 \cdot 10^{-15}$ см^{2 32}.

В противоположность предыдущему случаю, ни столкновения, ни радиация не могут вызвать заметные переходы между вращательными уровнями с K = 3n и уровнями с K = 3m + 1, где n и m - целые числа, включая нуль. Эти две группы состояний включают в себя и общий спин для трех протонов в молекуле аммиака, равный 3/2 и 1/2 соответственно. Они во многом подобны орто- и параводороду. Они очень легко могут приходить в равновесие в результате обменного столкновения с атомом водорода или вследствие поглощения на поверхности пылинок и последующего испарения. В условиях, типичных для плотных межзвездных облаков, для этих процессов необходимы времена около 10^6 лет для установления равновесия между этими двумя разновидностями ³⁵.

Все состояния с J = K метастабильны по отношению к радиационным переходам. Столкновения — основной источник переходов между ними. Довольно часто они вызывают переходы между состояниями с K = 3n + 1 и K = 3n - 1 или между состояниями с K = 3n, но, что существенно, не между парааммиаком и ортоаммиаком. Ока и др.⁴¹ показали, что радиационные переходы между состояниями аммиака с различными К, вызываемые колебательно-вращательными возмущениями, происходят медленно. Такие переходы разрешены только между уровнями одной разновидности, иными словами, только между уровнями парааммиака или ортоаммиака. Эти авторы вычислили, что 3,3-уровень высвечивается, например, с переходом на 2,0-уровень за $10^9 \ cek$ — время обычно, но не обязательно всегда, значительно превышающее время между столкновениями. Тот факт, что 3,3-инверсионное излучение наблюдается, показывает, что время между столкновениями должно быть меньше времени релаксации вследствие этого процесса. Следовательно, плотность молекул больше чем приблизительно 100 см⁻². Это находится в согласии с плотностями, предполагаемыми в табл. II, но не дает существенно новой информации.

По-видимому, относительная населенность различных вращательных уровней молекулы аммиака дает одну из наилучших мер кинетической температуры для облаков, в которых найден аммиак. Выше было замечено, что относительные населенности двух инверсионных состояний каждого вращательного уровня, весьма вероятно, определяются кинетической температурой. Это гарантирует, что отношение населенностей на верхнем и нижнем инверсионных уровнях в основном одно и то же для всех вращательных состояний. Таким образом, относительные интенсивности инверсионного излучения для этих уровней должны точно отражать относительные населенности вращательных состояний. Отношение населенностей между уровнями 1,1 и 2,2, определяемое скорее столкновениями, чем любыми радиационными процессами, в первом приближение, предноложительно, должно даваться выражением

$$n_{11} = \frac{3}{5} e^{-\Delta w/kT} n_{22}, \tag{9}$$

где n_{11} и n_{22} — плотности в этих двух состояниях, ${}^{3}/{}_{5}$ — отношение статистических весов (2J'+1)/(2J+1) и Δw — разность энергий, равная 30 см⁻¹. Можно думать, что это выражение не слишком ошибочно. Однако столкновения могут вызывать переходы из 2,2-состояния в 2,1-состояние, так же как и в 1,1-состояние. Любая молекула в состоянии 2,1 быстро излучает (~ 100 сек) с переходом на уровень 1,1. Другие врадательные уровни с K=1 и K=1 также могут быть вовлечены в столкновения и могут воздействовать, из-за быстрого высвечивания, на относительные населенности двух

метастабильных уровней 1,1 и 2,2. Для проверки возможности того, что для данного значения К верхние вращательные уровни могут быстро затухать при переходе на нижние уровни, были предприняты поиски инверсионного излучения с 2,1- и 4,3-уровней. Это излучение не было найдено. Таким образом, наиболее точное условие стационарности таково:

$$n_{11} \sum_{I} P_{11 \to I, 2} = n_{22} \sum_{J} P_{22 \to J, 1}, \qquad (10)$$

где $P_{11-J,2}$ представляет собой вероятность возбуждения из 1,1- в J,2-состояние из-за столкновений. Имеются основания предполагать ⁴¹, что $P_{11} \rightarrow _{22}$ и $P_{22} \rightarrow _{11}$ значительно превышают другие члены в этом выражении. В этом случае оно приводится к выражению (9). Однако относительные величины различных членов в действительности неизвестны. Уравнение (10), строго говоря, означает, что любая температура, полученная из уравнения (9), несколько ниже, чем действительная кинетическая температура. Измерения в различных направлениях и в направлении на облако Стрелсц В2 дают значения кинетической температуры между 20 и 80 °К ³⁵.

Населенность уровня 3,3 в молекуле аммиака позволяет определить температуру равновесия между орто- и парааммиаком. Столкновения, приводящие населенности уровней 1,1 и 2,2 в стационарное состояние приблизительно за 107 сек или за одну треть года (время между столкновениями), совершенно неэффективны в случае переходов между этими и 3,3-уровнем. Так как 3,3-состояние — состояние ортоаммиака, а другие два — парааммиака, переходы между ними вследствие совершенно других механизмов требуют 10⁶ лет или, возможно, больше, чтобы привести к стационарному состоянию. Таким образом, отношение населенности в 3.3-состоянии к населенностям 1.1- и 2.2-состояний скорее всего представляет некоторую температуру, имевшую место в облаке 106 лет или более тому назад, вместо того чтобы представлять современные температуры, которые дает отношение населенностей 1,1- и 2,2-уровней. Оно может просто отражать эффективную температуру, при которой образовался аммиак. Сравнение 3,3-инверсионной интенсивности с интенсивностью уровня 1,1 фактически указывает на отличные и значительно большие температуры, чем те, которые следуют из интенсивностей 1,1- и 2,2уровней ³⁵.

Более точная и обширная интерпретация возбуждения NH_3 и кинетических температур должна ждать дополнительных лабораторных измерений сечений столкновений или более обширных и точных измерений интенсивностей в межзвездном пространстве для различных вращательных состояний. Последнее не будет очень трудным, так как инверсионное излучение уже обнаружено для уровней 4,4 и 6,6, так же как и для трех уровней, упомянутых выше. Предварительная карта плотностей молекул и температур в выдающемся облаке Стрелец B2 показана на рис. 8.

Осторожность и подробность, с которыми должны быть поняты механизмы возбуждения и релаксации, чтобы быть логично интерпретированными в терминах условий внутри облака, проиллюстрированы различными примерами молекул, очень далеких от теплового равновесия для любых температур внутри облака. Излучение молекул паров воды и гидроксила, например, очень интенсивно и испускается из очень маленьких источников ^{27, 28}. Температура их излучения по крайней мере равна 10^{13} °K. Формальдегид в темных облаках приводит к уменьшению интенсивности излучения до величин, меньших интенсивности трехградусного изотропного излучения ²⁹. Это указывает на то, что температура для его перехода вблизи волны длиною 6 *см* должна быть ниже 2,7 °K. Наилучшая оценка дает приблизительно 0,8 °K. Это ниже, чем любая другая известная температура облаков, и должна, как и в мазерах, быть обусловлена каким-нибудь неравновесным механизмом накачки — тепловой машиной, которая отбирает энергию и охлаждает H₂CO уровни, в противоположность тепловой машине, непрерывно снабжающей энергией H₂O- и OHмазеры.

Были предложены различные процессы, способные охлаждать уровни H_2CO до таких низких температур. Один из них включает в себя столкновения и переизлучение ⁴². Два уровня, участвующие в переходе, обозначены квантовыми числами 1_{10} и 1_{11} и показаны на диаграмме энергетических уровней (рис. 9). Уровни на левой стороне этой диаграммы соответствуют параформальдегиду, а уровни на правой — ортоформальдегиду.



Рис. 8. Карта плотностей, скоростей и температур молекул аммиака в источнике Стрелец В2 (из работы ³⁵).

Центр системы координат соответствует значениям α (1950) = $17^{h}44^{m}01^{s}$, δ (1950) = $-28^{\circ}21'6''$. По горизонтали отложено относительное прямое восхождение, по вертикали — относительное склонение (в минутах). Буквы NL означают плотность вдоль луча зрения $\int N ds$, огределяемую уравнением (7).

Обычно нет переходов между этими двумя группами. Болеее вероятны возбуждения, по крайней мере для достаточно энергичных столкновений, между любыми членами дублета 1_{11} и 1_{10} и нижними членами верхних пар. Например, столкновения легче вызывают возбуждение $1_{10} \rightarrow 3_{13}$, чем $1_{10} \rightarrow 3_{12}$, по причинам, связанным просто с сохранением момента и энергии. Радиационные процессы позволяют молекуле довольно быстро высветиться, но с нижнего уровня одного дублета она может перейти только на нижний уровень нижнего дублета. Таким образом, после высвечивания наинизшее состояние 1_{11} должно иметь существенно более высокую населенность, чем верхнее состояние этого же самого дублета. Это соответствует низкой температуре возбуждения и иллюстрирует холодильную установку, действующую на источник тепла, — кинетическую эпергию и сток тепла — поле излучения. Другая возможность состоит в том, что 2,7 °К-изотропное излучение пе точно соответствует чернотельному излучению ⁴³, но несколько превышает его на частоте, соответствующей переходу $1_{10} \rightarrow 2_{11}$. Получающиеся в результате увеличения скорости индуцированные переходы между 1_{10} - и 2_{11} -уровнями и, далее, индуцированные переходы между уровнями 2_{11} и 2_{12} с последующей релаксацией на самый нижний дублет могут также увеличивать населенность

в нижнем состоянии и, следовательно, понижать температуру возбуждения. Еще другая возможность состоит в рассмотрении радиационной накачки колебательными возбуждениями молекулы формальдегида ⁴⁴. Вопрос о том, какой из этих механизмов применим в действительности, является предметом современных исследований. Его решение даст дальнейшее представление об условиях в этих темных пылевых облаках.

Как и в случае охлаждения формальдегида, был предложен ряд механизмов накачки молекул в верхние состояния резонансов гидроксила и паров воды: столкновительная накачка ⁴⁵, радиационная накачка ⁴⁶ и различные комбинации ¹¹⁶*. Рассмотрение этих механизмов слишком громоздко, чтобы обсуждаться здесь. Ниже будут резюмированы только общие свойства H₂Oи OH-мазеров и источников, которые обусловлены ими.

Наиболее замечательным аспектом излучения молекул паров воды с длиною волны 1,35 см и молекул гидроксила с 18 см является интенсивность, в частности интенсивность в единицу телесного угла. Некоторые источни-





Уровни описываются выражением $J_{K_{-1}K_{1}}$, где J — полный углового момент, K_{-1} и K_{1} — проекции углового момента на оси симметрии для соответствующих уровней вытянутого и сплюснутого симметричного волчка соответственно. Справа — уровни онергчи ортоформальдегида, слева — іпараформальдегида. Стрелки показывают нереходы, которые наблюдались в межаверимахов с в межаверима.

ки ОН обладают обычными поглощением и излучением, такими, какие свойственны большинству молекул. Однако излучающие источники ОН достаточно интенсивны для того, чтобы обеспечивать температуры, близкие к 100° K, для 26-м антенны, и ${
m H}_2{
m O}$ -источники дают такие высокие антенные температуры, как 6 000 °К. Далее, сверхдальная радиоинтероферометрия, относительно новая техника исследования когерентности излучения, принимаемого на двух далеко отстоящих друг от друга антеннах, показывает, что угловые размеры этих источников ОН и H₂O исключительно малы — часто по крайней мере 10⁻⁸ рад или еще меньше — и выходят за пределы разрешающей способности наилучшей современной техники ^{27, 28}. Это означает, что радиационные температуры источников больше, чем антенные, на фактор, равный отношению углов диаграмм направленности антенны и источника (меньше чем 10⁻¹⁶ стер), что как для ОН, так и для H₂O дает высокие температуры источника 10¹³ °K. Очевилно. что такие температуры нельзя связать ни с кинетической энергией молекул, ни с каким-нибудь излучением, если только оно не было усилено. Последнее предполагает мазерный механизм с неизбежным нетепловым

распределением — большей населенностью верхнего из двух уровней, между которыми происходят переходы.

Мазерное излучение молекул гидроксила и паров воды для данного источника обычно имеет максимумы на различных допплеровских скоростях, как видно в спектре молекул H₂O в Орионе, показанном на рис. 2.



Рис. 10. Временные вариации спектров мазерных источников H₂O в радиоисточнике W 49 (из работы ⁴⁸).

Наибольшие максимумы соответствуют температурам антенны в несколько тысяч градусов для 85-футовой антенны. По горизонтали отложена линия молекулы воды 1,35 см в единицах радиальной скорости (км/сек), по вертикали — поток в единицах потока. Измерения проводились 9, 10, 11 ноября 1969 г. (1), 13 января 1970 г. (2) и 24 марта 1970 г. (3). Сверхдальняя радиоинтерферометрия свидетельствует, что в большинстве случаев каждой допплеровской скорости соответствует отдельный компактный источник, как показано на рис. З для большой группы близко расположенных излучающих источников в W 49.

Реальная ширина большинства этих максимумов намного меньше, чем ожидаемое допплеровское уширение, по-видимому, вследствие сужения линии из-за усиления. Если усиление велико и нет обратной связи или насыщения молекулярных резонансов, ширина линии уменьшится в $[\ln (g/\sqrt{2})]^{-1/2}$ раз, где g' — полное усиление. Насыщение делает этот множитель ближе к единице.

Другими интересными свойствами ОН- и H₂O-мазеров являются их переменность и поляризация. На рис. 10 показаны замеченные вариации спектра Н₂О в W49 от месяца к месяцу. Заметные изменения происходят за время в несколько дней 47, 48. Отдельные допплеровские максимумы в ОН-источниках часто почти полностью поляризованы с круговой поляризацией, другие частично поляризованы линейно. Для мазеров H₂O циркулярная поляризация не обнаружена, но есть линейная поляризация около 10% в нескольких источниках 47.

В принципе вынужденное излучение может иметь свойства, очень отличающиеся от свойств теплового излучепости в состоятие излуче-

ния. Некоторые из них очевидны из предыдущего обсуждения. Уместно рассмотреть, какие могут существовать другие специфические характеристики. Полная мощность излучения наиболее сильных источников, если они изотропны, что вероятно, должна приходиться на ограниченный интервал частот сантиметровых резонансов и достигать до 10³⁰—10³³ эрг/сек, что сравнимо с полной светимостью Солнца. Было предположено, что галактические мазеры — сильнонаправленные источники, поэтому их видимые большие интенсивности не означают таких полных светимостей, как можно было бы ожидать для изотропно излучающего тела. Такая направленность не может быть полностью объяснена. Однако, поскольку несколько отдельных мазеров обычно находится в данной небольшой области и поскольку большинство известных H₂O-мазеров также встречается вместе с OH-мазерами, предположение о высокой направленности требует, чтобы в большинстве источников было так много отдельных мазеров, чтобы средняя излучаемая в одном направлении энергия не слишком отличалась от энергии, излучаемои в любом другом направлении. В этом случае полное излучение от всей группы предположительно сильнонаправленных систем так же велико, как и в случае, если предположить, что каждыи отдельным источник излучает изотропно.

Измеренные с помощью интерферометров размеры источников часто малы, до 10 ⁸ рад, или линеиные размеры сравнимы с земнои орбитой (10¹³ см). Иногда предполагают, что размеры усиливающей среды в действительности намного больше видимых размеров источников, так как излучение, возникшее в некоторои локализованнои области и с относительно низкои интенсивностью, может быть когерентно усилено без искажения его волновои картицы, при его распространении через очень протяженную усиливающую среду. Это означает, что излучение от компактного источника усиливается по пути через облако протяженностью в несколько световых лет. Такая возможность не может быть полностью исключена. Однако представляется очевидным, что наиболее интенсивные лазеры не могут быть объяснены усилением в больших облаках. Для Н₂О уровни, на которых происходит лазерное излучение, находятся приблизительно на 450 см-1 выше, чем основной вращательным уровень, и высвечиваются на более низкие уровни приблизительно за одну секунду. Следовательно, усиливающая среда должна быть при умеренно высоких температурах и возбуждения должны происходить часто Если возбуждения вызываются столкновениями, то концентрация частиц усиливающеи среды должна быть до 10⁹ см⁻³. Такие плотные облака не могут быть очень протяженными. Кроме того, можно показать, что большое облако не может давать требуемых высоких усилений без существования в облаке рассеяния и спонтанного излучения, достаточных для того, чтобы послать для дальнейшего усиления волну назад под различными углами через облако Такая обратная связь через рассеяние и усиление спонтанного излучения стремится превратить всю поверхность в излучающую некогерентно, подобно очень горячему черному телу Представляется возможным, что по краинеи мере наиболее мощные мазеры являются источниками такого типа с излучением, пересекающим усиливающую среду во всех направлениях, и, следовательно, с наблюдае-мыми размерами, сравнимыми с деиствительными размерами среды 49, 117 *. В этом случае также необходимы концентрации молекул в пределах от 10⁹ до 10¹³ см⁻³. Это означает, что масса всего мазера, по крайней мере для наиболее мощных источников, сравнима с массои звезды.

Излучение большинства лабораторных мазеров или лазеров не является случайным (гауссовским) по интенсивности, как для теплового шума или теплового излучения. Типичные мазеры или излучают острые импульсы, или имеют более или менее постоянное излучение, а не случаиные флуктуации. Известно, однако, что излучение систем указанного выше типа со случаиным рассеянием, обеспечивающим обратную связь, имеет случаиное распределение по интенсивности ⁵⁰. Недавние тщательные исследования флуктуаций интенсивности в межзвездных мазерах ⁵¹ показывают, что они случаны также для теплового излучения.

Меланизмы накачки для ОН- и Н2О-мазеров еще не ясны. Ясно, что они представляют собои некоторую комбинацию столкновений или радиационных возбуждении и переизлучения. Во всяком случае, они представляют собой тепловые машины, для которых необходимы источники высокои температуры и низкотемпературный сток тепла, чтобы непрерывно производить излучение с очень высокой температурои. Кроме того, любая циклическая схема накачки, предлагавшаяся до сих пор для ОН или H₂O, нуждается в поглощении или испускании молекулами кванта с длиной волны в далекой инфракрасной области (около 100 мкм) на каждый образованный кванг в микроволновом диапазоне Этот инфракрасный квант не может быть излучен во внутрь или наружу достаточно малой поверхности системы, излучающей мазерным механизмом, при сколько-нибудь разумных температурах. Это приводит к выводу о том, что как источник, так и сток тепла для накачки мазера в большинстве случаев на одятся внутри объекта⁴⁹. Следовательно, разумное устроиство такого мазера может представлять собот достаточно плотное облако или оболочку газа и пыли с размерами, сравнимыми с размерами большой звезды, и температурой в предетах от нескольких сот до из кольких тысяч градусов.

МОЛЕКУЛЫ КАК ТЕСТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ИЗОТОПОВ

Молекулярные спектры представляют отличную возможность для определения относительной распространенности изотопов нормальных элементов в разных частях межзвездного пространства. Например, разность между массами изотопов ¹²С¹⁶О и ¹³С¹⁶О приводит к разности порядка 5% в моментах инерции и, следовательно, вращательных частотах: величина разделяющая спектры на две изотопные разновидности, достаточна для того, чтобы они были легко различимы, но обычно не настолько велика, чтобы препятствовать измерению интенсивности линий излучения ¹²CO и ¹³CO на одном и том же приборе. Если данное газовое облако оптически тонкое на частоте молекулярного резонанса, то простое сравнение интенсивностей с незначительными поправками для отношения частот, соответствующих уравнению (7), непосредственно дает отношения распространенностей изотопов. Только в редких и специальных случаях возбуждение двух молекул с разными изотопами будет различным. Если облако оптически толстое, то точное определение отношения распространенностей изотопов обычно невозможно, но могут быть получены по крайней мере приблизительные ограничивающие значения.

Известно, что относительные распространенности изотопов углерода, кислорода и азота в таких объектах, как Солнце, метеориты и кометы, не слишком отличаются от найденных на Земле. Однако нет существенных оснований ожидать, что изотопное отношение должно быть одним и тем же в межзвездных облаках, на Земле или внутри Солнечной системы. Все же во многих случаях эти отношения, по-видимому, одни и те же.

Первым отношением распространенностей изотопов в межзвездных газах, которое было определено из молекулярных микроволновых спектров, было отношение ¹⁶O: ¹⁸O, полученное Роджерсом и Бареттом ⁵² из резонансов молекулы гидроксила в Стрельце А. Они оценили, что отношение ¹⁶O: ¹⁸O совпадает с точностью до множителя, равного двум, с земным значением 490. Последующие измерения дали значения, равные 390⁵³ и 314²¹ в этом источнике и 203 в Стрельце В2²¹. Хотя точность измеренного отношения 390 равна 13%, ни это, ни другие измерения недостаточно точны для того, чтобы продемонстрировать скольконибудь существенное отличие между межзвездными и земными отношениями распространенностей. Отношение ¹⁶О : ¹⁸О, равное приблизительно 20 было получено из спектра излучения достаточно распространенной молекулы СО, снятого в направлении на Стрелец В2 ⁹². При этом было предположено, что оптическая толща мала. Однако авторы замечают, что это предположение почти наверное неправильно для молекул С¹⁶О. Таким образом, значение 20 является просто нижним пределом для отношения распространенностей.

Дейтерий представляет собой случай, когда распространенность изотопов отличается от земного значения. Это можно было ожидать из чувствительности скоростей образования и разложения ²H к условиям, в которых протекают ядерные реакции. Нижний предел на среднее отношение распространенностей ¹H : ²H в межзвездном пространстве был получен из сравнения переходов в сверхтонкой структуре ²H с интенсивностью соответствующей линии 21 *см* для ¹H. Результирующий нижний предел ¹H : ²H > 13 000 ⁵⁴ по сравнению с земным отношением 6700 *).

Отношение ¹²C: ¹³C было получено для различных молекул в ряде источников. Обычно эти измерения содержат значительную неопределенность, так как оптическая толща облаков неизвестна. Полученные соотношения, в предположении маленькой оптической толщи, для всех случаев представлены в табл. IV.

Отношение ¹²C : ¹³C особенно интересно, так как известный углеродно-азотно-кислородный (CNO) цикл для сгорания водорода в звездах должен приводить в равновесии к наибольшим значениям этого отношения,

^{*)} Недавно Уилсоном, Пензиасом, Джеффертсом и Соломоном дейтерий был обнаружен в Орионе. Изотопное отношение ²Н : ¹Н превышает земное значение и равно 6 · 10^{-3 110}*, ¹¹⁸ *.

Таблица IV

Отношения интенсивностей излучения молекул, содержащих изотопы ¹²С и ¹³С, для спектров молекул нескольких источников (это — отношения распространенностей, если предположить, что источник оптически тонкий; если это предположение неверно, что вероятно во многих из этих случаев, то эти значения являются только нижними пределами (земная величина отношения равна 89))

Моле- кула	Источник	Отноше- ние ин- тенсив- ностей (< отно- шения распро- странен- ностей)	Лите- рату- ра	Моле- кула	Источник	Отноше- ние ин- тенсив- ностей (< отно- шения распро- странен- ностей)	Лите- рату- ра
CH+ CO HCN H ₂ CO	ζ Змееносца » Орпон Стрелец А «Хеликс», облако 2	$\begin{array}{c} 82 \\ 105 \\ 8,9 \\ 4,7 \\ 25 \end{array}$	13 19 94 94 55	CO H ₂ CO CO	То же Стрелец А Стрелец В2 W51 Стрелец А и B2	$3 \\ 11\pm 3 \\ 11\pm 2 \\ 55\pm 30 \\ 2$	55 90 90 90 92

равным 4⁵⁶, в то время как рождение ядер гелия должно существенно уменьшать количество ядер ¹³С и приводить к отношению, стремящемуся к бесконечности. Таким образом, распространенность изотопов может дать хороший критерий для этой ядерной реакции. Отношения ¹²C : ¹³C в звездах а Ориона и а Волопаса, по-видимому, равны 3,5 57 и 6 58 соответственно. Земное значение, равное 89, вероятно, случайно и получилось вследствие неравновесных условий или из-за смешения углерода от различных источников. Кроме того, значения, полученные для межзвездного вещества, не слишком отличаются от земных. Величины отношений ¹²С: ¹³С, приведенные в табл. IV, интересны и многообещающи, но до сих пор дают мало определенную информацию потому, что большие отношения обычно имеют место в облаках с заметной, но довольно неопределенной оптической толщей. Вследствие этого они являются только нижними пределами. Недавние наблюдения источника Стрелец А с высоким угловым разрешением 59 показывают, что для исправленного значения оптической толщи получается отношение порядка 25 в случае этого источника. Однако это значение правильно, если только плотнесть облака достаточно однородна в масштабах достигнутого углового разрешения (порядка одной угловой минуты). Исследования оптических спектров радикала СН + в направлении на ζ Змееносца дают, возможно, наилучший верхний предел для этого отношения потому, что оптическая толща источника для рассматриваемых резонансов меньше единицы. Отношение, полученное из ультрафиолетовых спектров молекулы СО в этом же направлении ¹⁹, также дает хороший верхний предел. Оба значения довольно близки к земной величине. Возможно, это совпадение имеет место только из-за того, что оно представляет измерения в достаточно близкой нам части Галактики (500 световых лет), но, возможно, что земная величина для данного отношения обладает известной общностью.

Ясно, что для измерений в более коротковолновой части сантиметрового диапазона необходимы молекулярные резонансы, для которых оптическая толща облака может быть надежно установлена, или, в частности, когда оно оптически тонко. Такие измерения были бы очень ценны для понимания происхождения наблюдаемых отношений изотопов и истории межзвездного вещества.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Трехградусное фоновое излучение ⁶⁰, иногда называемое реликтовым или «big bang»-излучением, оказывает сильное воздействие на возбуждение молекул, как было показано выше в (1) и (3). Хотя его интенсивность достаточно хорошо известна до длин волн порядка 3 *мм*, имеется относительно немного информации о спектральной интенсивности для более коротковолновой области. Любопытно также, насколько хорошо оно совпадает с кривой чернотельного излучения в области больших частот. Чернотельное распределение даст существенную гарантию того, что это излучение действительно образовалось во время первоначального взрыва Вселенной. Большие отклонения будут противоречить такому происхождению. Однако не слишком сильные отклонения от чернотельного излучения могут быть интерпретированы в терминах особенностей ранней истории Вселенной.

Наилучшая имеющаяся в наличии информация об интенсивности реликтового фона на волнах короче 3 мм получается из измерений молекулярных возбуждений. В отличие от сообщений об очень аномальном и, возможно, независимом излучении ниже 1 мм 61, относительные обилия молекул CN в основном и первом возбужденном вращательных состояниях дают оценку интенсивности излучения на 2,63 мм, находящуюся в согласии с ожидаемой из закона излучения черного тела с температурой 2,7 °К⁹⁻¹¹. измерения следующих верхних вращательных Подобные уровней молекул CN и вторых вращательных уровней CH и CH⁺ дают верхние пределы на их населенности и верхние пределы на изотропное излучение с длиной волны 1,32, 0,559 и 0,359 мм. Эти верхние пределы равны, но существенно превышают значения, ожидаемые для чернотельного излучения с температурой 2,7 °К ⁶².

Вероятно, что дальнейшие измерения возбуждений различных молекул, как известно, начавшиеся сейчас, окажут большую помощь в определении особенностей высокочастотной части изотропного излучения. Такие определения нуждаются опять в достаточно подробном понимании механизмов возбуждения и, в частности, конкуренции между столкновениями и радиационными переходами. Изучение перехода $2_{12} \rightarrow 2_{11}$ в H₂CO, соответствующего приблизительно излучению 2 см, дает информацию, например, об изотропном излучении вблизи 2,1 мм, так как оно важно для определения населенностей этих уровней по отношению к уровням 1₁₀ и 1₁₁, между которыми имеется резонанс в H₂CO с длиной волны 6 см. До настоящего времени из наблюдений молекулы формальдегида можно было получить только верхний предел для реликтового излучения в области длин волн порядка 2 мм из-за неопределенности в величинах оптических толщ облаков. Этот верхний предел приблизительно в семь раз превышает интенсивность чернотельного излучения с температурой 2,7 °К 63 и соответствует температуре 5 °К.

ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПАД МОЛЕКУЛ

Открытие обилия сложных молекул явилось неожиданностью для специалистов. Это указывает с очевидностью на то, что раньше не был известен удовлетворительный механизм для образования и сохранения их в межзвездном пространстве. Полностью удовлетворительных механизмов нет до сих пор, хотя обсуждалось много возможностей. Основные предположения таковы:

1) Образование молекул в результате парных столкновений в газе в межзвездном пространстве.

2) Образование молекул на поверхностях пылинок из атомов или более простых молекул, сталкивающихся на поверхности.

3) Образование молекул в плотных звездных атмосферах, вероятно, в результате многочастичных столкновений, и их последующее выбрасывание в межзвездное пространство.

4) Испарение или разложение пылинок из-за бомбардировки энергичными частицами, ударных волн или других тепловых процессов. Это предположение приводит к старой проблеме объяснения происхождения ныли. Возможно, она образуется в звездных атмосферах.

Любой механизм образования молекул должен порождать молекулы с той же скоростью, с какой они разрушаются. Иначе необходимо принимать во внимание конечное, иногда короткое время жизни молекулярных

облаков. Следовательно, разрушение молекул так же важно, как и их образование. Одним из способов, каким молекулы могут погибать, является диссоионизующим пиация излучением. В не слишком плотных облаках ультрафиолетовый свет от звезд, по-видимому, наиболее эффективный диссоциируюший агент. На рис. 11 показаны энергии диссоциации различных молекулярных связей и, следовательно, необходимые энергии ультрафиолетовых квантов для их разрыва. Это не всегда наименьшие энергии, достаточные для диссоциации молекул, которые соответствуют, конечно, разрыву наиболее слабой связи. Точная скорость диссоциации зависит от деталей спектрального распределения ультрафиоле-





В каждом случае описана связь и указана ее кратность. В кружки заключены наблюдавшиеся в межзвездном пространстве молекулы. По вертикали отложена энергия (в зв), по горизонтали — сложность молекул.

тового света и сечения диссоциации. Недавно проведенные оценки некоторых случаев показывают, что если молекулы подвержены влиянию среднего поля радиации межзвездного ультрафиолетового света, неэкранируемого пылью, то H_2O , NH_2 , CH_4 и H_2CO диссоциируют за время немного меньше 100 лет ^{206, 64}. Молекула СО с существенно более высокой энергией диссоциации в этом же самом поле излучения имеет время жизни 1000 лет. По рис.11 можно судить, что большинство других молекул будет также диссоциировать в течение приблизительно 100 лет, за исключением молекулы азота N₂. Можно ожидать, что она должна быть долгоживущей, потому что ее энергия связи Велика, и должна иметь время жизни порядка времени жизни молекулы окиси углерода. Все эти времена настолько коротки, что молекулы должны быть или быстро разрушены, или очень хорошо защищены от ультрафиолетовой радиации, для того чтобы быть в достаточном обилии в межзвездном пространстве. В центре плотного облака с концентрацией 10³ молекул водорода в кубическом сантиметре, протяженностью в один световой год можно ожидать экранирование пылью ультрафиолетового света, приводящее к уменьшению его интенсивности в 10^{24} раз. Таким образом, внутренняя часть такого облака в основном полностью свободна от ультрафиолетового света звезд. Обладающие большей проникающей способностью рентгеновские и космические лучи могут быть

11 УФН, т. 112, в. 2

главными источниками диссоциации молекул, хотя в плотных облаках имеет место и их экранировка ^{119*}.

Второй, вероятно важный, механизм для удаления молекул из газовых облаков — это просто их замерзание: соударения и прилипание посредством ван-дер-ваальсовых или других сил к поверхности пылинок. При низких температурах в несколько десятков градусов, которые характерны для наиболее плотных облаков, коэффициент аккомодации, т. е. вероятность прилипания к поверхности при столкновении, не слишком отличается от единицы. Обычное предположение о том, что пылинки имеют диаметр приблизительно в 0,2 мкм и содержат около одного процента массы облака, приводит к выводу о том, что время жизни молекулы до того, как она столкнется с пылинкой, равно

$$\tau_l \approx \frac{10^{21}}{vn} ce\kappa, \tag{11}$$

где v — скорость молекулы и n — полная молекулярная (водород) концентрация. Таким образом, для плотных облаков с $n \approx 10^4 \ cm^{-3}$ и $v \approx \approx 3 \cdot 10^4 \ cm/cek$ $\tau_l \approx 3 \cdot 10^{12} \ cek = 10^5$ лет. Это замерзание происходит более медленно, чем ультрафиолетовая диссоциация незащищенных молекул, но оно имеет место даже для заэкранированных молекул и приводит к конечному времени их существования в газовом состоянии. Это время существенно короче времени жизни облака. Следовательно, безотносительно к происхождению молекул, они должны регенерироваться или переизлучаться с поверхностей пылинок много раз в течение жизни облака.

Молекулы в принципе могут образовываться в газовой фазе в результате парных столкновений. Однако вероятность молекулярных комбинапий, образующихся из двух сталкивающихся атомов, оказывается слишком малой, для того чтобы объяснить наблюдаемые количества молекул. в частности тех видов, для которых сочетание энергетических уровней компонент и молекулярных комбинаций невыгодно. Парные ионные столкновения, например между Н- и Н, приводящие к образованию молекулы Н₂ и электрона, часто энергетически более выгодны, чем столкновения нейтралов 65, и могут быть ответственны в некоторых случаях за образование молекул водорода ⁶⁶. Джульенн и др. ⁶⁷ рассчитали, что ОН в наблюдаемом количестве может образовываться в результате парных столкновений и процессов инверсной предиссоциации. Клемперер 68 нашел, что наблюдаемые в направлении на ζ Змееносца концентрации СН, СН+ и CN могут достаточно надежно быть объяснены двухмолекулярными столкновениями в газе с концентрацией около 50 см-3. Из его вычислений следует, что молекул СО по порядку величины должно быть больше, чем этих молекул. Последние эксперименты ¹⁹ показали, что молекул СО еще больше по порядку величины, чем других молекул. Эти расчеты также указывают на то, что молекулы NH и OH должны быть очень редкими. Это означает, что образование молекул NH₄ и H₂O в результате таких столкновений маловероятно.

Образование молекул и пыли в звездных атмосферах, которые намного плотнее, чем межзвездные облака, и в которых возможны многочастичные столкновения, хорошо изучено ⁶⁹. Кроме того, полное количество вещества, выбрасываемого из звезд в межзвездное пространство, как может быть показано, ненамного меньше полного количества материи, находящейся в этих областях ⁷⁰. Заманчиво предположить, что как молекулы, так и пылинки образуются в звездных атмосферах или при вспышках звезд. Такое происхождение кажется вероятным для ядер пыли, которая может, конечно, содержать и молекулы. Однако относительно короткие времена жизни газообразных молекул в межзвездной среде делают сомнительным их происхождение в звездных атмосферах. По-видимому, нелегко достаточно хорошо защитить молекулы от звездной радиации так, чтобы они не диссоциировали, прежде чем покинут поле излучения звезды, в которой они образовались. Кроме того, после того как молекулы покинут поле радиации звезды, они смерзаются достаточно быстро в холодные крупицы пыли. Поэтому необходимы механизмы регенерации молекул или освобождения их из пылинок в течение жизни пылевого облака. Последнее означает, что молекулы могут также хорошо образовываться на поверхности пылинок с последующим переходом в газовое состояние.

Теоретическое исследование образования молекул в звездных атмосферах дает интересную схему для относительной распространенности различных видов молекул ^{69, 71}. Например, в звездах, имеющих больше углерода, чем кислорода, кислород будет связан в основном в форме СО. Оставшаяся часть углерода будет находиться в форме СN и различных углеводородов. Если кислорода больше, чем углерода, то углерод в основном находится в форме окиси углерода и, кроме того, образуется некоторое количество молекул воды. Таким образом, звездное происхождение молекул соответствует большому количеству СО и приводит к образованию облаков двух различных составов в зависимости от того, предполагается ли, что данное облако образуется в основном в звезде, богатой углеродом или кислородом. Расчеты для любого из этих типов звездных атмосфер не предсказывают существования молекул аммиака в заметном количестве. Для образования этой молекулы в подобных процессах необходимы звезды с большим избытком азота — условие, по-видимому, возможное в ядерных реакциях, но маловероятное.

Межзвездные пылевые частицы, — несомненно, далеко не идеальные кристаллы, — должны обладать многочисленными поверхностными особенностями и активными зонами, в которых атом может быть захвачен до тех пор, пока другой атом не приблизится и не прореагирует химически с ним. Представляется очень вероятным образование таким способом сложных молекул па поверхностях пылинок ⁷². Механизм их освобождения с поверхности после образования не так ясен. Энергия химической реакции, в которой образуется молекула, сама по себе достаточно велика и может быть достаточна для освобождения с поверхности образующейся вновь молекулы. С другой стороны, возможное столкновение фотона или энергичной частицы с поверхностью может освобождать молекулу. Вероятно, какой-нибудь еще другой источник тепла, такой, как космические лучи, может быть эффективным для испарения вещества пылинок.

Было показано⁷³, что сложные молекулы, аналогичные наблюдаемым в межзвездной среде, могут образовываться при ультрафиолетовом облучении простых газов, таких, как H₂O, CO и CO₂, адсорбированных частицами пыли. Рождение молекул и их выброс с поверхности вольфрама также были продемонстрированы⁷⁴. Поэтому образование многих разновидностей молекул в пылинках в межзвездном пространстве не представляет тайны, хотя вероятность их выброса с поверхностей пылинок количественно неизвестна. Кроме того, неясно, как молекулы, сконденсированные в частицы пыли, испаряются из них в газовое состояние. Это приводит к последнему из обсуждаемых выше предположений.

Пылинки могут приобретать энергию для освобождения молекул не только в результате единичных событий, таких, как образование химической связи или взаимодействие с фотоном или энергичной частицей, но также вследствие более макроскопических процессов нагрева. Наверное, наиболее простой пример — это нагрев пылевого облака ближней горячей звездой, возможно, новой звездой, образующейся из этого самого облака. Такой разогрев будет испарять вещество, сконденсированное в пыли, подобно тому, как молекулы и радикалы испаряются из комет вблизи Солнца. Сложные молекулы в пылевых частичках должны также быть раздроблены на более мелкие единицы. Действительно ОН и H₂O наблюдаются по их мазерному излучению вблизи области, где имеется существенное выделение энергии ⁷⁵. Другие предположительные механизмы разогрева, которые должны разрушать пылинки и приводить к образованию молекул, суть ударные волны из-за гравитационной неустойчивости и столкновения между двумя быстро движущимися облаками. В результате высокие относительные скорости между молекулами и пылинками приводят к распылению поверхностей последних ⁷⁶. Кроме того, непосредственные столкновения между частичками пыли с такими скоростями могут давать достаточную энергию для их заметного испарения ⁷⁷.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Недавнее открытие микроволнового излучения значительного количества молекул доказало существование достаточно сложных молекул в межзвездных облаках и сделало доступными для исследования плотные облака, в других случаях затемненных содержащейся в них пылью. В основном в этих облаках газ находится в форме простых относительно стабильных молекул, с атомами и свободными радикалами в меньшем количестве. Несмотря на то, что распространенность молекул уменьшается с увеличением их сложности, имеются замечательные дополнительные вариации в относительных распространенностях молекул разных сортов. К настоящему времени найдены молекулы с числом атомов до семи. Новые молекулы были обнаружены за очень короткий промежуток времени. Можно ожидать, что продолжающиеся энергичные исследования и более чувствительная принимающая аппаратура в течение одного-двух лет позволят открыть много новых молекул в дополнение к имеющимся молекулам почти двадцати типов. Процессы, в результате которых образуются эти молекулы, поняты не очень хорошо. Вероятно, они связаны с частицами пыли в газовых облаках. Некоторые разновидности молекул были найдены только в отдельных направлениях на некоторые очень плотные облака. Одно такое облако находится в направлении на туманность Ориона, другое — в Стрельце В2 вблизи центра Галактики. Другие разновидности молекул, такие, как окись углерода или формальдегид, по-видимому, распространены повсеместно. Они найдены в различных направлениях и в протяженных зонах вокруг отдельных облаков. Исследование такого большого количества сложных молекул совершенно отличается от того, что наблюдалось в звездных атмосферах или другими астрономическими методами наблюдений. Оно дает информацию о свойствах пылевых облаков, какой не было ранее.

Хотя наблюдения молекул указывают на широкий диапазон температур, скоростей и плотностей в пылевых облаках, в общем их температуры оказываются низкими в пределах десятков градусов Кельвина, и концентрации частиц в них часто удивительно высоки — от 10³ до 10⁶ молекул водорода в кубическом сантиметре. Облака часто существенно неоднородны и обладают достаточно большими разбросами скоростей и вариациями температуры. Кроме того, вероятны значительные вариации плотности, делающие возможными сильные неустойчивости и активности, включая образование звезд *).

^{*)} В работах ^{120*} указывается на возможность образования планетных систем в таких облаках.

Возбуждение различных молекулярных уровней часто далеко от термодинамического равновесия. Это является результатом конкуренции столкновений и радиационных процессов, о некоторых из них можно догадаться из наблюдений. По крайней мере в одном случае это приводит к уменьшению температуры возбуждения для двух молекулярных уровней существенно ниже, чем ожидаемые температуры пыли, радиации или кинетическая температура. В других случаях возбуждение так велико, что относительная населенность верхнего и нижнего уровней оказывается инвертированной, что приводит к усилению мазерного типа.

Мазерные усиление и излучение, явно наблюдаемые для молекул ОН и H₂O, очень интенсивны и локализованы. Излучение выходит из области, не намного превышающей размер звезды, и, по-видимому, связано со звездными процессами.

Молекулярные спектры имеют отношение к различным астрономическим проблемам. Некоторая информация, которая уже получена из спектров молекул, об относительной распространенности изотопов H, C, O и N может дать ключ к разгадке происхождения и ядерной истории межзвездной материи. Хотя имеются указания на то, что отношение ¹²C : ¹³C часто неожиданно близко к земному значению, неопределенности в наблюдаемых до сих пор оптических плотностях и неоднородностях облаков препятствуют любым категорическим выводам. Молекулярные спектры обещают также дать ценную информацию об универсальном изотропном микроволновом излучении, так как оно оказывает воздействие на возбуждение молекул. Недавно наблюдался спектр гидроксила для другой галактики. Это — начало использования молекулярных спектров для изучения условий в других галактиках.

И микроволновое, и инфракрасное излучения могут выходить из плотных пылевых облаков, где найдено большинство молекул. Как в один, так и в другой спектральные интервалы попадает очень много молекулярных линий. Кроме того, в инфракрасном диапазоне длин волн возможна более высокая направленность, чем в сантиметровом, даже для крупнейших радиотелескопов. Следовательно, можно надеяться, что развитие инфракрасных систем с очень высоким разрешением и высокой чувствительностью даст дополнительные весьма эффективные инструменты для исследования молекул в пылевых облаках. Бо́льшая часть этой работы может быть проведена в наземных обсерваториях через различные инфракрасные «окна» в земной атмосфере. Однако также можно ожидать получить важные результаты из наблюдений на самолетах, баллонах или, наконец, на спутниках для тех интервалов в инфракрасной области, где велико атмосферное поглощение.

Последние наблюдения придают новое значение хорошим микроволновым инструментам, в частности приемникам высокой чувствительности и большим антеннам с достаточно точной поверхностью для миллиметрового диапазона, который богат молекулярными явлениями. Со временем можно ожидать улучшения аппаратуры в обоих этих направлениях и заметного увеличения наблюдений молекулярных переходов.

Так как число наблюдаемых молекулярных резонансов растет и все увеличивающееся внимание направляется на настойчивое систематическое изучение их проявлений и характеристик, они смогут давать все более полные и подробные ответы на многие вопросы, в настоящее время исследованные только предварительно, и приводить к постановке дополнительных полезных исследований.

Можно ожидать, что молекулярная спектроскопия должна быть основным астрономическим инструментом в той богатой и разнообразной области, где она применяется сейчас и дополняет более привычную атомную спектроскопию, много давшую для современной астрономии. Молекулярные уровни обычно более тесно расположены, чем атомные. Поэтому они удобны для изучения скорее холодных областей, чем горячих, которые обычно изучаются с помощью атомных спектров. Это и проникающая способность более длинных волн, что характерно для молекулярных резонансов, делают возможным исследование обширных и важных районов пылевых облаков и, возможно, ранних стадий образования звезд внутри них, а также холодных составляющих других галактик.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Microwave Spectral Tables, Nat. Bur. Stand. Monogr. 70 (1968).
 T. Dunham, Jr., W. S. Adams, Publ. Astron. Soc. Pac. 49, 26 (1937).
 W. S. Adams, Astrophys. J. 109, 354 (1948).
 P. Swings, L. Rosenfeld, ibid. 86, 483 (1937); A. E. Douglas, G. Herzberg, ibid. 94, 381 (1941).
 A. McKellar, Publ. Dominion Astrophys. Observ. Victoria B. C., No. 157, 254 (1944).
- 251 (1941).
- 231 (1941).
 6. W. C. Livingston, C. R. Lynds, Astrophys. J. 140, 818 (1964); L. M. Hobbs, ibid. 142, 160 (1965).
 7. D. R. Bates, L. Spitzer, ibid. 113, 441 (1951).
 8. A. A. Penzias, R. Wilson, ibid. 142, 419 (1965).
 9. G. B. Field, J. L. Hitchcock, Phys. Rev. Lett. 16, 817 (1966).
 10. J. E. Clauser, P. Thaddeus, ibid., p. 819.
 11. V. J. Bortolot, Jr., J. F. Clomser, P. Thaddeus, ibid. 22, 307 (1960)

- (1969).

- (1969).
 12. G. H. Herbig, Zs. Astrophys. 68, 243 (1968); W. Liller, B. Zuckerman, Bull. Am. Astron. Soc. 1, 251 (1969).
 13. V. J. Bortolot, Jr., P. Thaddeus, Astrophys. J. 155, 17 (1969).
 14. P. W. Merill, ibid. 83, 127 (1936).
 15. G. H. Herbig, ibid. 137, 200 (1963); Zs. Astrophys. 64, 512 (1966).
 16. G. Herzberg, Mem. Soc. Roy. Sci. Liège, ser. 4, 15, 291 (1955); J. Opt. Soc. Am. 55, 229 (1965).
 17. F. M. Lohrson, Bull Am. Astron. Soc. 2, 323 (1970).
- 17. F. M. Johnson, Bull. Am. Astron. Soc. 2, 323 (1970).

- F. M. Johnson, Bull. Am. Astron. Soc. 2, 525 (1970).
 G. R. Carruthers, Astrophys. J. 161, 81 (1970).
 A. M. Smith, T. P. Stecher, ibid. 164, L43 (1971).
 a) S. Weinreb, A. H. Barrett, M. L. Meeks, J. C. Henry, Nature 200, 829 (1963); 6) A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, D. S. Thornton, W. J. Welch, Phys. Rev. Lett. 21, 1701 (1968).
 F. F. Gardner, R. X. McGee, M. W. Sinclair, Astrophys. Lett. 5, 67 (1970).
 F. J. Kerr, B. Vallak, Austr J. Phys. Astrophys. Suppl. 3, 1 (1967).

- 5, 67 (1970).
 22. F. J. Kerr, R. Vallak, Austr. J. Phys., Astrophys. Suppl. 3, 1 (1967).
 23. P. Palmer, B. Luckerman, Astrophys. J. 148, 727 (1967).
 24. S. H. Knowles, C. H. Mayer, A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, Science 163, 1055 (1969).
 25. B. Höglund, P. C. Mezger, Science 150, 339 (1965).
 26. W. M. Goss, Astrophys. J. Suppl. 15, 131 (1968); M. Litvak, Astro-phys. J. 156, 471 (1969); W. J. Wilson, A. H. Barrett, J. M. Moran, ibid 160, 545 (1970). ibid. 160, 545 (1970).
- 27. J. M. Moran, B. F. Burke, A. H. Barrett, D. C. Cudaback, O. Rydbeck, B. Hansson, A. E. E. Rogers, J. A. Ball, Astron.
- 27. J. M. Moran, B. F. Burke, A. H. Barrett, D. C. Сицараск, O. Rydbeck, B. Hansson, A. E. E. Rogers, J. A. Ball, Astron. J. 73, S168 (1968).
 28. J. M. Moran, B. F. Burke, A. H. Barrett, A. E. E. Rogers, J. C. Carter, J. A. Ball, D. C. Cudaback, ibid., p. S27; K. J. Johnston, S. H. Knowles, W. T. Sullivan III, J. M. Mo-ran, B. F. Burke, K. Y. Lo, D. C. Papa, G. D. Papa-dopoulos, P. R. Schwartz, C. A. Knight, I. I. Shapiro, W. J. Welch, Astrophys. J. 166, L21 (1971).
 29. A. C. Cehung, D. M. Rank, C. H. Townes, W. J. Welch, Nature 221, 917 (1969).
 30. P. Palmer, B. Zuckerman, D. Buhl, L. E. Snyder, Astrophys. J. 156, L147 (1971).
 31. L. Weliachew, ibid. 167, L47 (1971).
 32. C. H. Townes, A. L. Schawlow, Microwave Spectroscopy, N. Y., McGraw-Hill, 1955 (см. перевод: Ч. Таунс, А. Шавлов, Радио-спектроскопия М., ИЛ, 1959).

- 33. P. M. Solomon, M. W. Werner, Astrophys. J. 165, 41 (1971). 34. G. B. Field, D. W. Goldsmith, H. J. Habing, ibid. 154, 149 (1969).
- 35 A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, S. H. Knowles, W. T. Sullivan, III, *ibid.*, p. L13.
 36. N. Z. Scoville, P. M. Solomon, P. Taddeus, *ibid.* 172, 335 35
- (1972).
- 37. J. Lequeux, Ann. de Astrophys. 25, 221 (1962).
 38. B. Zuckerman, D. Buhl, P. Palmer, L. E. Snyder, Astrophys. J. 160, 485 (1970).
- 39. A. A. Penzias, P. M. Solomon, K. B. Jefferts, R. W. Wilson, Astrophys. J. (B печати).
 40. P. W. Daly, T. Oka, J. Chem. Phys. 53, 3272 (1970).
 41. T. Oka, F. O. Shimizu, T. Shimizu, J. K. G., Watson, Astro-
- phys. J. 165, L15.
- 42. С. Н. Тоwnes, А. С. Сheung, ibid. 157, L103 (1969).
 43. Р. Thaddeus, Р. М. Solomon, Bull. Am. Astron. Soc. 2, 218 (1970).
 44. М. Litvak, Astrophys. J. 160, 133 (1970).
 45. W. D. Gwinn, С. Н. Тоwnes, работа, доложенная на Международной постатися с постатися с материи 1968.
- конференции по квантовой электронике, Майами, 1968. 46. М. Litvak, A. L. McWhorter, M. L. Meeks, H. J. Zeiger, Phys. Rev. Lett. 17, 821 (1966); M. Litvak, Astrophys. J. 156, 471 (1969);
- Hys. Rev. Lett. 17, 621 (1966); М. L I U VAK, Astrophys. J. 196, 471 (1969); И. С. Ш К ловский, Астрон. цирк. № 372 (1966).
 47. S. H. Knowles, C. H. Mayer, A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, Science 163, 1055 (1969).
 48. W. T. Sullivan III, Astrophys. J. 166, 321 (1971).
 49. A. C. Cheung, N. J. Evans II, C. H. Townes, M. W. Werner
- 49. А. С. Сћечпд, N. Ј. Еуанз н. С. н. токист, (не опубликовано).
 50. Р. В. Амбарцумян, С. П. Бажулин, Н. Г. Басов, В. С. Летохов, ЖЭТФ 58, 441 (1970).
 51. N. J. Evans II, R. E. Hills, O. E. H. Rydebeck, E. Kollberg, Phys. Rev. A6, 1643 (1972).
 52. А. Е. Е. Rogers, А. Н. Ваггеtt, Astron. J. 71, 868 (1966).
 53. W. J. Wilson, A. H. Barrett, Astrophys. Lett. 6, 231 (1970).
 54. S. Weinreb, Nature 195, 367 (1962).
 55. Р. Solomon, работа, доложенная на 17-м Международном астрофизическом

- симпозиуме, Льеж, 1971.
- 56. G. R. Caughlan, W. A. Fowler, Astrophys. J. 136, 453 (1962).
 57. H. Spinard, L. D. Kaplan, R. Connes, J. Connes, J. Kunde, Proc. of the Conference on Late Type Stars, Kitt Peak Nat. Observ. Contrib., 1070 554 1970, р. 554. 58. D. L. Lamberg, D.S. Dearborn, работа, доложенная на 17-м Между-
- народном астрофизическом симпозиуме, Льеж, 1971.

- 87 (1969).
 61. J. R. Houck, M. Harwit, Science 164, 1271 (1969).
 62. J. F. Clauser, P. Thaddeus, сборник «Topics in Relativistic Astrophysics», Ed. S. P. Marom and A. G. W. Cameron, N. Y., Gordon and Breach (в печати).
- (B печати).
 63. N. J. Evans II, R. Sloanaker, частное сообщение.
 64. E. P. Gentieu, J. E. Mentall, Science 169, 681 (1970); L. J. Stief, B. Donn, S. Glicker, E. P. Gentien, J. E. Mentall, Astro-phys. J. 171, 21 (1972).
 65. M. R. C. McDowell, Observatory 81, 240 (1964).
 66. R. J. Gould, E. E. Salpeter, Astrophys. J. 138, 393 (1963); T. de Jong, Astron. and Astrophys. 20, 263 (1972).
 67. P. S. Julienne, M. Krauss, B. Donn, Astrophys. J. 170, 65 (1971).
 68. W. Klemperer, Highlights of Astronomy, Ed. C. De Jager, Dordrecht, D. Reidel, 1971.

- D. Reidel, 1971.
- 69. H. Spinard, R. F. Wing, Ann. Rev. Astron., Astrophys. 7, 249 (1969).
 70. a) S. R. Pottasch, сборник «Intern. Astron. Union Symposium No. 39», Ed. H. J. Haping, 1970, p. 272; 6) R. D. Gehrz, N. J. Woolf, Astrophys. J.
- H. J. Hapmg, 1010, p. 22, 0, 21
 165, 285 (1974).
 71. G. Goon, J. R. Auman, ibid. 161, 333 (1970).
 72. D. Hollenbach, E. E. Salpeter, ibid. 163, 155 (1971); D. H. Hollenbach, M. W. Werner, E. E. Salpeter, ibid., p. 165.

- 73. J. S. Hubbard, J. P. Hardy, N. H. Horowitz, Proc. Nat. Ac.
- 73. 3. 5. на выга, 3. г. на гау, К. н. ного witz, гюс. Nat. Ac. Sci. U. S. 68, 574 (1971).
 74. н. D. Bruer, H. Moesta, N. Trappen, Naturwiss. 57, 452, 453 (1970); Chem. Zs. Chem. App. 94, 129 (1970).
 75. Р. G. Mezger, сборник ^{70a}, р. 336.
 76. Р. Ааnnestad, G. B. Field, частное сообщение.
 77. J. H. Oort, H. C, Van de Hulst, Bull. Astron. Inst. Neth. 10, 187 (1976).

- (1946).
- 78. a) B. J. Robinson, F. F. Gardner, K. J. Van Damme, J. G. Bolton, Nature 202, 989 (1964); 6) H. Weaver, D. R. W. Williams, N. H. Dieter, W. T. Lum, Nature 208, 29 (1965).
 79. J. L. Yen, B. Zuckerman, P. Palmer, H. Penfield, Astrophys. J. 156, L27 (1969).
 90. B. E. TURDOR, B. Palmor, B. Zuckerman, ibid 160, 125 (1970).
- 80. B. E. Turner, P. Palmer, B. Zuckerman, ibid. 160, 125 (1970). 81. B. E. Turner, P. Palmer, H. Penfield, A. E. Lilley, ibid.
- 153, L69 (1968).
 82. P. R. Schwartz, A. H. Barrett, ibid. 157, L109 (1969); J. A. Ball, C. A. Gottlieb, M. L. Meeks, H. E. Radford, ibid. 163, L33 (1971).
- 83. A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, W. J. Welch, Nature 221, 917 (1969).
- 84. A. C. Cheung, D. M. Rank, C. H. Townes, D. D. Thornton, W. J. Welch, ibid., p. 626.
 85. L.E. Snyder, D. Buhl, B. Zuckerman, P. Palmer, Phys. Rev. Lett. 22, 679 (1969); M. Kutner, P. Thaddeus, Astrophys. J. 168, L67 (1971).

- (1971).
 86. N. J. Evans II, A. C. Cheung, R. M. Sloanaker, ibid. 159, 9 (1970).
 87. W. J. Welch, Bull. Am. Astron. Soc. 2, 355 (1970).
 88. M. Kutner, P. Thaddeus, K. B. Jefferts, A. A. Penzias, R. W. Wilson, Astrophys. J. 164, L49 (1971).
 89. P. Thaddeus, R. W. Wilson, M. Kitner, A. A. Penzias, K. B. Jefferts, ibid. 168, L59.
 90. B. Zuckerman, P. Palmer, L. E. Snyder, D. Buhl, ibid. 157, 1467 (4060).
- L167 (1969). 91. R. W. Wilson, K. B. Jefferts, A. R. Penzias, ibid. 161, L43
- (1970).*
- 92. A. A. Penzias, K. B. Jefferts, R. W. Wilson, ibid. 165, 229 (1971).

- 93. K. B. Jefferts, A. A. Penzias, R. W. Wilson, ibid. 161, 87 (1970).
 94. L. E. Snyder, D. Buhl, ibid. 163, L47 (1971).
 95. D. Buhl, L. E. Snyder, Nature 228, 267 (1970).
 96. B. E. Turner, Astrophys. J. 163, L35 (1971).
 97. J. A. Ball, C. Z. Gottlieb, A. E. Lilley, H. E. Radford, ibid. 469, L902 (1970). ibid. 162, L203 (1970).
- 98. A. H. Barrett, P. R. Schwartz, J. W. Waters, ibid. 168, L101 (1971).
- 99. R. W. Wilson, A. A. Penzias, K. B. Jefferts, M. Kutner, P. Thaddeus, ibid. 167, L97.
- 100. B. Zuckerman, J. A. Ball, C. A. Gottlieb, ibid. 163, L41. 101. A. A. Penzias, P. M. Solomon, R. W. Wilson, K. B. Jefferts, ibid. 168, L53; К. В. Јеfferts, работа, доложенная на 17-м Между-
- ferts, ibid. 168, L53; К. В. Jeiterts, работа, доложенная на 17-м Международном астрофизическом симпозиуме, Льеж, 1971.
 102. L. E. Snyder, D. Buhl, Bull. Am. Astron. Soc. 3, 388 (1971).
 103. K. B. Jefferts, E. A. Penzias, P. M. Solomon, R. W. Wilson, Astrophys. J. 168, L111 (1971).
 104. P. M. Solomon, K. B. Jefferts, A. A. Penzias, R. W. Wilson, ibid., p. L107.
 105. R. H. Rubin, G. W. Swenson, Jr., R. C. Benson, H. L. Tigelaar, W. H. Flygar, ibid. 169, L39.
 106. J. A. Ball, C. A. Gottlieb, A. E. Lilley, H. E. Radford, Intern. Astron. Union Circ., No. 2350 (1971).
 107*. M. W. Sinclair, J. C. Ribes, B. Fourikis, R. D. Brown,

- 107*.M. W. Sinclair, J. C. Ribes, R. Fourikis, R. D. Brown, P. D. Godfrey, ibid., No. 2362 *).
 108*. P. Thaddeus, M. Kutner, A. A. Penzias, R. W. Wilson, K. B. Jefferts, Astrophys. J. 176, L73 (1972).
 109*. P. D. Godfrey, R. D. Brown, B. J. Robinson, M. W. Sin-clair, Astrophys. Lett. 13, 119 (1973).

^{*)} Литература, помеченная звездочкой, добавлена переводчиком. (Прим. ред.)

1

- 110*. R. W. Wilson, A. A. Penzias, K. B. Jefferts, P. M. Solomon, Astrophys. J. 179, L107 (1973).
 111*.Б. Ф. Берк, К. Д. Джонстон, В. А. Ефанов, Б. Д. Кларк, Л. Р. Коган, В. И. Костенко, К. У. Ло Л. И. Матвеенко, И. Г. Моисеев, Д. М. Моран, С. Х. Ноулс, Д. К. Папа, Г. Д. Пападополус, Л. И. Роджерс, П. Р. Шварц, Астрон. ж. 49, 465 (1972).
 112*. К. L. Kellermann, D. L. Louncey, M. H. Cohen, B. R. Shaf-
- 1. И. Пападонолус, л. н. годжерс, н. т. шварц, морон. м. 49, 465 (1972).
 112*. К. I. Kellermann, D. L. Jouncey, M. H. Cohen, B. B. Shaf-fer, B. G. Clar, J. Broderick, B. Rönang, O. E. H. Rydbeck, L. Matveyenko, I. Moiseyev, V. V. Vitkevitch, B. F. C. Cooper, R. Batchelor, Astrophys. J. 169, (1; pt. 1), 1 (1971).
 113*. K. I. Kellermann, Scientific American 226(2), 72 (1972) (см. перевод; УФН 109, 594 (1973)).
 114*. P. Goldreich, D. A. Keeley, Astrophys. J. 174, 517 (1972); P. Gold-reich, D. A. Keeley, J. J. Kwan, ibid. 179, 114 (1973).
 115*. A. H. Barrett, R. N. Martin, P. C. Myers, P. R. Schwarthz, ibid. 178, 23 (1972).
 116*. D. ter Haar, M. A. Giddy, Interstellar Hydroxyl, Water, and Formald-ehyde Masers, Univ. of Oxford Preprint, 1973.
 117*. B. C. Летохов, Астрон. ж. 49, 737 (1972).
 118*. K. B. Jefferts, A. A. Penzias, R. W. Wilson, Astrophys. J. 179, L57 (1973).
 119*. A. E. Glassgold, W. D. Lauger, ibid., p. L147.
 120*. V. S. Strelnitsky, R. A. Synyaev, D. A. Varchalovich, Comm. Astrophys. and Space Sci. 4, 155 (1972); B. C. Cтрельницкий, P. A. Сюняев, Астрон. ж. 49, 704 (1972).