

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.161

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МОЛЕКУЛЫ*)

Ч. Таунс

(Переработанный для печати текст Галлеевской лекции 1976 г.,
прочитанный в Оксфорде 4 июня 1976 г.)

Молекулы в межзвездном пространстве стали объектом плодотворных исследований сравнительно недавно; в частности, большое число полиатомных молекул, которые, как мы теперь знаем, существуют в плотных, холодных и темных межзвездных облаках, было открыто лишь в последнее десятилетие. Разумеется, приборы и методы, которые оказались необходимыми для большинства этих открытий, нельзя было даже представить себе ни во времена профессора Галлея, ни в недавнем прошлом, по крайней мере до тех пор, пока не были открыты радиоволны. Сейчас мы называем эту область микроволновой астрономией, но и ее успехи оказались бы невозможными без того замечательного прогресса в развитии СВЧ аппаратуры, который был достигнут в годы второй мировой войны. И все же эта новая область исследований довольно близка к предмету, представлявшему величайший интерес для Галлея. Именно Галлей первым доказал, что кометы — это материальные тела, приходящие к нам из областей пространства, лежащих далеко за пределами собственно Солнечной системы. Следовательно, вещество комет представляет собой, вероятно, самый доступный нам образец тех молекул и пыли, из которых состоит темное межзвездное вещество, причем образец настолько близкий, что космическая техника в недалеком будущем обеспечит прямой контакт с ним и возможности исследования этого вещества. В то же время наши знания о веществе более далеких от нас облаков быстро обогащаются благодаря спектроскопическим исследованиям, в особенности в инфракрасной и микроволновой областях. Более того, радиоастрономические методы, которые оказались столь успешными для изучения межзвездных облаков, теперь применяются для исследований хвостов и голов комет, что позволило отождествить в них несколько молекул, уже обнаруженных в межзвездных облаках, и подтвердило по меньшей мере сходство вещества комет и межзвездных облаков.

Самые первые межзвездные молекулы были обнаружены по линиям поглощения в межзвездном пространстве в оптических спектрах звезд в 1937 г.¹ Молекулы, открытые в тот период, оказались радикалами CN , CN^+ и C_2 . Астрономы того времени выполнили свою работу столь тща-

*) Townes C. H. *Interstellar Molecules: A Written Version of the Halley Lecture for 1976*. Delivered in Oxford, June 4, 1976.— Observatory, April 1977, v. 97, No. 1017, pp. 52—73.— Перевод И. В. Самсоенко.

© The Observatory, 1977.

© Перевод на русский язык,
Главная редакция физико-математической
литературы издательства «Наука»,
«Успехи физических наук», 1979.

Таблица I

Простые гидриды, окислы, сульфиды и производные аммиака, уже отождествленные в межзвездных облаках; приведены также некоторые соединения, которые, вероятно, присутствуют в межзвездном пространстве, но пока не отождествлены

Молекулы, отождествленные в облаках:	H_2	CO	NH_3	
	OH	CS	$H_2C=N \begin{array}{l} / \\ \backslash \\ H \end{array}$	
	CH	NS	H_2C-NH_2	
	CH^+	COS	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=O \end{array}$	
	OH_2	SiO	$H_2N \begin{array}{l} / \\ \backslash \\ C=O \end{array}$	
	SH_2	SiS	$N \equiv N^+ - H$	
	NH_3	SO		
		SO_2		
	Не отождествлены:	CH_4	O_2	N_2
		CH_3	C_2	NH_2
CH_2		NO	NH	
NH_2		N_2O		
NH		NO_2		
		CO_2		

Таблица II

Молекулы группы циана или имеющие линейную цепь атомов углерода, обнаруженные в межзвездных облаках, а также несколько молекул, существование которых можно предположить, хотя они пока не отождествлены

Молекулы, обнаруженные в облаках:	
$CN, HC \equiv C - C \equiv N,$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ N=C=O, \end{array}$
$HC \equiv N, HC \equiv C - C \equiv C - C \equiv N, C \equiv C - H,$	
$H_3C - C \equiv N, H_2C = C \begin{array}{l} / \\ \backslash \\ H \\ C \equiv N \end{array}, H_3C - C \equiv C - H.$	
Не отождествлены:	
$H - C \equiv C - H,$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C = C \begin{array}{l} / \\ \backslash \\ H \\ H \end{array}, H_3C - CH_3$

Таблица III

Молекулы, связанные с формальдегидом, спиртами и эфирами, которые были отождествлены в межзвездных облаках

$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=O, \\ / \\ H \end{array}$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=O, \\ / \\ H_4N \end{array}$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=S, \\ / \\ H \end{array}$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ O, \\ / \\ H_3C \end{array}$
$H - C = O,$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=O, \\ / \\ H-O \end{array}$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=N-H, \\ / \\ H \end{array}$	$\begin{array}{l} H \\ \\ C \begin{array}{l} / \quad \backslash \\ O-H \quad H \\ \\ H_3C \end{array}, \begin{array}{l} H \\ \backslash \\ C=O, \\ / \\ H_3C \end{array}$
$H_3C - O \begin{array}{l} / \\ \backslash \\ C=O, \\ / \\ H \end{array}$	$\begin{array}{l} H \\ \backslash \\ O, \\ / \\ H \end{array}$	$\begin{array}{l} H_3C \\ \backslash \\ O \\ / \\ H_3C \end{array}$	

тельно, что никаких других молекул в следующие 25 лет не было обнаружено, причем последующие открытия были сделаны только при помощи принципиально новых методов сантиметровой радиоастрономии. В качестве кандидатов на обнаружение в сантиметровом диапазоне рассматривалось ² много молекул, и первая из них, OH, была найдена в 1963 г. ³. Вообще говоря, предполагалось, что молекулы OH должны присутствовать в довольно большом числе в межзвездном пространстве ввиду их сходства со свободными радикалами, ранее обнаруженными посредством оптических методов, однако открытие молекул гидроксила дало астрономии много нового, в том числе обнаружение первых мазеров в космическом пространстве. Еще большим сюрпризом было открытие по наблюдениям в сантиметровом диапазоне многоатомных молекул NH₃ и H₂O ⁴. Вслед за ними вскоре последовало обнаружение формальдегида ⁵, окиси углерода ⁶, а также большого числа других молекул.

В настоящее время в межзвездном пространстве обнаружено 39 различных молекулярных соединений; десять из них — неорганические молекулы, а 29 — органические в том смысле, что в их составе по крайней мере один атом углерода. Десять молекул содержат более одного атома углерода, включая такие сравнительно сложные молекулы, как этиловый спирт, диметиловый эфир и циандиацетилен. Среди всей группы отождествленных к настоящему времени межзвездных молекул довольно большое число, а именно восемь, являются свободными радикалами.

В табл. I, II и III представлено несколько групп молекул, открытых в межзвездном пространстве. Перечислено также несколько связанных с ними молекул, которые, по всей вероятности, должны присутствовать в межзвездном пространстве, однако пока еще не обнаружены — либо потому, что они относительно редки, либо потому, что их спектры не охватываются существующими методами. В табл. I включены простые гидриды, окислы и сульфиды, а также различные производные аммиака. В табл. II включены группа циана и молекулы, содержащие линейные углеродные цепи. В табл. III перечислена группа молекул, связанных по структуре с формальдегидом, спиртами и эфирами.

Относительно большая доля обнаруженных свободных радикалов явно отражает особенности образования молекул и редкость взаимных столкновений в межзвездном пространстве. Часть этих радикалов, а именно N₂H⁺, C₂H, HCO⁺, ранее не была отождествлена в газообразной форме в лабораторных условиях, так что межзвездное пространство дало нам первую возможность изучить их вращательные спектры и тем самым получить данные об их строении.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ

Нередко точное измерение единственной линии в сантиметровом диапазоне обеспечивает вполне уверенную идентификацию молекулы; точные частоты двух линий дают почти полную уверенность в правильности отождествления молекулярного спектра, хорошо изученного в лаборатории. Однако идентификация менее надежно измеренных молекул, например вновь найденных радикалов, представляет трудную и в то же время увлекательную задачу.

В течение некоторого времени довольно интенсивная линия, в настоящее время отождествленная как линия HCO⁺, наблюдалась в большом числе межзвездных облаков, и молекула, вызывающая ее, была названа «иксогоном», как синоним неизвестного. Хотя и предполагалось ⁷, что неизвестной молекулой является HCO⁺, уверенность в правильности этого предположения отсутствовала до тех пор, пока не была найдена

вращательная линия ⁸, соответствующая наличию в этой молекуле изотопа ¹³C, что повысило надежность определения. Позднее в лабораторных

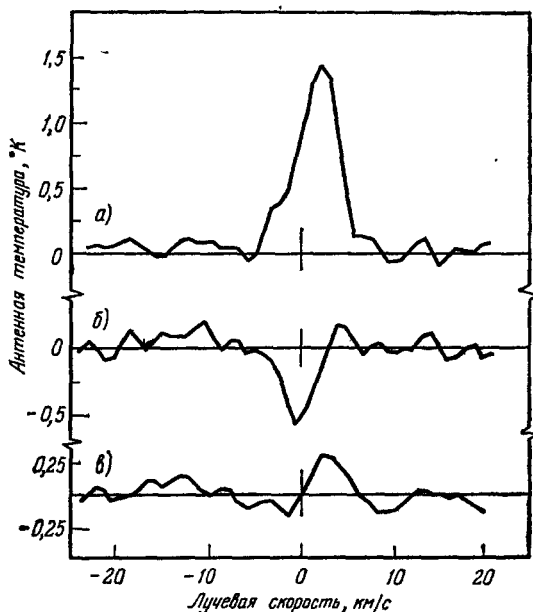


Рис. 1. Три (сверхтонкие компоненты перехода Λ -удвоения молекулы CN вблизи $\lambda = 9$ см, показывающие отклонения от термодинамического равновесия в источнике RCW 28 ¹².

и почти всегда в эмиссии на фоне этого континуума ¹¹. Три компоненты сверхтонкой структуры, которые помогли провести отождествление, часто имеют относительные интенсивности, отличающиеся от предсказанных для условий термодинамического равновесия, что показано на рис. 1.

МОЛЕКУЛЫ В ДРУГИХ ГАЛАКТИКАХ

Об обнаружении молекул OH в других галактиках впервые было сообщено в 1971 г. ¹³. Позднее в нескольких спиральных галактиках, сходных с нашей, был обнаружен и изучен формальдегид.

На рис. 2 показан спектр CO в галактике M 51 в зависимости от расстояния до центра Галактики, что определяет линейную скорость ее вращения. На рис. 3 приведены спектры CO в ряде галактик (включая нашу собственную), наблюдаемых в основном «с ребра», так что широкий разброс скоростей укладывается в пределы ширины полосы приема.

ХИМИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ МОЛЕКУЛ

Химические закономерности, проявляющиеся при образовании молекул, обнаруженных в межзвездном пространстве, представляются достаточно сложными. На первый взгляд кажется, что эти молекулы образовались в условиях высокой температуры или высокого возбуждения, после чего были быстро охлаждены, так что связи у них, характеризующиеся довольно высокой энергией, стали «замороженными». Таким путем молекулы могли бы возникать в атмосферах звезд. С другой стороны, моле-

словиях были получены спектры H^{12}CO^+ и H^{13}CO^+ , что сняло какие-либо сомнения в правильности отождествления.

Свободный радикал CN — одна из первых молекул, которая была открыта в космическом пространстве из оптических спектров, но оказалась труднодоступной для обнаружения радиоастрономическими методами, потому что частота перехода для этой молекулы, соответствующая Λ -удвоению, не была достаточно точно известна. Наконец в 1973 г. ^{9, 10} она была обнаружена в сантиметровом диапазоне — тридцать шесть лет спустя после ее первоначального открытия и лишь в результате нескольких попыток. Сейчас этот радикал обнаружен во многих межзвездных облаках, в спектрах которых имеется достаточно существенной континуум,

кулы могли бы формироваться в условиях, при которых имели место индивидуальные квантовые процессы высокой энергии, отделенные во времени один от другого. Двойная углеродная связь — достаточно широко распространенное явление, и молекулы, связанные с формальдегидом и цианидами, тоже оказываются достаточно распространенными. Далее, не было обнаружено никаких молекул, содержащих углеродные кольца, хотя некоторые из отождествленных молекул содержат довольно сложные углеродные цепи. Весьма примечательно, что не обнаружена молекула NO, хотя

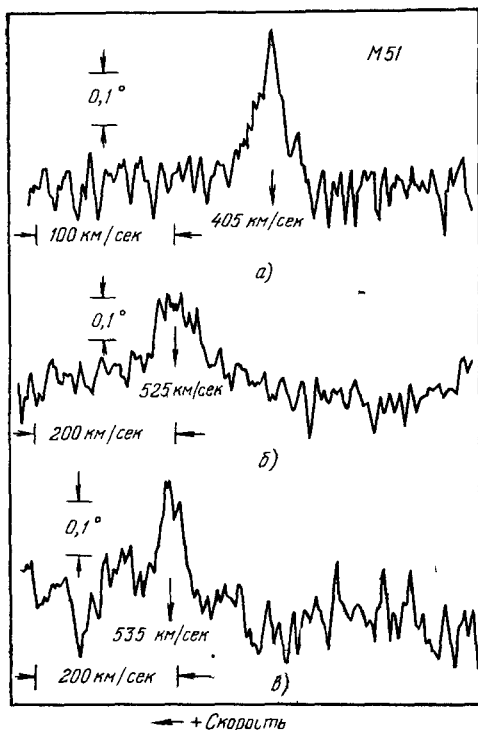


Рис. 2. Эмиссия CO от источника M51, показывающая вариации средней скорости, вызванные вращением, в функции положения в галактике M51.

а) В центре M51, б) на расстоянии $1'$ от центра, в) на расстоянии $2'$ от центра

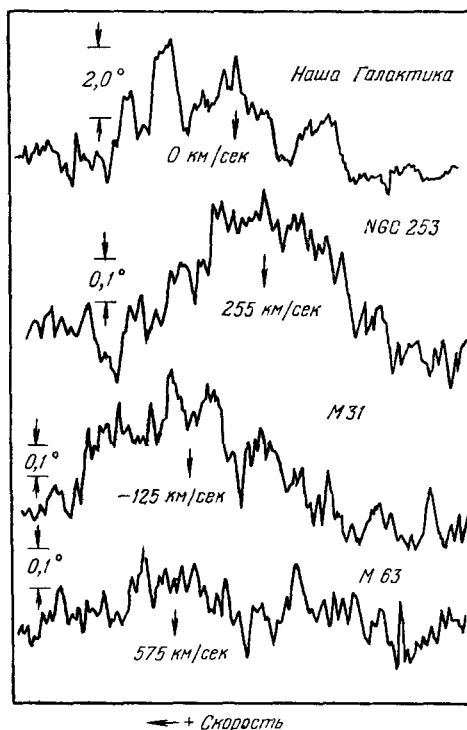


Рис. 3. Эмиссия CO от различных галактик, включая нашу Галактику¹⁴. Каждое деление на оси абсцисс соответствует 10 км/сек.

многие астрономы занимались ее поисками. В то же время серусодержащий аналог NO — молекула NS, обладающая менее сильной связью и содержащая гораздо менее обильный элемент — серу S, — в космическом пространстве присутствует.

Для объяснения образования молекул было предложено много механизмов. Они включают двойные столкновения молекул, образование молекул на поверхности частиц пыли с последующим удалением с поверхности, распад более сложных молекул, которые преимущественно накопились в частицах пыли, а также формирование молекул в атмосферах звезд с последующим выбросом в межзвездные облака. Весьма возможно, что многие из перечисленных механизмов действуют и в реальных условиях.

Несколько групп специалистов считают, что для процессов образования новых молекул гораздо больше подходят ион-молекулярные столкновения, а не двойные столкновения молекул. Однако, хотя ион-молеку-

лярные столкновения действительно кажутся наиболее подходящим источником молекул, те немногие эксперименты, которые были предложены для отождествления характерных процессов, привели либо к отрицательным, либо к неопределенным результатам.

Межзвездная пыль должна, безусловно, играть важную роль в истории возникновения некоторых молекул. Многие молекулы легко абсорбируются на поверхности частиц межзвездной пыли, и было показано в лабораторных экспериментах, что несколько межзвездных соединений должно без труда формироваться на поверхности пылевых частиц. После формирования молекулы могут выбрасываться с поверхности за счет энергии тех химических реакций, при которых они образуются, или за счет поглощения ультрафиолетовых фотонов, которые выбивают из поверхности отдельные молекулы; возможно также, что либо фотоны, либо химические реакции обеспечивают достаточный приток тепла к пылевым частицам, чтобы молекулы сами по себе срывались с их поверхностей.

Первоначально образование сложных молекул в межзвездных облаках многим казалось чем-то загадочным. Для нынешней ситуации уже характерен широкий набор различных механизмов их образования, но до сих пор не выявлены четко те специфические пути, по которым в основном происходит формирование молекул.

РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ИЗОТОПОВ

Ряд недавних исследований молекул в межзвездных облаках был направлен на измерение относительных обилий изотопов. Полученные результаты оказались существенными для понимания истории Галактики, и мы обсудим их здесь достаточно детально *).

Для наблюдений различных изотопов вращательные спектры молекул особенно пригодны; дело в том, что момент инерции молекулы заметно меняется при любом изменении атомных масс изотопов, что обеспечивает как выделение, так и отождествление вращательных линий различных изотопов. К настоящему времени уже обнаружено несколько изотопов наиболее распространенных элементов, и получено большое количество данных наблюдений, из которых можно, в принципе, вывести распространенности изотопов в межзвездных облаках нашей Галактики, а в пределе — и во многих других галактиках. Однако при выводе значений распространенностей из наблюдений относительных интенсивностей линий изотопов существуют определенные трудности. В числе этих трудностей наиболее очевидной и серьезной является проблема оптической толщи, или насыщения интенсивности линий. Нередко значение оптической толщи для спектральной линии в межзвездном облаке совершенно неопределенно, частично потому, что эффективная температура возбуждения неизвестна (и вряд ли близка к любой измеряемой температуре), а частично потому, что нельзя считать излучение облака равномерно заполняющим всю апертуру антенны радиотелескопа. Например, даже полная интенсивность эмиссионной линии может куда меньше соответствовать антенной температуре, чем тому значению, которое принималось для температуры возбуждения рассматриваемых молекулярных уровней; эта линия может оказаться достаточно толстой оптически, поскольку ее излучение, возможно, связано с малыми участками облака, заполняющими своим излучением диаграмму направленности антенны, а не с одиночным протяженным облаком, целиком заполняющим своим излучением антенну. Даже если такой предельный случай не имеет места, оптическая толща

*) Ввиду важности и быстрого увеличения количества данных об изотопах, именно здесь будет добавлен новый материал, не входивший в текст Галлеевской лекции.

и температура в облаке едва ли могут считаться однородными по всей области, охватываемой диаграммой направленности антенны; нельзя также предполагать, что вследствие доплеровского уширения контур линии будет иметь сколько-нибудь простую форму. Две другие трудности, которые могут оказаться весьма серьезными в ряде случаев, связаны с проблемой: сконцентрирован ли интересующий нас изотоп в молекулах какого-либо частного вида или же его распространенность относится к облаку в среднем, и не могут ли различные соединения, содержащие данный изотоп, возбуждаться в различной степени для данного вращательного перехода? Если исключить дейтерий, то процессы химического фракционирования (т. е. концентрации изотопных соединений в молекулах определенного типа) кажутся далеко не достаточными, чтобы их влияние превысило существующую невысокую точность измерений отношений обилий изотопов. Однако химическое фракционирование может привести к серьезным неопределенностям, которые мы рассмотрим более детально с учетом экспериментальных данных.

Возбуждение столкновениями обычно не вносит каких-либо серьезных различий в возбуждение молекул, содержащих разные изотопы. С другой стороны, возбуждение посредством резонансного поглощения или резонансного захвата излучения может привести к существенным изменениям степени возбуждения. Проблема захвата излучения тесно связана с оптической толщей. В частности, указанные процессы приводят к большим неопределенностям, когда присутствует стимулированное излучение или поглощение от непрерывного фона. Это происходит потому, что интенсивность стимулированного поглощения (или излучения) пропорциональна разности населенностей верхних и нижних состояний, которая меньше населенности каждого из уровней на множитель, приблизительно равный $h\nu/kT$. С другой стороны, спонтанное излучение, которое вызывает эмиссию от тонкого облака в отсутствие какого-либо континуума, просто пропорционально населенности верхнего уровня. Следовательно, его интенсивность менее чувствительна к возмущениям населенности уровней, чем интенсивность стимулированного излучения (или поглощения), на множитель $kT/h\nu$, который нередко достигает значения 10 или даже 100. В качестве грубого указания можно принять, что оптическая толща должна быть много меньше $h\nu/kT$, прежде чем стимулированные радиативные эффекты могут считаться свободными от возмущающего влияния захваченного излучения. Поглощение молекулами H_2CO является надежно установленным исключением из этого правила, поскольку температура возбуждения этой молекулы весьма низка (~ 1 °K) и множитель $kT/h\nu$ невелик.

К счастью, существует ряд мер, помогающих преодолеть указанные выше трудности и получить надежные и заслуживающие доверия измерения относительных обилий изотопов. Тем не менее эти меры опираются на предположение, что отсутствуют какие-либо неизвестные до сих пор аномалии или природы межзвездных облаков, или возбуждения молекул, или дифференциальных концентраций изотопов. Нередко оказывается возможным использовать слабые линии, которые, как правило, не приводят к затруднениям, связанным с оптической толщей. О роли оптической толщи можно в определенной степени судить по интенсивности линии; однако более надежным критерием оказывается сравнение контуров линий для двух соединений, содержащих разные изотопы с сильно различающимися распространенностями, или двух связанных линий с сильно различающимися интенсивностями. Если контуры этих линий весьма близки по форме, то полные интенсивности этих линий дадут нам достаточно точную меру распространенностей изотопов.

Однако следует учитывать, что в некоторых случаях мы можем заблуждаться. В самом деле, как правило, облака межзвездного газа состоят из большого числа сгустков, причем размеры любого из них существенно меньше, чем ширина диаграммы направленности антенны. Если каждый сгусток оптически толст, то контур линии определяется в основном относительными скоростями этих сгустков, и все линии, которые представляются достаточно глубокими оптически, должны иметь приблизительно одинаковые контуры, независимо от их фактической глубины. Наличие градиента скоростей в облаке может дать аналогичные эффекты. В некоторых случаях линии, которые оказываются достаточно глубокими в своих центральных частях, еще допускают определение распространенностей изотопов, если измерение относительных интенсивностей производится достаточно далеко от центра линии в ее крыльях, где линия вряд ли оказывается оптически глубокой. Перенесение подобных измерений как можно дальше в крылья линии и экстраполяция результатов в функции расстояния от центра линии позволяет выполнять достаточно надежные определения отношений распространенностей изотопов.

Нередко для исключения трудностей, связанных с оптической толщей, оказывается полезным метод, состоящий в сравнении интенсивностей линий только относительно редких изотопов. Например, отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ может быть измерено путем исследования очень слабых линий CO в мало распространенных соединениях $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ и $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$. Однако, как правило, объединение таких редких изотопов, как ^{13}C и ^{18}O , в одну молекулу дает настолько слабые линии, что либо оказывается невозможным обнаружение этих молекул, либо измеренные интенсивности получаются слишком неточными. Комбинация только что описанного метода с использованием далеких крыльев линий делает весьма важным фактором предельно достижимую чувствительность.

Весьма полезный метод, который может дать довольно надежную, хотя и более сложную по своей природе информацию, состоит в использовании отношений распространенностей двух редких изотопов. Так, два редких изотопа ^{17}O и ^{18}O могут быть сравнены по спектрам молекулярных соединений или же «гибридное» отношение изотопов может быть выведено путем сравнения интенсивности линии $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ с интенсивностью линии $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$. Если эти линии оптически тонки (что отнюдь не обязательно даже для таких редких изотопов), то отношение их интенсивностей сразу даст нам распространенность ^{13}C по отношению к распространенности ^{18}O , поскольку относительные распространенности ^{12}C и ^{16}O близки к 100%. Аналогично можно получить распространенность ^{13}C относительно распространенности ^{15}N из гибридного отношения $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ к $\text{H}^{12}\text{C}^{15}\text{N}$.

Нетрудно ввести предположение об условиях в идеализированных облаках, которые дали бы весьма ошибочную информацию о распространенностях изотопов, определяемых путем измерений какой-либо частной характеристики. Поскольку наши данные о характерных для облаков условиях в общем ограничены, то вопрос, будут ли полученные распространенности изотопов правильными или нет, должен решаться путем детальной проверки согласованности результатов, полученных различными методами для разных облаков. В процессе подобной проверки неизбежно выявится, что для ряда методов и некоторых облаков мы определенно встречаемся со случаями интересных явлений, вводящих нас в заблуждение, поскольку простая интерпретация приводит к получению неверной информации об изотопах. Впрочем, хорошее согласование и перекрестная проверка необходимы всегда, чтобы иметь уверенность в достаточной надежности более тщательных измерений изотопного состава.

Многочисленные исследования отношений обилий изотопов дали достаточно интересную информацию об распространенностях редких изотопов ^{13}C , ^{17}O , ^{18}O , ^{15}N , ^{30}Si , 33 , ^{34}S , а также D, хотя, как отмечалось выше, точность подобных данных должна тщательно проверяться. Первый вывод из полученных данных состоит в том, что распространенности перечисленных изотопов в межзвездном пространстве очень схожи со значениями для земных источников. Несколько более детальное рассмотрение показывает, что полученные распространенности близки к земным значениям, но имеются примечательные отклонения, а также различия между различными облаками в Галактике. Например, ^{13}C , один из наиболее легко обнаружимых редких изотопов, в межзвездной среде, как правило, оказывается вдвое более обильным, чем на Земле, но, по-видимому, его распространенность меняется от указанного значения примерно на множитель два в сторону как больших, так и меньших чисел (табл. IV).

Таблица IV

Отношение обилий $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в различных межзвездных облаках

Источник	Расстояние от центра Галактики, <i>кпсек</i>	$\frac{^{12}\text{C}^{18}\text{O}}{^{13}\text{C}^{18}\text{O}} \cdot 500$	$\frac{\text{H}_2^{12}\text{CO}}{\text{H}_2^{13}\text{CO}}$
Стрелец В2 (62 <i>км/сек</i>)	~ 0,1	29±6	14±5
Стрелец А (42 <i>км/сек</i>)	~ 0,1		18±5
Стрелец А (-4 <i>км/сек</i>)	~ 8		50±4
W 33	6		30±8
W 43	~ 7		50±10
W 51	8	64±4	63±12
M 17	8	57±9	>70
W 31	8	54±10	39±3
M 8	9	34±5	
NGC 6334	9	36±3	
W 49	9	32±11	41±4
DR 21	10	36±5	47±4
L 134 N	10		37±7
Солнечная система	10	89	89
Орион А	11	38±2	
NGC 2024	11	28±5	48±6
NGC 2264	11	56±6	
Кассиопея А	~ 11		>90
W 3	~ 12	61±10	68±12
NGC 7538	13	43±8	

Примечание. Отношения в 3-м столбце получены путем сравнения интенсивностей $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ и $^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ и предположения, что отношение распространенностей $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ равно земному значению, т. е. 1/500. Отношения в 4-м столбце получены из относительных интенсивностей линий H_2^{12}CO и H_2^{13}CO с учетом поправок за эффекты оптической толщи. Для высоких значений отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ последние числа, вероятно, несколько точнее; для низких значений $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, возможно, более точными будут первые числа.

Отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для различных облаков, приведенные в табл. IV, получены двумя различными и в общем дополняющими друг друга способами: из гибридного отношения интенсивности эмиссий $^{12}\text{C}^{18}\text{O}/^{13}\text{C}^{18}\text{O}$ и из прямого отношения интенсивностей поглощения молекул $\text{H}_2^{12}\text{C}^{16}\text{O}/\text{H}_2^{13}\text{C}^{16}\text{O}$. В третьем столбце табл. IV перечислены значения отношений $^{12}\text{C}^{18}\text{O}/^{13}\text{C}^{18}\text{O}$, выведенные первым способом и умноженные на 500 (что равно отношению распространенностей $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ для Земли).

Это давало бы правильное отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, если бы отношение распространенности изотопов $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ повсюду было земным, что, как предполагается рядом исследователей, является правильным приближением. Для обоих столбцов (со значениями, выведенными по спектрам CO и H_2CO) источники данных и результаты измерений были отобраны и обработаны таким способом, чтобы свести к минимуму ошибки, связанные с оптической толщей. Данные выбраны из многочисленных источников; при этом суждения о значениях отдельных величин и их ошибках опирались на соображение о всей доступной в настоящее время информации *).

Возможно, о надежности данных и влиянии на них оптической толщи, изотопного фракционирования или других возмущающих факторов лучше всего судить по согласованности результатов для двух молекул; эту согласованность на данном этапе можно считать удовлетворительной. Различие примерно в два раза между двумя измерениями для объекта Стрелец В2 скорее всего вызвано тем, что отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в этом облаке отлчно от значения, которое характерно для большей части других облаков. Имеются доводы в пользу того ¹⁷, что указанное отношение примерно вдвое больше, чем для земных объектов; это привело бы в согласие два определения отношения распространенностей $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Слишком большие оптические толщи сделали бы отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, выведенные из данных наблюдений CO в 3-м столбце табл. IV, слишком большими, а полученные из данных по H_2CO в 4-м столбце табл. IV — слишком малыми, однако в действительности систематическая ошибка подобного рода, по-видимому, отсутствует. Наиболее мощный механизм для химического фракционирования ^{13}C , предложенный до сих пор ¹⁸, сводится к предположению, что изотоп ^{13}C сильнее концентрируется в CO по сравнению с H_2CO , однако сколько-нибудь значительное систематическое различие указанного выше типа не обнаруживается. Примерами подобного фракционирования являются несколько частных случаев, например, NGC 2024 и DR 21. Предполагалось также, что H_2CO образуется из CO ; в таком случае фракционирование ^{13}C для первого соединения было бы аналогично фракционированию ^{13}C для второго, в противоположность предположениям, сделанным выше. Нет сомнений, что химическое фракционирование в какой-то степени действительно имеет место, и в ряде случаев из теоретических соображений становится ясным, что это может оказать существенное влияние на измеряемые отношения распространенностей изотопов, но на основе общей согласованности имеющихся к настоящему времени данных можно считать, что подобные эффекты не являются доминирующими. У объектов Стрелец В2 и Стрелец А, у которых отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ больше всего отклоняются от среднего, отмечены аналогичные отклонения и для других изотопов (см. ниже, табл. VI), у которых какие-либо потенциальные механизмы химического фракционирования, по существу, отсутствуют.

То, что химическое разделение изотопов может действительно происходить, хорошо иллюстрируется случаем дейтерия, у которого критические различия колебательной энергии для легкого и тяжелого изотопов водорода составляют примерно 500 см^{-1} , а не $\sim 25 \text{ см}^{-1}$, как имеет место для углерода. Это большое различие в энергии должно обеспечить особенно большую чувствительность дейтерия к фракционированию. Обилие атомов дейтерия по отношению к водороду (D/H) в межзвездном веществе составляет примерно $1,4 \cdot 10^{-5}$, что близко к значению для атмосферы Юпитера, в то время как относительное обилие молекул, в состав которых

*) Наиболее многочисленные данные по отношениям изотопов для CO были приведены в работе ¹⁵, а для H_2CO — в ¹⁶. Другие источники дали дополнительные данные.

Таблица V

Относительные распространенности ¹⁹, ²⁰ молекул, содержащих редкие изотопы D и ¹³C

Источник	$\frac{DCN}{H^{13}C}$	$\frac{D^{12}CO^+}{H^{13}CO^+}$	Источник	$\frac{DCN}{H^{13}C}$	$\frac{D^{12}CO^+}{H^{13}CO^+}$
Стрелец В2	0,018		DR21 (ОН)	0,21	0,9
Стрелец А			Солнечная система	0,013	
M17	0,126		Орион А	0,16	
W31	0,126		W51	0,084	
DR21	0,084				

входит дейтерий, может быть на порядок больше, как видно из табл. V. Эта таблица также показывает, что, хотя облака Стрелец В2 и Стрелец А характеризуются весьма отличной степенью химического фракционирования от других районов Галактики, обилие дейтерия в них исключительно мало. Было выдвинуто предположение ¹⁹, что это обстоятельство указывает на активность звезд: последняя должна быть в этих облаках весьма велика по сравнению с другими районами Галактики, вследствие чего дейтерий здесь в основном разрушался, а не создавался. Это вполне разумное предположение, дающее к тому же определенное и опирающееся на данные эксперимента указание на то, что дейтерий, обнаруженный в нашей Галактике, образовался на самых ранних стадиях эволюции наблюдаемой области Вселенной.

Измеренные значения отношений обилий для изотопов кислорода, серы и азота приведены в табл. VI. Отношение ¹⁵N/¹⁴N, по-видимому,

Таблица VI

Относительные распространенности ²¹⁻²³ редких изотопов O и гибридное отношение распространенностей ¹³C³²S/¹²C³⁴S и ¹²C¹⁵N/¹³C¹⁴N

	$\frac{C^{17}O}{C^{18}O}$	$\frac{C^{32}S}{C^{34}S}$	$\frac{^{13}CS}{C^{34}S}$	$\frac{H^{12}C^{15}N}{H^{13}C^{14}N}$
Стрелец В2	0,31±0,02	0,19±0,13	0,61±0,18	0,02±0,02
Стрелец А				0,01±0,02
K39	0,27±0,05			
M17			0,62±0,11	
DR21	0,21±0,02			
Солнечная система	0,186	0,18	0,26	0,33
Орион А	0,27±0,06	0,21±0,06	0,38±0,07	0,25±0,02
NGC 2264	0,17±0,03		0,37±0,14	
W51			0,38±0,21	0,21±0,02

значительно меньше в объектах Стрелец В2 и Стрелец А, чем в других районах Галактики, что снова указывает на весьма отличную «ядерную» историю для этих объектов. Поскольку они являются весьма плотными, протяженными и расположены вблизи галактического центра, где звездообразование должно идти гораздо интенсивнее, относительное уменьшение обилия ¹⁵N и относительное возрастание обилий ¹³C и ¹⁷O — именно те явления, которые можно было ожидать на основе теоретических представлений ²⁴.

Вещество, окружающее яркую инфракрасную звезду IRC + 10216, открывает возможность провести интересное сравнение с данными, полу-

ченными для межзвездных облаков. Вокруг этой углеродной звезды, которая должна считаться образцом звездной активности по сравнению с довольно медленными процессами изменений межзвездных обилий изотопов, относительное обилие ^{17}O , как было показано, должно быть существенно увеличено, а обилие ^{15}N уменьшено подобно облаку Стрелец В2. Однако отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ не намного меньше земного, а относительное обилие ^{18}O уменьшено. Измерения распространенностей изотопов в межзвездных облаках, выполненные к настоящему времени, по-видимому, позволяют утверждать следующее:

1. Относительные распространенности ^{13}C и ^{17}O в общем выше, чем в Солнечной системе, причем для ^{13}C это превышение достигает примерно двух раз. По крайней мере в нескольких случаях обилия изотопов ^{15}N и ^2H ниже, а обилие ^{18}O , возможно, выше, чем соответствующие обилия в Солнечной системе.

2. Имеются существенные вариации распространенностей изотопов в различных крупных межзвездных облаках, причем некоторые вариации зависят не только от расстояния от центра Галактики.

Эти результаты уже принесли нам два сюрприза. Первый состоит в том, что относительная распространенность ^{13}C вдвое больше, чем на Земле. Эту особенность можно в известной степени отнести за счет возрастания распространенности ^{13}C , поскольку образование этого изотопа в Солнечной системе нелегко согласовать с существующей теорией ²⁴. Качественный анализ этих предположений приводит к выводу, что многие редкие изотопы, скажем, ^{13}C , являются вторичными продуктами, возникающими из других первичных тяжелых ядер, например ^{12}C , и если образование звезд происходит с равномерной или слегка убывающей скоростью, то относительные распространенности изотопов изменялись бы приблизительно пропорционально времени. Поскольку, как можно думать, Солнечная система образовалась на поздней стадии эволюции нашей Галактики, удвоение относительного обилия ^{13}C представляется загадочным. Впрочем, объяснение может состоять просто в том, что наша Солнечная система сформировалась в межзвездном облаке не среднего состава, а обедненном изотопом ^{13}C . То же предположение облегчает преодоление трудности, связанной со вторым сюрпризом, а именно, что межзвездные облака не очень сильно перемешаны и различаются по изотопному составу даже при одном и том же расстоянии от центра Галактики.

Поскольку Галактика вращается и имеет место достаточно заметное движение облаков друг относительно друга за время, которое невелико по сравнению с несколькими миллиардами лет, необходимыми для изменения среднего химического или изотопного состава, то в общем считалось, что распространенности элементов и изотопный состав могли бы быть функциями расстояния от центра Галактики, но не функцией галактической долготы. Наблюдаемые распространенности изотопов, по-видимому, бросают вызов указанному предположению; возможно, однако, что это предположение опирается в основном на данные об облаках малой плотности, а не массивных и плотных образованиях, в которых была обнаружена подавляющая часть молекул. Большие плотные облака, обладающие массой примерно в 10^5 солнечных масс, плотностью 10^5 молекул/см³ и протяженностью в несколько парсек, имеют весьма длительное время жизни ($\gg 10^9$ лет) относительно взаимных столкновений. Столкновения или перемешивание с нормальным межзвездным материалом, имеющим плотность $0,2$ молекул/см³, действительно могут иметь место, но характерное время рассеяния больших межзвездных облаков также больше 10^9 лет. Следовательно, эти крупные облачные образования достаточно долго сохраняют свою целостность и обладают временами жизни, сравнимыми

с возрастом Галактики; это свидетельствует, что процесс их непрерывного коллапсирования в звезды не происходит. Время гравитационного коллапса таких облаков, определяемое на основе простой однородной и первоначально статической модели, должно быть порядка 10^5 — 10^6 лет, т. е. весьма короткое. Совершенно очевидно, что неоднородность, турбулентность, магнитные поля, само образование звезд, а также вспышки Сверхновых — все эти факторы будут увеличивать время жизни относительно коллапса, и большое количество наблюдаемых крупных облаков дает нам некоторое эмпирическое основание утверждать, что время жизни подобных облаков очень мало — всего 10^6 лет. К сожалению, динамика облаков оказывается слишком сложной для построения сколько-нибудь детальной теории гравитационного коллапса, а также для достаточно полного описания процесса конденсации в звезды, который тоже должен быть принят во внимание.

Если эти большие и плотные облака имеют времена жизни, сравнимые с возрастом Галактики, на что указывают современные измерения распространностей изотопов, то они оказываются загадочным образом похожи на шаровые скопления: и те и другие — весьма старые комплексы с массами $\sim 10^5$ солнечных масс. Это позволяет провести гипотетическую (пока) аналогию между историями развития больших межзвездных облаков и шаровых скоплений. Разумеется, при этом должны существовать определенные различия в динамике или составе; именно эти различия приводят комплексы шаровых скоплений к эволюции в звезды, с последующим рассеянием оставшегося газа, тогда как в темных облаках формируется мало звезд и сохраняется большое количество пыли и газа, причем эти образования ввиду их вязкости локализируются в галактической плоскости.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Успех в понимании процесса возбуждения молекул в межзвездных облаках не вызывает сомнений. Межзвездные молекулы в каком-то смысле «соприкасаются» с целым набором различных температур, влияющих на их возбуждение. Существует кинетическая температура движения молекул газа, приводящая к возбуждению молекул путем столкновений. Существует температура пылевых частиц, во многих случаях тесно связанная с кинетической температурой, но в некоторых случаях отличающаяся от нее. Температура частиц пыли передается молекулам в основном путем излучения. Имеется температура изотропного излучения, $\sim 3^\circ\text{K}$. Поскольку излучение в микроволновой области относительно интенсивно, оно может преобладать в процессе возбуждения молекул, если столкновения (или другие механизмы возбуждения) оказываются не слишком частыми. Существует температура излучения звезд или инфракрасного излучения, испускаемого веществом, окружающим звезды, которое может освещать или возбуждать межзвездный газ, в особенности в окрестностях очень ярких звезд. Могут возникать ударные волны с достаточно высокой температурой, распространяющиеся сквозь межзвездное облако; эти волны могут быть связаны с гравитационным коллапсом или взрывами. Существование такой ударной волны в облаке, находящемся в созвездии Ориона, надежно установлено по инфракрасным спектрам H_2 с высоким возбуждением. Может также существовать резонансное излучение самих молекул, которое для оптически толстого облака в общем случае характеризуется температурой, промежуточной между температурой изотропного излучения и кинетической температурой газа. Как правило, молекулярные состояния определяются комбинацией двух или более источников возбуждения. Возможно, наиболее частыми источниками оказываются ради-

ативные процессы и столкновения, которые нередко имеют сравнимые скорости, и именно наложение этих процессов определяет степень возбуждения данного молекулярного уровня. В простейших случаях можно предположить, что каждое столкновение сопровождается актом излучения, причем возбуждение молекулы характеризуется эффективной температурой, промежуточной между кинетической температурой и температурой излучения на резонансной частоте молекулы. Однако поскольку эти два процесса, характеризуемые различными температурами, определяют неравновесные состояния, то возникает реальная возможность возбуждения эффективной «тепловой машины», работоспособность которой определяется существующей разностью температур, что в итоге приводит либо к очень высоким температурам, либо к существенному охлаждению возбуждаемых молекул. Подобные процессы часто именуют «накачкой», и к настоящему времени целый ряд таких процессов, по-видимому, выявлен и отождествлен. Ниже мы рассмотрим несколько случаев возбуждения, в особенности те, изучение которых весьма успешно продвинулось в последние годы.

Интересный случай довольно специфического возбуждения иллюстрируется существующей во многих облаках аномалией относительной интенсивности сверхтонких компонент эмиссионной линии HCN, соответствующей переходу $J = 1 \rightarrow 0$. Было отмечено, что три пространственно разделенные сверхтонкие линии этого перехода в некоторых облаках имеют относительные интенсивности, совершенно отличные от тех, которые можно было предполагать либо в условиях теплового равновесия при малой оптической толщине, либо в условиях теплового равновесия при насыщении, вызванном большой оптической толщиной. Можно показать²⁵, что в широких пределах концентраций молекул и кинетических температур совпадение между двумя сверхтонкими переходами в следующей (более высокого порядка) вращательной линии ($J = 2 \rightarrow 1$) и захват этих фотонов в облаке HCN могут привести к указанным аномалиям интенсивности.

Наиболее интересные эффекты связаны с особыми процессами возбуждения, происходящими тогда, когда действует какой-либо механизм накачки или тепловая машина. Эти действия создают большое отношение населенностей между верхними и нижними состояниями пары уровней, эквивалентное бесконечно большой температуре. В результате возникает «обращение» населенностей уровней, что может привести к мазерному усилению резонансной частоты молекулы до очень высокой интенсивности. Уже в течение некоторого времени изучают мазеры на OH и H₂O в астрономических объектах. Ряд мазеров на молекулах OH тесно связан с инфракрасными звездами, которые, по-видимому, обеспечивают инфракрасную накачку; в других объектах происходит накачка столкновениями. Для мазеров высокой интенсивности на молекулах как OH, так и H₂O, скорее всего, требуется присутствие пыли в том облаке, в котором происходит усиление излучения; пыль действует либо как источник тепла, либо как сток для накачанного тепла. Хотя проведена значительная работа по изучению мазеров на OH и H₂O, для многих из них механизм возбуждения пока не вполне ясен.

Очень скоро после открытия линии поглощения H₂CO $\lambda = 6$ см в межзвездном пространстве было обнаружено²⁶, что при этом переходе во многих случаях имеет место поглощение даже 3-градусного изотропного излучения; это с несомненностью указывает, что данный переход охлажден ниже температуры 3°K. Были предложены три исходных типа механизмов накачки. Первый включает накачку изотропным микроволновым излучением, интенсивность которого определяется спектром излучения абсолютно черного тела; второй опирается на резонансное инфракрасное возбужде-

ние; третий включает столкновения. Последний механизм, по-видимому, получил достаточно надежное подтверждение, и потому мы рассмотрим его более детально. На рис. 4 приведена схема молекулы, а на рис. 5 — схема одного из низко расположенных вращательных уровней.

Действие механизма столкновений²⁷ опирается на тот факт, что расщепление энергетических уровней в слегка асимметричном волчке, подобном молекуле H_2CO , вызывается небольшой разностью моментов инерции относительно двух главных осей, перпендикулярных к оси приближенной симметрии, которая в данном случае параллельна связи C—O . Следовательно, вращение молекулы в плоскости, определяемой двумя связями C—H (ось z на рис. 4), связано с наибольшим моментом инерции и всегда

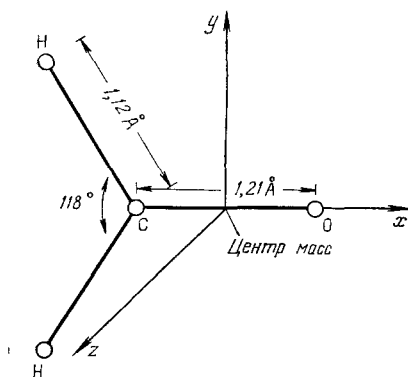


Рис. 4. Геометрия молекулы формальдегида.

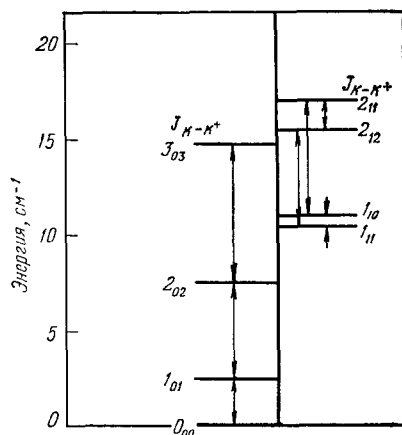


Рис. 5. Низко расположенные уровни в молекуле формальдегида.

соответствует нижнему из двух уровней дублета, показанных для $J = 1$ и $J = 2$ на рис. 5. Вращение вокруг оси, перпендикулярной к только что указанной и к связи C—O (ось y), соответствует чуть меньшему моменту инерции, а следовательно, верхнему уровню двух компонент дублета, обозначенных на рис. 5 через 1_{10} и 1_{11} , между которыми и осуществляется переход с $\lambda = 6$ см. Как можно видеть из схемы молекулы на рис. 4, в процессе столкновения молекула, которая соударяется с одним из атомов H молекулы H_2CO в плоскости молекулы, возбudit вращение относительно оси наибольшего момента инерции (оси z). Однако возможна и другая ситуация, когда сталкивающаяся молекула соударяется с одним из атомов H в направлении, перпендикулярном к плоскости молекулы; тогда она будет просто расталкивать легкие атомы H в стороны и закручивать молекулу H_2CO относительно оси, направленной вдоль связи C—O . В результате вряд ли может возбудиться то «кувыркание» молекулы, которое соответствует ее вращению относительно оси y . Таким образом, независимо от первоначального состояния молекулы H_2CO , столкновения с ее двумя атомами водорода, порождающие вращение молекулы, приводят к преимущественному возбуждению нижнего из двух уровней дублета, например состояний $J = 2$ или $J = 3$. Как показано на рис. 5, радиативный распад, которым сопровождаются разрешенные переходы, в большинстве случаев переводит такие молекулы на нижний из двух уровней дублета, перенаселяет этот уровень и тем самым охлаждает переход. Проведенные недавно расчеты²⁸ соответствующих сечений столкновений как будто подтверждают описанный возможный механизм охлаждения.

Более того, Эванс и др.²⁹ экспериментально подтвердили механизм столкновений как путем измерения эффективной температуры для уровней дублета H_2^{12}CO с $J = 2$, так и регистрации поглощения дублета на самом низком уровне ($J = 1$), вызванного поглощением охлажденных молекул H_2^{13}CO в той же самой области, где наблюдались охлажденные молекулы H_2^{12}CO . Первое наблюдение Эванса и др. показало, что дублет с $J = 2$ в общем охлаждается в согласии с данными, полученными из модели столкновений, что видно из приведенной выше дискуссии, но в явном несогласии с предположениями, вытекающими из модели накачки изотропным излучением. Второе наблюдение, показывающее, что H_2^{13}CO охлаждается столь же эффективно, как и H_2^{12}CO , явно согласуется с моделью столкновений, но не объясняется на основе модели накачки резонансным ИК излучением, поскольку выход подходящего ИК-излучения для редкого изотопа ^{13}C оказался бы весьма отличным от выхода излучения для гораздо более обильных молекул H_2^{12}CO .

Отклонение интенсивностей линий СН от предполагаемых при наличии термодинамического равновесия упоминалось выше и было показано на рис. 1. Наиболее интенсивная компонента может усиливаться непрерывным излучением, которое пересекает облако молекул СН; усиление может быть невелико, поскольку слой молекул СН оптически очень тонок.

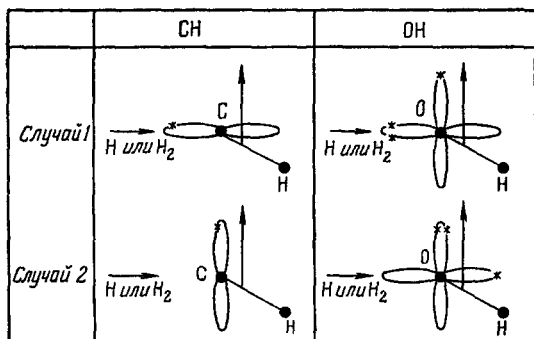


Рис. 6. Конфигурация молекулы и геометрии столкновений³¹ для СН и ОН.

На диаграмме звездочки соответствуют валентным электронам, черные кружки — ядрам.

H_2CO . Поскольку молекулы СН находятся в состоянии $^2\Pi$, их несвязанный валентный электрон часто оказывается как по одну, так и по другую сторону оси С—Н, подобно тому как это имело место с двумя атомами Н в случае H_2CO (рис. 6). Возникающее в результате этого небольшое различие между главными моментами инерции оказывается основным источником Λ-удвоения для этой молекулы, а также для молекулы ОН. Бертодждо и др.³¹ выполнили приближенный расчет относительных сечений столкновений для вращательного возбуждения атомами Н и Не, а также молекулами H_2 и во всех случаях нашли, что нижний уровень дублета первого вращательно-возбужденного состояния ($J = 3/2$, как показано на рис. 7) имеет более высокую населенность, чем верхний уровень, как и в случае H_2CO . Естественно удивиться тому, что один и тот же процесс обеспечивает и охлаждение молекул H_2CO , и обращение населенности (т. е. нагревание) молекул СН. Причина сразу видна из рис. 7. Расположение самых нижних уровней дублета СН таково, что разрешенный радиативный распад нижних уровней ($^2\Pi_{1/2}$, $J = 2$) дублетов будет перенаселять верхний из двух

Ридбек и др.³⁰ показали справедливость этого предположения в нескольких случаях путем сравнения интенсивности континуума в области спектра поблизости от места, где обнаружено излучение СН, с интенсивностью линии СН. Представляется, что молекулы СН обеспечивают мажорное усиление в большинстве случаев, где описываемая линия наблюдается в эмиссии.

По-видимому, накачка молекул СН осуществляется за счет механизма столкновений, весьма сходного с тем, который эффективен и для

дублетов основного состояния ($J = 1/2$). В противоположность этому в молекулах H_2CO разрешенные переходы перенаселяют самый нижний уровень дублетов основного состояния. Таким образом, столкновения будут обращать переход в СН в широких пределах изменения условий, обычных в межзвездных облаках, хотя достаточно высокая концентрация молекул могла бы привести к тому, что резонанс СН появился бы на фоне континуума в поглощении, а не в эмиссии.

При некоторых обстоятельствах у молекул ОН четко проявляется инверсия уровней, поскольку они создают мощный мазер. В темных облаках самый нижний уровень Λ -дублета часто охлаждается, а не нагревается, причем обнаруживаются весьма низкие температуры возбуждения. Расчеты, аналогичные проведенным для молекул СН, показывают, что оба указанных явления в молекулах ОН могут вызываться столкновениями, но надежность результатов расчетов и согласие при сравнении с данными наблюдений не столь удовлетворительны, как это имело место для молекул СН.

Молекула SiO порождает целую группу мазеров, и было предложено несколько интересных механизмов их возбуждения, но какой из них реально имеет место, пока не ясно. Излучение молекул CH_3OH инфракрасным комплексом в Орионе вблизи $\lambda = 1$ см было открыто Барретом и др.³²; как было показано с тех пор, оно вызывается мазерным эффектом. Несколько членов серии линий CH_3OH как будто указывают на присутствие мазерного эффекта, впрочем, довольно слабого, однако переменность и интенсивность излучения дополнительно свидетельствуют в пользу того, что мазерный эффект действительно присутствует.

ПРИРОДА ПЛОТНЫХ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

Когда число наблюдений невелико, они, как правило, интерпретируются на основе очень простых моделей, и обычно с успехом, поскольку приходится согласовывать малое число параметров. По мере того как данные становятся более многочисленными, приходится усложнять модели, и нередко новые данные наблюдений приводят к трудностям, для преодоления которых не существует сравнительно простых моделей, опирающихся на разумные предположения. Нечто подобное этому имеет место и в современной микроволновой спектроскопии плотных межзвездных облаков, в которых обычно обнаруживаются молекулы. Для первоначальных наблюдений предполагалось, что облака однородны по плотности и температуре, и значения температуры и плотности, полученные из первых наблюдений межзвездных молекул, дали хорошие первые приближения для указанных параметров. Поскольку подобная модель проста и «линейна», она не способна объяснить переменность возбуждения молекул и их скоростей, обнаруженную в отдельных облаках; нелегко также

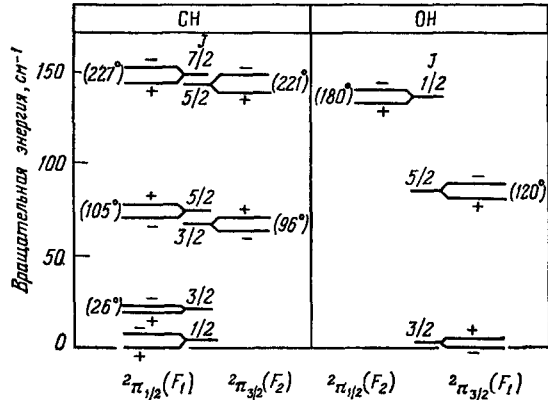


Рис. 7. Нижние вращательные энергетические уровни для молекул СН и ОН.

объяснить бросающуюся в глаза редкость самообращения линий, поскольку температура во всех облаках не может оставаться постоянной по мере перехода к границам облаков. Возможно, еще более серьезным оказывается то обстоятельство, что в простой модели не учитывается возможность быстрого гравитационного коллапса облака, который происходит за время порядка 10^5 лет (иногда больше, иногда меньше в зависимости от концентрации частиц, определяемой по обилию молекул и их возбуждению).

Следующее приближение, обычно принимаемое при построении моделей, заключается, например, во введении постоянного градиента скорости в однородно коллапсирующем облаке. В предположении, что облако является оптически толстым, эта модель хорошо объясняет отсутствие самообращения линий и сходство формы как сильных, так и слабых линий в одном и том же облаке. Однако эта модель дает лишь короткое время жизни для коллапсирующего облака и не справляется с объяснением достаточно близких форм линий, наблюдаемых в различных районах облака, в противоположность предположению о систематических вариациях в зависимости от положения в облаке. Более того, любая карта межзвездного облака показывает гораздо более сложную морфологию, чем описанная простая модель, при наличии сильных изменений плотности и возбуждения от места к месту, нерегулярных границ, а иногда и разорванной структуры.

Теперь уместно рассмотреть еще более сложную модель, которую можно назвать «моделью множественных конденсаций». Предположим, что облако в целом состоит из комплекса многих конденсаций, с различными характерными размерами, в том числе конденсаций, которые достаточно малы по сравнению с размерами диаграммы направленности радиотелескопа, и области с меньшей концентрацией молекул, причем в целом все образование имеет аморфную структуру. Предельная модель такого типа сводится к большому числу малых, оптически плотных облаков, движущихся друг относительно друга и не разрешаемых радиотелескопом. Как и модель с систематическим градиентом скорости, наша модель может обеспечить сходство формы линий как для слабых, так и для сильных линий, при полном отсутствии самообращения. Время жизни такого облака может оказаться больше, чем в модели простого однородного коллапса, поскольку индивидуальные конденсации («облачка») могут иметь достаточно большой свободный пробег по полному объему облака. Кроме того, локальный коллапс и формирование звезд во многих местах облака создадут локальные источники тепла, давления и турбулентности. Подобная модель «скоплений», или множественных конденсаций, отнюдь не является простой и пока не дала каких-либо преимуществ. Однако она, по крайней мере, удовлетворяет более широкому набору данных наблюдений, чем две предыдущие модели.

Возможно, наиболее ярким экспериментальным подтверждением наличия мелкомасштабных конденсаций, или «кочковатости», являются наблюдения обращенного спектра NH_3 и его сверхтонкой структуры. На рис. 8 показана обращенная линия (1, 1) NH_3 в облаке DR 21 с четырьмя слабыми сверхтонкими компонентами, в дополнение к центральной компоненте³³. Сильная центральная компонента дает антенную температуру всего 4°K (на 1°K выше температуры однородного фонового радиоизлучения), что существенно ниже, чем можно было бы предположить для оптически толстого облака. Однако все более слабые линии оказываются более интенсивными относительно центральной компоненты, чем они должны быть в оптически тонком облаке. Из этого избытка интенсивностей была получена оценка оптической толщи облака $\tau \approx 1$. Это показывает,

что облако, содержащее молекулы NH_3 , не заполняет диаграмму направленности радиотелескопа, так что наблюдаемая интенсивность радиоизлучения от облака не изменяется резко по мере перемещения антенны через местоположение облака. Единственное разумное объяснение состоит в том, что существует много малых по размеру плотных облачков NH_3 . Характерный размер этих «облачков» неизвестен, но должен быть меньше, чем наименьшая диаграмма используемой антенны, т. е. примерно $1'$.

Модель множественных конденсаций в облаке представляется только следующим шагом при попытке согласовать возрастающую детальность наблюдений; однако этот шаг

представляется сейчас необходимым. Весьма вероятно, что по мере все более широкого распространения микроволновых наблюдений и возрастания их точности, а также развития ИК-спектроскопии межзвездных облаков, вскоре потребуются учет сложности источников нагрева облака, распределения температуры и звездной активности. Нет сомнений, что комбинация микроволновых и инфракрасных наблюдений быстро улучшит наше понимание структуры и состава облаков. Разумеется, сколько-нибудь полная история эволюции плотных, активных и сложных по структуре облаков, с учетом звездообразования и формирования конденсаций, из которых образуются звезды, а также достаточно детальное понимание хода рождения, развития и рассеяния этих облаков, несомненно, окажется исключительно сложной. Некоторые важные вопросы о временах жизни, скорости и характере формирования звезд в облаках могут быть разрешены при помощи новых наблюдений. Более обширные, более однородные и точные наблюдения, скорее всего, окажутся наиболее прямым и перспективным путем к успеху. Возможно, несколько позже, но все же в обозримом будущем, будет получена и подробно изучена проба кометного вещества из космического пространства. Это вещество, как показывают работы Галлея и наши современные знания, может оказаться образцом вещества межзвездных облаков и, безусловно, даст бесценную информацию о химическом составе, распространенности изотопов и их изменениях в веществе облака, захватываемого движущейся сферой действия нашего Солнца.

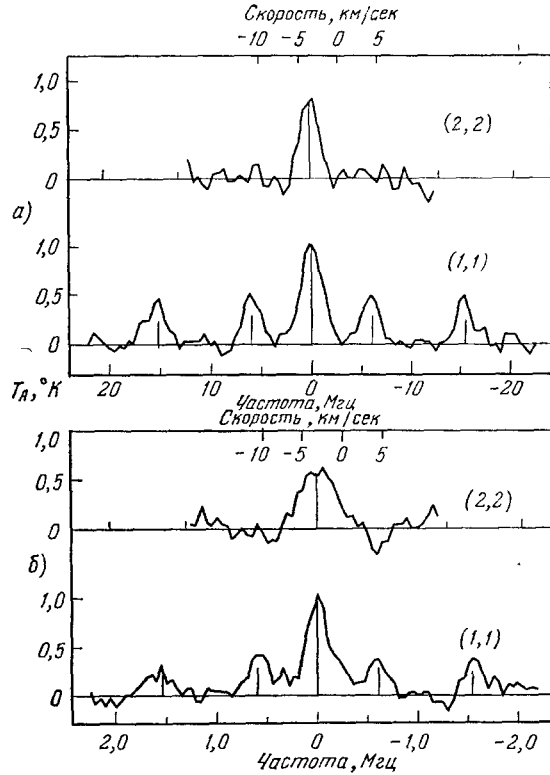


Рис. 8. Линии (1, 1) и (2, 2) молекулы NH_3 в облаке DR 21 (OH), показывающие сверхтонкие компоненты линии (1,1)³³.

а) 22' к северу от положения источника DR21 (OH), б) источник DR21 (OH). Вертикальные линии дают теоретические относительные интенсивности компонент в предположении, что линии оптически тонки. Отклонение наблюдаемых интенсивностей от теоретических, по-видимому, вызвано эффектом оптической толщи.

Благодарности. Искренняя признательность за неопубликованные данные для нескольких источников, в особенности наблюдений интенсивности изотропного радиоизлучения, обеспеченные Ванньером, Пензиасом и другими из лабораторий «Белл-телефон», а также Вильсоном, Бигингом и их сотрудниками из Института им. Макса Планка в Бонне. Обсуждение некоторых вопросов и многие из иллюстраций были рассмотрены в ходе предварительных дискуссий автора, имевших место в Льеже, на 12-м Льежском Международном астрофизическом симпозиуме; за разрешение использовать этот материал я весьма благодарен профессорам М. Миготту и П. Свингсу. Благодарю также НАСА за частичную поддержку настоящей работы.

Калифорнийский университет,
США

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Swings P., Rosenfeld L.— *Astrophys. J.*, 1937, v. 86, p. 483.
2. Шкловский И. С.— *Астрон. ж.*, 1952, т. 29, с. 144.
Townes C. H.— *IAU Symposium*, 1957, v. 4, p. 92.
3. Weinreb S., Barrett A. H., Meeks M. L., Henry J. S.— *Nature*, 1963, v. 200, p. 829.
4. Cheung A. C., Rank D. M., Townes C. H., Thornton D. C., Welch W. J.— *Phys. Rev. Lett.*, 1968, v. 21, p. 170.
5. Snyder L. E., Buhl D., Zuckerman B., Palmer P.— *Ibid.*, 1969, v. 22, p. 679.
6. Wilson R. W., Jefferts K. B., Penzias A. A.— *Astrophys. J.*, 1970, v. 161, p. L43.
7. Herbst E., Klemperer W.— *Ibid.*, v. 188, p. 255.
8. Hollis J. M., Snyder L. E., Buhl D., Giguere (in press).
9. Turner B. E., Zuckerman B.— *Bull. AAS*, 1973, v. 5, p. 420.
10. Rydbeck O. E. H., Elldér J., Irrine W. M.— *Nature*, 1973, v. 246, p. 466.
11. Rydbeck O. E. H., Elldér J., Irrine W. M.— *Astron. and Astrophys.*, 1974, v. 33, p. 315.
12. Robertson B. J., Gardner F. F., Sinclair M. W., Whiteoak J. B.— *Nature*, 1974, v. 248, p. 32.
13. Welachew L.— *Astrophys. J.*, 1971, v. 167, p. L47.
14. Solomon P. M., De Zafra R.— *Ibid.*, 1975, v. 199, p. L79.
15. Wannier P. G., Penzias A. A., Linke R. A., Wilson R. W.— *Ibid.*, 1976, v. 204, p. 26.
16. Wilson T. L., Bieging J., Downes D., Gardner F. F.— *Astron. and Astrophys.*, 1976, v. 51, p. 303.
17. Whiteoak J. B., Gardner F. F.— *Proc. Astron. Soc. Austr.*, 1975, v. 2, p. 360.
18. Watson W. D., Annichich V. G., Huntress W. T.— *Astrophys. J.*, 1976, v. 205, p. L165.
19. Penzias A. A., Wannier P. G., Wilson R. W., Linke R. A.— *Ibid.*, 1977, v. 211, p. 108.
20. Hollis J. M., Snyder L. E., Lovas F. L., Buhl D.— *Ibid.*, 1974, v. 204, p. L83.
21. Wilson R. W., Penzias A. A., Wannier P. G., Linke R. A.— *Ibid.*, p. L135.
22. Linke R. A., Goldsmith P. F., Wannier P. G., Wilson R. W., Penzias A. A.— *Ibid.* (in press).
23. Wannier P. G., Lucas R., Linke R. A., Encrenaz P. G., Penzias A. A., Wilson R. W.— *Ibid.*, 1976, v. 205, p. L169.
24. Wollman E. R.— *Ibid.*, 1973, v. 184, p. 773.
Audouze J., Lequeux J., Vigroux L.— *Astron. and Astrophys.*, 1975, v. 43, p. 71.
25. Kwan J., Scoville N. Z.— *Astrophys. J.*, 1975, v. 197, p. 415.
Bertojo M.— *Thesis.— Univ. de Paris.*
26. Palmer P., Zuckerman B., Buhl D., Snyder L. E.— *Astrophys. J.*, 1969, v. 150, p. L147.

27. Townes C. H., Cheung A. C.— *Ibid.*, 1969, v. 157, p. L103.
28. Garrison B. J., Lester W. A., Miller W. H., Green S.— *Ibid.*, 1975, v. 200, p. L175.
29. Evans N. J., Zuckerman B., Morris G., Sato T.— *Ibid.*, 1975, v. 196, p. 433.
30. Rydbeck O. E. H., Kollberg E., Hjalmarson A., Sume A., Eilddér J., Irvine W. M.— Res. Rept. No. 120. Res. Lab. of Electronics.— Gothenburg; Chalmers Univ. of Technology, 1975.
31. Bertojo M., Cheung A. C., Townes C. H.— *Astrophys. J.*, 1976, v. 208, p. 914.
32. Barrett A. H., Schwartz P. R., Waters J. W.— *Ibid.*, 1971, v. 168, p. L101.
33. Mayer C. H., Waak J. A., Cheung A. C., Chui M. F.— *Ibid.*, 1973, v. 182, p. L65.