



Новое
в жизни,
науке,
технике

Подписная
научно -
популярная
серия

5 '90

В.Г. Сурдин

ГИГАНТСКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА

КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

5/1990

Издается ежемесячно с 1971 г.

В. Г. Сурдин

ГИГАНТСКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА

В ПРИЛОЖЕНИИ ЭТОГО НОМЕРА:

**ПОЛНОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ
22 ИЮЛЯ 1990 г.**



Издательство «Знание» Москва 1990

ББК 22.6
С 89

Редактор: *ВИРКО И. Г.*

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Предыстория. Оптические наблюдения	3
Межзвездная среда и движение звезд	10
Межзвездная среда — радиоастрономическая картина	12
Молекулы H_2 и CO	17
Масса облаков	21
Кольцо и диск	24
«Облака плывут, облака...»	30
Перепись облаков	36
Газовые облака и спиральная структура Галактики	42
Внутренняя структура ГМО	45
Ядра ГМО	49
Химическая эволюция ГМО	52
ГМО и гамма-лучи	56
Рождение и гибель ГМО	58
Заключение	60
Приложение: полное солнечное затмение 22 июля 1990 г.	61

Сурдин В. Г.

С 89 Гигантские молекулярные облака. — М.: Знание, 1990. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 5).

ISBN 5-07-000516-2

15 к.

В брошюре рассказывается об истории открытия и наблюдаемых характеристиках гигантских молекулярных облаков, о возможных механизмах их формирования и разрушения, об их связи с процессом звездообразования и другими эволюционными процессами в Галактике. Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

1605000000

ББК 22.6

ISBN 5-07-000516-2

© Сурдин В. Г., 1990 г.

ВВЕДЕНИЕ

В конце концов почти все, что здесь рассказано, могло бы произойти на самом деле *

Открытие гигантских молекулярных облаков (ГМО) во второй половине 70-х годов нашего века существенно изменило представления ученых о роли межзвездной среды в эволюции Галактики. Как это обычно бывает, открытие объектов нового типа, с одной стороны, позволило решить некоторые накопившиеся проблемы, а с другой — поставило исследователей перед вопросом о происхождении и эволюции новых объектов. Однако в случае с молекулярными облаками «баланс проблем» оказался явно положительным: космогоническая роль этих замечательных объектов чрезвычайно важна, а существующие пока неясности в вопросе об их происхождении, безусловно, носят временный характер.

Для большинства астрономов открытие ГМО оказалось полной неожиданностью, хотя в общих чертах оно было предсказано около 40 лет назад. За прошедшее с момента их открытия десятилетие ГМО «проникли» буквально повсюду: идет ли речь о формировании звезд или о разрушении звездных скоплений, о природе спиральных рукавов галактик или о причине активности их ядер — важнейшим действующим лицом при этом многие астрономы считают теперь именно ГМО. Даже для объяснения строения внешних областей нашей Солнечной системы и особенностей движения в ней комет привлекаются данные о молекулярных облаках. Возможно, что в столь частом обращении к этим объектам есть пока некоторая дань моде, но все-таки совершенно очевидно, что по крайней мере в звездной космогонии они навсегда займут одно из важнейших мест.

ПРЕДЫСТОРИЯ. ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

На густо покрытом звездами поле было расположено большое, почти круглое темное пятно.

Уместно будет напомнить предысторию открытия ГМО. Интуитивные представления о межзвездной среде

* Этот и все остальные эпиграфы взяты из текста романа Фреда Хойла «Черное облако».

можно встретить еще у философов античности, однако наблюдениями они подтверждены не были. Даже у ученых, впервые направивших на небо телескоп, рассуждения о межзвездной среде были довольно отвлеченными. Так, Г. Галилей писал: «...мы отказываемся от твердых небесных сфер, в существование которых верили раньше, и предполагаем, что очень тонкая эфирная материя развеена по обширным областям Вселенной, по которым блуждают твердые мировые тела, наделенные собственными движениями»*.

В этом вопросе с ним полностью был согласен И. Кеплер: «К сильным сторонам твоего доказательства я отношу необычайную тонкость небесной субстанции, следующей также и из моей «Оптики»... Это приводит к тому, что от наших глаз, когда они вооружены твоим инструментом, не ускользают даже самые мелкие частицы сферы звезд... и что в одной-единственной частице линзы между глазом и предметом втиснуто гораздо больше (и гораздо более плотной) материи, чем во всем нескончаемом пути сквозь эфир, причем материя в линзе вызывает легкое потемнение, а эфир его не вызывает. Поэтому и создается видимость, будто все необъятное пространство пусто»**.

Итак, великие астрономы XVII столетия были уверены в существовании межзвездной субстанции, но считали ее чрезвычайно разреженной и практически невидимой (не подозревая о том, что сама эта субстанция делает для нас невидимой большую часть Галактики и существенную часть внегалактической Вселенной).

В XVIII в. трудами Э. Галлея (1656—1742), Н. Лакайля (1713—1762), Ш. Мессье (1730—1817) и П. Мешена, использовавших светосильные телескопы, были открыты десятки светящихся туманностей, а великий В. Гершель (1738—1822) обнаружил на небе 2,5 тыс. туманных объектов, многие из которых оказались облаками горячего газа. Внимательный наблюдатель — он отметил также существование в межзвездном пространстве плотных холодных газопылевых облаков, но по иронии судьбы прошел мимо этого факта, дав ему со-

* Галилей Г. Пробирных дел мастер. — М.: Наука, 1987.

** Кеплер И. Разговор с звездным вестником // В кн.: О шестиугольных снежинках. — М.: Наука, 1982.

вершенно неверное толкование. Вот как рассказывала об этом сестра великого астронома Каролина в письме сыну В. Гершеля Джону Гершелю, также известному астроному: «Однажды вечером, когда Ваш отец рассматривал небо в созвездии Скорпиона, он после долгого мучительного внимания вдруг воскликнул: «Здесь, вероятно, дыра в небе!» После долгого рассматривания этого места он утомленный, наконец, оставил его». Решив, что обнаружены «отверстия в небесах», Гершель интерпретировал это как признак гравитационного сгущения звезд и распада Галактики на отдельные части. Судя по всему, он был увлечен тогда идеей И. Ньютона о гравитационной неустойчивости вещества, высказанной в связи с вопросом о происхождении звезд. В. Гершель так и не понял, что перед ним были именно те области пространства, где зарождаются новые звезды в полном соответствии с идеей Ньютона. Большинство астрономов разделяли заблуждение Гершеля вплоть до начала XX в. Но не все.

Замечательный итальянский астроном Анджело Секки (1818—1878) одним из первых направил на ночное небо спектроскоп и провел обширные исследования звезд и туманностей, став, таким образом, основоположником современной астрофизики. С помощью спектроскопа он окончательно установил различие между удаленными скоплениями звезд — галактиками, которые мы до сих пор по традиции называем туманностями, и истинными газовыми туманностями, заполняющими нашу звездную систему. Секки всерьез заинтересовался и черными пустотами в Млечном Пути, которые Гершель считал «окошками в небесах». Доверяя в основном своей интуиции, Секки настаивал на том, что это гигантские облака темных газов, проецирующиеся на светлый фон далеких звезд. Теперь-то мы знаем, насколько прав был «отец астрофизики» и как близко он подошел к открытию предшественников звезд. Но и через 50 лет после этого уже в начале XX в. астрономы склонны были разделять взгляды Гершеля и находили гипотезу Секки маловероятной.

Но совершенствовалась техника наблюдений, накапливались новые данные. На рубеже веков американский астроном-самоучка Э. Барнард (1857—1923) начал систематическое фотографирование неба на Ликской обсерватории, положив тем самым начало широкому



Рис. 1. Темная пылевая туманность Коуская голова в созвездии Ориона

применению фотографии в астрономии. В 1913 г. Барнард публикует отдельные фотографии Млечного Пути, а в 1927 г. выходит в свет великолепный фотографический «Атлас Млечного Пути», при подготовке которого Барнард обнаруживает и описывает 349 светлых и темных туманностей. Отдельно он составляет каталог 182 темных туманностей в Млечном Пути и выражает свое убеждение в том, что это облака поглощающей свет материи, а не промежутки между звездными облаками, как считал Гершель.

Действительно, в «Атласе» на фоне ярких областей Млечного Пути отчетливо выделяются темные пятна неправильной формы и различных угловых размеров, нередко окаймленные по краям светлой туманностью. Это, безусловно, указывает на их связь с межзвездным газом, но не доказывает ее. Пытаясь доказать существо-

вание темных непрозрачных облаков в межзвездном пространстве, астрономы того времени в основном пользовались логическими, а не наблюдательными аргументами. Известный английский астрофизик Дж. Джинс (1877—1946) писал в 1930 г.: «...непрозрачностью газа объясняются... темные пятна, которые встречаются на небе среди звездных полей... Темное пятно, которое на первый взгляд кажется дырой в звездной системе, картинно обозначается термином «угольный мешок». Однако эти темные пятна не могут быть в действительности пустотами, ибо нельзя представить себе существования столь большого числа пустых туннелей, идущих сквозь толщу звезд и притом направленных прямо к Земле. Поэтому мы должны видеть в них завесы затемняющей материи, которая ослабляет или даже совершенно гасит свет лежащих за ней звезд»*.

Постепенно астрономы приходят к выводу о разнообразии форм межзвездной среды: помимо облаков горячего газа, о высокой температуре которого свидетельствует его спектр, состоящий из отдельных линий излучения, обнаруживаются и области пространства, заполненные более холодным разреженным веществом. Спектроскоп показал, что это вещество просто отражает свет расположенных по соседству не очень горячих звезд, а значит, содержит, кроме газа, и твердые частицы — пылинки. Холодное межзвездное вещество обнаружить значительно сложнее, чем светящиеся горячие туманности. Если перед холодным облаком нет освещающей его звезды, то оно проявляет себя лишь по поглощению света лежащих позади него звезд, а это далеко не всегда удается распознать. Без преувеличения можно сказать, что звездная астрономия XX в. — это непрерывная борьба с межзвездным поглощением света. Лишь в последнее время столь сильно раздражающие астрономов темные облака привлекли к себе внимание как области интереснейших физико-химических метаморфоз, сопровождающих процесс рождения звезд.

Однако в начале XX в. о связи между звездами и межзвездным веществом было известно еще очень мало. В 1916 г. тот же Барнард обнаружил расширяющуюся туманную оболочку, которая образовалась вокруг Новой звезды, вспыхнувшей в созвездии Персея в 1901 г.

Джинс Дж. Вселенная вокруг нас. — Л.—М., 1932.

Это явилось одним из первых указаний на возможность обмена веществом между звездами и межзвездной средой. А поскольку примерно в те же годы Дж. Джинс разработал количественную теорию гравитационной неустойчивости разреженной среды и образования из нее звезд, то появились предпосылки для обобщающих взглядов на круговорот космической материи. В 1921 г. немецкий физик В. Нернст (1864—1941) в лекции «Вселенная в свете современных исследований», прочитанной им в Берлинской академии, поставил вопрос: возможно ли определенное квазистационарное состояние Галактики, при котором в процессе разрушения одних звезд высвобождается столько же вещества, сколько его тратится на формирование других, образующихся в это же время?

Разумеется, нынешние астрономы ответят на этот вопрос отрицательно, ибо хорошо известно, что из круговорота вещества в Галактике постоянно выпадают разрушающиеся остатки звездной эволюции: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры (?), а также объекты субзвездной массы, например планеты. Да и химическая эволюция Галактики вследствие термоядерных реакций идет в одном направлении — от простых элементов к сложным. Поэтому стационарное состояние Галактики в целом недостижимо. Однако если сформулировать тот же вопрос по отношению только к межзвездной среде, то не исключено, что она уже длительное время пребывает в квазистационарном состоянии. Действительно, существуют указания на то, что уменьшение массы газа в процессе звездообразования и изменение его химического состава в результате выброса тяжелых элементов проэволюционировавшими звездами почти в точности компенсируются аккрецией на Галактику чистого водородно-гелиевого межгалактического газа. Вероятно, именно поэтому в течение последних нескольких миллиардов лет звезды в Галактике образуются почти в постоянном темпе и с неизменным химсоставом.

Однако не будем забегать вперед — до середины XX в. перед астрономами стоял вопрос не об эволюции, а о составе и строении межзвездной среды. Оптические методы, к сожалению, давали мало информации, но все же данные о холодных фракциях межзвездной среды понемногу накапливались. В конце 40-х и в

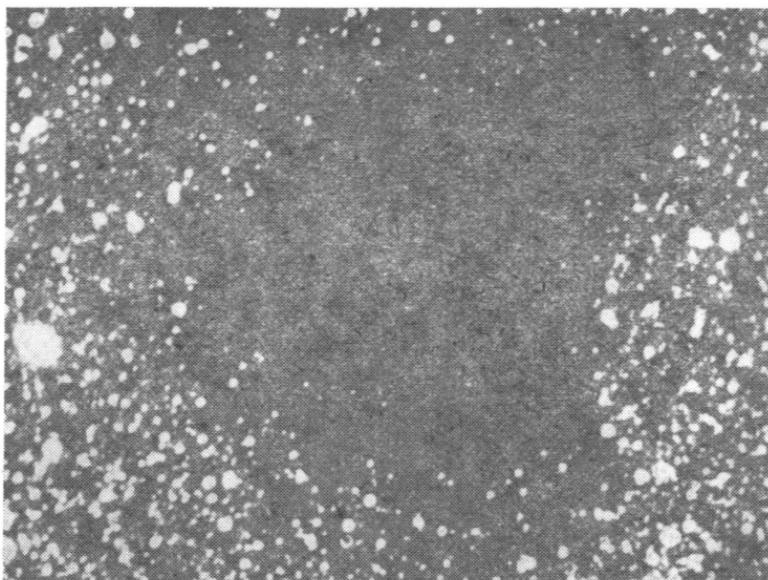


Рис. 2. Темная глобула в Южном Угльном мешке, описанная в каталоге Барнарда (№ 68) и позже изученная Б. Бокком. Размер глобулы 0,3 пк, а поглощение света в ее центре превышает 25^m

50-е годы большой вклад в эту работу внесли советские ученые Г. А. Шайн, В. Ф. Газе, В. Г. Фесенков, Д.-А. Рожковский, А. В. Курчаков и Дж. Ш. Хавтаси. Они создали атласы и каталоги диффузных, отражательных и темных туманностей Млечного Пути. Например, каталог грузинского астронома Дж. Ш. Хавтаси, составленный на основе фотографических атласов Барнарда и Роса — Кальверт, содержал описание 797 темных туманностей.

В 1947 г. американцы Б. Бок и Э. Рейли обнаружили на фоне светлых туманностей NGC 2237 в созвездии Единорога и NGC 6611 в созвездии Щита небольшие черные круглые пятна, названные ими глобулами (рис. 2). Размеры этих плотных газопылевых конденсаций составляли от 0,05 до 0,25 пк, они содержали 0,1—100 M_{\odot} газа и пыли и ослабляли проходящий свет в десятки и сотни раз. Эти объекты сразу стали считать протозвездами. Вообще к

концу 40-х годов связь молодых звезд с облаками горячего газа не вызвала сомнений: на это указывало их сходное распределение в пространстве. Однако процесс зарождения звезд в недрах холодных облаков в то время непосредственному наблюдению не поддавался.

В самом конце 40-х годов была обнаружена поляризация оптического излучения звезд межзвездной средой. Это открытие стало важным не только для изучения свойств космических пылинок — виновников поляризации, но оно также впервые указало на присутствие в межзвездном пространстве крупномасштабного магнитного поля, которое оказывает заметное влияние на поведение разреженного газа и пыли.

Начиная с 1904 г. астрономы регистрировали в спектрах звезд узкие линии поглощения некоторых элементов и простейших молекул (Na, Ca, K, Ti, CN, CH), которые жили как бы своей независимой от звезд жизнью. К середине 20-х годов благодаря теоретическим работам А. Эддингтона (1882—1944) было окончательно доказано, что эти линии образуются, когда свет звезды проходит сквозь полупрозрачные облака межзвездного газа. Изучение межзвездных линий поглощения позволило к началу 50-х годов установить, что облака имеют средний размер около 10 пк и что вблизи плоскости Галактики на луче зрения длиной 1 кпк обычно встречается 9—10 облаков.

По положению линий в спектре были измерены также скорости движения облаков и вычислено, что время их жизни, т. е. время между взаимными соударениями, составляет порядка 10^7 лет. В поисках причины, удерживающей газовые облака от расширения, американский астрофизик Л. Спитцер предложил двухкомпонентную модель межзвездной среды, в которой относительно холодные плотные облака удерживаются от расширения давлением окружающего их разреженного горячего газа. Позже эта идея подтвердилась и получила развитие.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА И ДВИЖЕНИЕ ЗВЕЗД

— И где, по-вашему, Крис, расположен этот источник энергии?— спросил Марлоу.

— В Облаке, конечно.

Несмотря на явный прогресс в изучении межзвездной среды, который наметился к началу 50-х годов, оп-

тические методы все же были чрезвычайно ограничены: они позволяли изучать лишь маленькие полупрозрачные облака и периферийные области крупных облаков, но и при этом давали информацию о второстепенных химических элементах — совершенно не замечались главные составляющие космического вещества: водород и гелий (при низкой температуре эти элементы не имеют спектральных линий в оптическом диапазоне). Лишь по косвенным признакам можно было догадываться, что водород в межзвездных облаках присутствует в большом количестве. Однако полная масса межзвездной среды по оптическим данным существенно недооценивалась.

В связи с этим любопытно напомнить одну работу, выполненную в 1932 г. известным нидерландским астрономом Я. Оортом. Справедливо решив, что в какой бы форме ни находилось межзвездное вещество, оно обязательно должно проявить себя гравитационно, ученый исследовал движение звезд в окрестности Солнца в направлениях, перпендикулярных плоскости Галактики. Грубо говоря, измерив высоту, на которую звезды «подпрыгивают» над галактической плоскостью, можно определить силу их притяжения к ней, а значит, узнать распределение массы в диске Галактики. По данным Оорта, полная плотность вещества в окрестности Солнца составила $0,092 M_{\odot}/\text{пк}^3$. А поскольку вклад плотности от всех наблюдаемых звезд Оорт оценил в $0,038 M_{\odot}/\text{пк}^3$, то на долю невидимой массы оставалось $0,054 M_{\odot}/\text{пк}^3$. Разумеется, в эту величину вносит свой вклад не только межзвездное вещество, но и слабосветящиеся звезды, планеты и т. п.

Забегая вперед, хочется отметить, что результаты Я. Оорта оказались замечательно точными и практически не изменились за прошедшие 60 лет. А то невидимое вещество, которое предсказал Оорт, в действительности оказалось межзвездным газом: современные методы наблюдения, выявившие газ во всех формах (включая ионы, нейтральные атомы и молекулы), показывают, что средняя плотность межзвездного вещества вблизи Солнца составляет $0,05 M_{\odot}/\text{пк}^3$. Поэтому можно считать, что работа Я. Оорта была первым косвенным указанием на присутствие в межзвездном пространстве большой массы вещества.

Дальнейшие работы по звездной динамике помогли

еще точнее предсказать структуру межзвездной среды. Изучая распределение пространственных скоростей звезд, астрономы обнаружили парадоксальную ситуацию: звездный диск Галактики выглядит как хорошо перемешанная, прорелаксировавшая система, но при этом никак не удается понять, какой же физический процесс играет роль перемешивающей «ложки». Поскольку взаимное гравитационное влияние одиночных звезд малó, некоторые исследователи высказали мнение, что часть вещества Галактики объединена в массивные облака, которые и вызывают возмущения в движении одиночных звезд, т. е. перемешивают их траектории и скорости.

После того как в 1951 г. радиоастрономы зафиксировали излучение нейтрального водорода на волне 21 см и сообщили о существовании водородных облаков массами, в сотни раз большими солнечной, американские астрономы Л. Спитцер и М. Шварцшильд высказали гипотезу о существовании в Галактике нескольких тысяч газовых облаков массами 10^5 — 10^6 M_{\odot} , которые могли бы играть роль перемешивающей «ложки». Через 25 лет их гипотеза блестяще подтвердилась. К интересному вопросу о взаимодействии массивных облаков со звездами мы еще вернемся.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА — РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА

...мне представляется, что химия внутренних слоев Облака очень сложна — сложные молекулы, сложные структуры, построенные из этих молекул, сложная нервная деятельность. Короче говоря, я думаю, у Облака есть мозг.

С появлением радиотелескопов изучение межзвездной среды превращается в самостоятельную ветвь астрономии. Распределение в Галактике нейтрального атомарного водорода (области HI) было изучено по его радиоизлучению в линии 21 см. Горячий ионизированный газ (области HII) давал о себе знать оптическим излучением, а также синхротронным радиоизлучением, вызванным движением заряженных частиц в магнитном поле.

До 1970 г. астрофизиков вполне удовлетворяло представление о межзвездном веществе как о двухкомпонентной среде: в пространстве, заполненном горячим газом с температурой $T \approx 10^4$ К, плавают холодные облака ($T \approx 100$ К). Это была, так сказать, основная рабочая модель, на фоне которой происходили различные скоротечные явления: одни звезды теряли вещество в виде разреженного и очень горячего ($T \approx 10^6$ К) звездного ветра, другие — в виде плотных и не очень горячих планетарных туманностей. Холодные облака частично испарялись при взаимных столкновениях или от близкого соседства с горячими звездами, частично же остывали и сжимались, порождая новые поколения звезд. Но в целом ситуация в межзвездной среде характеризовалась стабильным балансом межоблачной среды и облаков размером 0,1—50 пк и массой 0,1— $10^4 M_{\odot}$.

В начале 70-х годов радиоастрономы обнаружили в межзвездной среде несколько достаточно сложных молекул, содержащих до семи атомов; такие молекулы могли образоваться и жить лишь в очень плотных и холодных облаках. В то же время с помощью выведенных на орбиту ультрафиолетовых телескопов был обнаружен чрезвычайно горячий, так называемый корональный, межзвездный газ низкой плотности, возникший в результате взрывов сверхновых звезд. Потребовалось пересмотреть модель межзвездной среды. Современный ее вид представлен в табл. 1. Облака сейчас разделяют по крайней мере на три типа:

диффузные ($T \approx 10^2 - 10^3$ К, $n \approx 1 - 10^2$ см $^{-3}$);
 темные ($T \approx 10 - 10^2$ К, $n \approx 10^2 - 10^4$ см $^{-3}$);
 молекулярные ($T \approx 5 - 50$ К, $n \approx 10^3 - 10^6$ см $^{-3}$).

В особую разновидность выделяют компактные газопылевые глобулы в основном из-за их малой массы и резко очерченной формы. Особая роль ГМО в процессе звездообразования и в эволюции межзвездной среды, как мы увидим дальше, также выделяет их в самостоятельную популяцию. Однако кажется вполне очевидным, что границы между различными типами облаков являются достаточно условными, а сами облака часто имеют иерархическую структуру и взаимно проникают друг в друга.

Основные фазы межзвездного газа

Фаза	Температура, К	Плотность, см ⁻³	Доля объема диска Галактики, %
Горячая, HI	3 · 10 ⁵	1,6 · 10 ⁻³	74
Теплая, HI—HII	8000	0,25	23
Прохладная, HI	80	40	2
Холодная, H ₂	10	300	1

Хотя содержание некоторых химических элементов (особенно водорода и гелия) определяется с большим трудом, считается, что состав межзвездной среды во всех областях примерно одинаков: на 100 атомов водорода приходится около 9 атомов гелия и 0,13 атома всех прочих, более сложных химических элементов. Впрочем, доля тяжелых элементов может быть несколько иной, и это является индикатором предшествующей эволюции данной области пространства: например, показывает, насколько часто в ней взрываются сверхновые звезды — основные источники тяжелых элементов.

В горячих и теплых областях атомы находятся в ионизованном или нейтральном состоянии, но молекул практически не образуют. Лишь в глубине плотных облаков, защищенные непрозрачным слоем пыли от разрушительного влияния ультрафиолетового излучения звезд, атомы межзвездного газа охотно объединяются в молекулы. При этом пылинки не только защищают молекулы от ультрафиолетовых квантов, но и играют роль катализатора химических реакций: «прилипнув» к поверхности пылинок, атомы значительно охотнее объединяются в молекулы.

Радиоастрономическими методами уже зарегистрированы молекулы, содержащие до 13 атомов (табл. 2), но мы в этой брошюре будем в основном говорить лишь о двух простейших: о молекуле водорода H₂ и угарного газа CO. Первая важна тем, что гигантские молекулярные облака на 75% по массе состоят из молекулярного водорода, а вторая — тем, что ее излучение легко регистрируется и является важнейшим источником информации об этих облаках.

Межзвездные молекулы

Химическая формула	Название молекулы	Спектральный диапазон *	Год открытия
1	2	3	4
2-атомные молекулы			
CH	Метилидин	Опт	1937
CN	Циан	Опт	1940
CH ⁺	Метилидин (ион)	Опт	1941
OH	Гидроксил	P 18 см	1963
CO	Монокись углерода	P 2,6 мм	1970
H ₂	Молекулярный водород	УФ	1970
CS	Сероуглерод	P 2,0 мм	1971
SiO	Монокись кремния	P 2,3 мм	1971
SO	Монокись серы	P 3,0 мм	1973
NS	Сульфид азота	P 2,6 мм	1975
SiS	Сульфид кремния	P 2,8 мм	1975
C ₂	Двухатомный углерод	ИК	1977
NO	Окись азота	P 2,0 мм	1978
HCl	Хлористый водород	ИК	1985
3-атомные молекулы			
H ₂ O	Водяной пар	P 1,4 см	1968
HCO ⁺	Формил (ионизованный радикал муравьиной кислоты)	P 3,4 мм	1970
HCN	Цианистый водород (синильная кислота)	P 3,4 мм	1970
HNC	Изоцианистый водород	P 3,3 мм	1971
OCS	Сероокись углерода	P 2,7 мм	1971
H ₂ S	Сероводород	P 1,8 мм	1972
C ₂ H	Этинил (радикал)	P 3,4 мм	1974
N ₂ H ⁺	Диазонил (протонизированный азот)	P 3,2 мм	1974
HCO	Формил (радикал)	P 3,5 мм	1975
SO ₂	Двуокись серы	P 3,6 мм	1975
HNO	Нитроксил	P 3,7 мм	1977
HCS ⁺	Тиоформил	P 3 мм	1980
SiC ₂	Карбид кремния	P 1—3 мм	1984
H ₂ D ⁺	Дейтерированный водород	P 0,8 мм	1985
4-атомные молекулы			
NH ₃	Аммиак	P 1,3 см	1968
H ₂ CO	Формальдегид	P 6,2 см	1969
HNCO	Изоциановая кислота	P 3,4 мм	1971

1	2	3	4
H ₂ CS	Тиоформальдегид	P 9,5 см	1971
C ₂ H ₂	Ацетилен	ИК	1976
C ₃ N	Карбонитрил (цианоэтини.радикал)	P 3,4 мм	1976
HNCS	Роданистоводородная кислота	P 3 мм	1979
HOCO+	Протонизированная двуокись углерода	P 3 мм	1980
HCNH+	Протонизированный цианистый водород	P 2—3 мм	1984
C ₃ H	Пропенил (радикал)	P 3 мм	1984
C ₃ O	Монокись триуглерода	P 1,7 см	1984
HCNH ²⁺	Протонизированный цианистый водород	P 4 мм	1985
H ₃ O+	Гидроний		1986
C ₃ S			1987
5-атомные молекулы			
HCOOH	Муравьиная кислота	P 18 см	1970
HC ₃ N	Цианоацетилен	P 3,3 см	1970
CH ₂ NH	Карбонимид (метанимин), метиленамин	P 5,7 см	1972
NH ₂ CN	Цианамид	P 3,7 мм	1975
CH ₂ CO	Кетен	P 2,9 мм	1976
C ₄ H	Бутадиинил (радикал)	P 2,6 мм	1978
SiH ₄	Силан	ИК	1984
C ₃ H ₂	Циклопропенилидин (радикал)	P 2 см	1985
6-атомные молекулы			
CH ₃ OH	Метанол (метиловый или древесный спирт)	P 36 см	1970
CH ₃ CN	Метилциан	P 2,7 мм	1971
NH ₂ CHO	Формамид	P 6,5 см	1971
CH ₃ SH	Метилмеркаптан	P 3,0 мм	1979
C ₅ H	Пентадинил	P 3 мм	1986
H ₂ CCH ₂	Этилен	P 3 мм	1987
7-атомные молекулы			
CH ₃ C ₂ H	Метилацетилен	P 3,5 мм	1971
CH ₃ CHO	Ацетальдегид	P 28 см	1971
CH ₃ NH ₂	Метиламин	P 3,5 мм	1974
CH ₂ CHCN	Акрлонитрил (винилцианид)	P 22 см	1975
HC ₅ N	Циандиацетилен	P 3,0 см	1976
C ₆ H	Гексатринил	P 22 см	1987

1	2	3	4
8-атомные молекулы			
HCOOCH ₃ CH ₃ C ₃ N	Метилформиат	Р 18 см	1975
	Метилцианоацетилен	Р 1,5 см	1983
9-атомные молекулы			
CH ₃ CH ₂ OH	Этиловый (винный) спирт	Р 2,9 мм	1974
(CH ₃) ₂ O C ₂ H ₅ CN	Диметилэфир	Р 9,6 мм	1974
	Пропионитрил (этилцианид)	Р 3 мм	1977
HC ₇ N	Цианогексатетрен	Р 2,9 мм	1977
CH ₃ C ₄ H	(цианотриацетилен)		
	Метилдиацетилен	Р 1,5 см	1984
10-атомные молекулы			
(CH ₃) ₂ CO	Ацетон		1987
11-атомные молекулы			
HC ₉ N	Цианооктатетрен	Р 2,9 см	1977
13-атомные молекулы			
HC ₁₁ N	Цианодекапентин	Р 1,3 см	1981

* Опт — оптический, Р — радио, ИК — инфракрасный, УФ — ультрафиолетовый. В этой таблице не приведены все изотопы, изомеры и ионы молекул, обнаруженные в межзвездной среде, а также молекулы, найденные в оболочках холодных красных гигантов и комет.

МОЛЕКУЛЫ H₂ и CO

Но ведь это не свет, а нечто темное, а темное пятно не так-то просто заметить: оно очень хорошо маскируется на небе.

Поскольку молекула H₂ симметричная, ее тепловые колебания и вращение не приводят к взаимному смещению разноименных электрических зарядов, т. е. к изменению дипольного момента. А это значит, что у такой молекулы практически отсутствуют низкочастотные излучения. В радиодиапазоне у нее вообще нет энергии.

тических переходов. Поэтому возможности обнаружения H_2 в межзвездной среде очень ограничены. Одна из них — «просвечивание» межзвездных облаков излучением звезд. Если мы наблюдаем звезду, лежащую за полупрозрачным облаком, то в ее спектре обнаруживаем линии поглощения атомов и молекул, входящих в состав облака. У молекул H_2 — это электронные переходы в полосе Лаймана, лежащие в ультрафиолетовом диапазоне, в области длин волн от 991 до 1132 Å. Эта область спектра не доступна для наблюдения с поверхности Земли. Только развитие внеатмосферной астрономии позволило в начале 70-х годов получить спектры нескольких сотен звезд в ультрафиолетовых лучах и выявить в некоторых из них межзвездные линии поглощения H_2 .

Нужно отметить, что такие исследования не являются полными и систематическими. Для просвечивания межзвездных облаков годятся только наиболее горячие звезды спектральных классов O и B, у которых достаточно велико излучение в ультрафиолетовой области. Уже это ограничивает выбор направлений в пространстве, где можно обнаружить молекулы H_2 . К тому же облака высокой плотности, которые представляют наибольший интерес, вообще не просвечиваются звездами насквозь, поскольку в них очень велико поглощение света пылью. Коэффициент поглощения резко увеличивается с уменьшением длины волны излучения, поэтому в ультрафиолетовом диапазоне поглощение особенно велико.

Несмотря на эти трудности, все же был получен ценнейший материал о содержании H_2 в облаках малой и умеренной плотности (до нескольких тысяч частиц в 1 см^3). Количество молекул H_2 на луче зрения в этих облаках лежит в пределах от 10^{12} до 10^{21} см^{-2} . Сравнение с наблюдениями в линии поглощения атомарного водорода (линия Лайман-альфа с длиной волны 1216 Å), возникающей в тех же облаках, позволило оценить долю атомов водорода, объединенных в молекулы H_2 : в наиболее плотных облаках эта доля достигает 60%, а в наименее плотных, лежащих на высоких галактических широтах, снижается до 0,01%.

Другая возможность наблюдения межзвездных молекул H_2 связана с их излучением в ближнем инфракрасном диапазоне. В нем лежат квадрупольные линии

излучения, образующиеся при энергетических переходах молекулы между вращательными и вращательно-колебательными уровнями. Эти линии наблюдаются в тех областях молекулярных облаков, где температура газа повышена до 1000—4000 К, т. е. за фронтами ударных волн. Эти волны возбуждаются либо при взаимном столкновении облаков, либо под действием излучения и звездного ветра молодых массивных звезд. Инфракрасное излучение молекулы H_2 возникает в сравнительно тонком слое газа, находящемся непосредственно за фронтом ударной волны, т. е. там, где температура газов максимальна. За счет инфракрасного излучения газ быстро охлаждается, и молекулы H_2 перестают быть видимыми. Таким образом, и здесь мы видим только отдельные части облаков H_2 , недавно подвергшиеся воздействию ударной волны. К счастью, пыль поглощает инфракрасное излучение существенно слабее, чем ультрафиолетовое, и не очень мешает наблюдениям даже самых плотных и «запыленных» облаков.

Еще несколько слов о молекуле водорода. Эта молекула не очень прочна: для ее разрушения (диссоциации) нужна энергия более 4,5 эВ. Такую энергию имеют кванты с длиной волны короче чем 2756 Å. Таких ультрафиолетовых квантов в Галактике много — их излучают все горячие звезды. Правда, молекула H_2 поглощает эти кванты крайне неохотно. Поэтому, как правило, разрушение молекул H_2 происходит следующим образом. Квант с энергией 11,2 эВ переводит один из электронов молекулы в возбужденное состояние. Обратный переход в основное состояние обычно сопровождается излучением такого же кванта, но иногда энергия расходуется не на излучение кванта, а на возбуждение колебаний молекулы, которые заканчиваются ее распадом.

После молекулы водорода второй по распространенности в межзвездном пространстве является молекула угарного газа (рис. 3). Обе они были открыты в 1970 г., только молекула H_2 — по линиям поглощения в ультрафиолетовом диапазоне, а молекула CO — по ее радиоизлучению на волне 2,6 мм. Хотя концентрация молекул CO в тысячи раз меньше, чем H_2 , обнаруживаются они значительно легче. При низких температурах, господствующих в плотных облаках, молекулы H_2 с их высокоэнергетическими уровнями практически не возбуж-

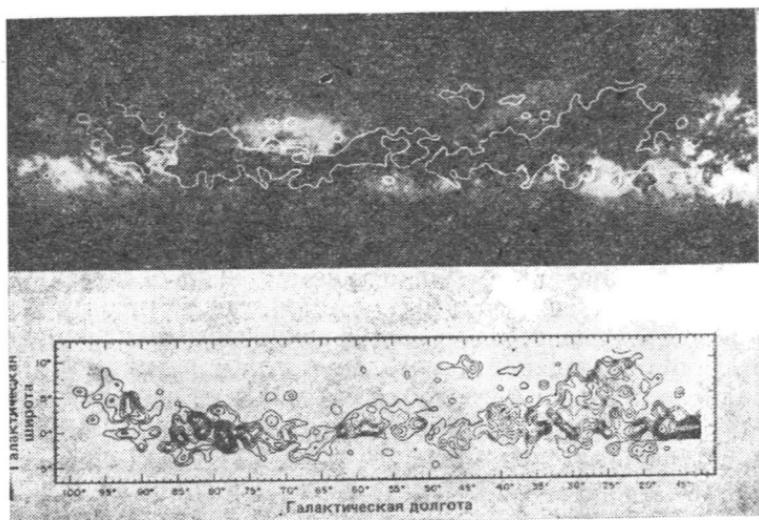


Рис. 3. Распределение молекулярных облаков вдоль Млечного Пути в созвездиях Лебедь, Лисичка, Стрела, Орел и Щит. Внизу: подробная радиокарта излучения молекулы СО. Нанесены линии равной радиояркости (эквиденситы). В местах сгущения линий интенсивность излучения повышена. Вверху: фотография Млечного Пути с нанесенным на нее контуром области радиоизлучения. Заметно хорошее совпадение областей концентрации молекул (в радио) и пыли (в оптике)

даются, зато молекулы СО, имеющие уровни в радиодиапазоне, возбуждаются весьма охотно. Молекулы СО возбуждаются, сталкиваясь с другими молекулами и атомами, а затем излучают линии так называемых вращательных переходов. Наиболее длинноволновая из них ($\lambda = 2,6$ мм) легко наблюдается во многих областях Галактики, причем светимость некоторых молекулярных облаков в этой линии достигает нескольких светимостей Солнца ($L_c = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с).

Энергия диссоциации молекулы СО составляет 11,1 эВ, следовательно, она может существовать там же, где молекулярный водород. Поэтому, изучая радиоастрономическими методами распределение в Галактике молекул СО, мы считаем, что в тех же областях, где обнаружены эти молекулы, находится и молекулярный водород. Как видно из табл. 1, эти области занимают мизерный объем Галактики. И вот почему. Как извест-

но, жесткие ультрафиолетовые кванты с энергией более 13,5 эВ ионизируют атомы водорода и поэтому полностью поглощаются межзвездной средой в непосредственной близости от горячих звезд. Но более мягкие кванты (в том числе и с энергией 11,1—11,2 эВ) почти беспрепятственно распространяются в Галактике и разрушают молекулы водорода и угарного газа да и большинство других молекул тоже. Единственное место, где эти молекулы могут «спрятаться», — недра плотных газопылевых облаков, куда ультрафиолет не проникает.

Обычно чем больше плотность облака, тем более разнообразные молекулы в нем встречаются. Радионаблюдения в линиях CO и некоторых других молекул (OH, NH₃, HCN) позволяют охватить все облако в целом, все его области с разнообразными физическими условиями. Наблюдения нескольких линий одной молекулы дают возможность определить в каждой области температуру и плотность газа, а также его изотопный состав.

Наблюдения молекул, содержащих различные изотопы одного элемента, иногда оказываются очень полезными. Например, у молекулы угарного газа наблюдается несколько изотопических аналогов: ¹²C¹⁶O — наиболее распространенный, который обычно записывают просто как CO, а также менее распространенные — ¹³CO, C¹⁷O, C¹⁸O и очень редкий — ¹³C¹⁸O.

МАССА ОБЛАКОВ

— Пока у нас слишком мало данных, чтобы ответить на этот вопрос, — проговорил Марлоу, выпуская клубы дыма. — Сейчас мы не знаем, является ли Облако чем-то очень маленьким и близким или, наоборот, чем-то огромным, но весьма удаленным. Мы не имеем также ни малейшего представления о плотности вещества внутри Облака.

Мы уже отмечали, что для определения важнейшей характеристики облака — его массы — необходимо подсчитать в нем полное число молекул CO. Для облаков умеренной плотности это число пропорционально радиопотоку в линии 2,6 мм, но в плотных облаках часть этого радиоизлучения поглощается другими мо-

лекулами CO (так называемое явление самопоглощения), и мы недооцениваем полное количество этих молекул (N_{CO}). В таких случаях измеряют поток радиополучения от молекул ^{13}CO или $C^{18}O$, которых на порядок меньше, и поэтому самопоглощения радиоквантов практически не происходит.

Переходя к полной массе облака, предполагают, что на каждую молекулу ^{13}CO приходится порядка миллиона молекул H_2 . Но о точном значении коэффициента перехода $N_{CO} \rightarrow N_{H_2}$ до сих пор ведутся споры: у разных исследователей он может различаться в 2—3 раза. Дело в том, что отношение N_{CO}/N_{H_2} можно точно измерить только в близких к нам полупрозрачных облаках, которые создают в спектрах горячих звезд ультрафиолетовые линии поглощения CO и H_2 . Но условия в далеких плотных облаках совсем иные. С одной стороны, часть атомов углерода и кислорода может входить там в состав пылинок и не образовывать свободных молекул CO, с другой — химсостав межзвездной среды в различных областях Галактики несколько различается. В районе центра Галактики из-за частых вспышек сверхновых звезд межзвездный газ сильно обогащен элементами группы CNO. Некоторые исследователи считают, что относительное содержание этих элементов там в 3 раза выше, чем в окрестности Солнца. Если это действительно так, то соответственно в 3 раза меньше следует брать коэффициент перехода $N_{CO} \rightarrow N_{H_2}$. Подобные неопределенности приводят к некоторым разногласиям между астрономами относительно точного значения массы молекулярного газа в Галактике и в отдельных облаках. Еще острее эта проблема встает при изучении соседних галактик, химический состав которых изучен весьма неполно. Однако разногласия между исследователями не носят принципиального характера и постепенно сглаживаются.

Помимо прямых, существуют и косвенные методы оценки массы молекулярного газа в Галактике; они связаны с математическим моделированием некоторых процессов, в которых этот газ участвует. Например, наблюдение галактического гамма-излучения показало, что в основном это излучение рождается при взаимодействии быстрых частиц космических лучей с межзвездным газом. Вклад в гамма-излучение компактных источников, таких, как молодые пульсары, невелик. Если этот

вклад вычесть, то наблюдения в гамма-диапазоне и в линиях излучения молекулы CO согласуются очень хорошо. При определенных предположениях о распределении космических лучей в Галактике это позволяет независимо определять распределение и массу межзвездного газа.

Если речь идет об определении масс крупных обособленных облаков, то радиоспектроскопия дает для этого довольно надежную методику. Изучение ГМО показало, что в отличие от облаков меньшей массы, равновесие которых основано на балансе внутреннего и внешнего газового давления, массивные облака гораздо сильнее чувствуют собственное гравитационное поле и «сопротивляются» его сжимающему влиянию за счет внутренних крупномасштабных движений газа.

Чтобы противостоять сжатию облака, потоки газа внутри него должны двигаться со скоростями, близкими к первой космической:

$$v_1 = \sqrt{GM/R}$$

Здесь M и R — масса и радиус облака, а G — постоянная тяготения. При наблюдении радиоспектра облака это движение проявляет себя уширением линий излучения за счет доплер-эффекта. Измеряя по ширине линий скорость движения газа, а по изображению облака его размер (предполагается, что расстояние до облака известно), можно с помощью приведенной выше формулы определить полную массу:

$$M = v^2 R / G.$$

Поскольку эта формула в общем виде выводится с помощью теоремы вириала, то найденную таким методом массу называют вириальной. Она включает в себя массу всей гравитирующей материи в объеме облака, но звезды, как правило, составляют незначительную ее часть.

Существуют и другие независимые методы оценки массы облаков — например, по их влиянию на движущиеся вблизи них звезды и звездные скопления. Но пока точность всех описанных методов невелика, и нужно быть готовым к тому, что приведенные здесь значения в будущем могут возрасти или уменьшиться в 2 раза.

КОЛЬЦО И ДИСК

...Облако теперь приняло форму диска...

Как известно, для приема слабого космического излучения применяются зеркала-концентраторы: в оптическом диапазоне — это стеклянные зеркала телескопов, а в радиодиапазоне — металлические антенны радиотелескопов. Чувствительность приемника прямо зависит от размера концентратора энергии, который ограничен необходимой точностью изготовления его поверхности. Отклонение поверхности от идеальной формы (например, от парабооида) должно не превышать десятой доли длины волны принимаемого излучения.

Поэтому в первые годы развития радиоастрономии был освоен метровый и сантиметровый диапазон, к тому же он представлял интерес для радиолокации, а строительство антенн было технически несложным. Сейчас радиотелескопы сантиметрового диапазона имеют диаметры до 100 м. Именно в сантиметровом диапазоне в 60-е годы впервые было зарегистрировано радиоизлучение молекул — таких, например, как гидроксил (ОН), формальдегид (H_2CO), вода.

Для приема излучения молекулы СО на волне 2,6 мм необходима точность изготовления антенны в доли миллиметра. Промышленность освоила такие антенны в середине 60-х годов, когда это понадобилось для спутниковой связи в миллиметровом диапазоне. Улучшая конструкцию антенн и детекторов излучения, радиоастрономы добились высокой чувствительности своих приемников и в 1970 г. зарегистрировали миллиметровое излучение сразу нескольких молекул, в том числе и молекул СО. Сведения о количестве и структуре отдельных молекулярных облаков накапливались постепенно, по мере роста чувствительности радиотелескопов и диаметра их антенн — от 1—2 м у первых инструментов до десятков метров у современных. Но уже первые обзоры неба в линии излучения СО показали, что молекулярный газ в Галактике распределен крайне неоднородно.

Как и другие компоненты межзвездной среды, молекулярный газ сконцентрирован вблизи галактической плоскости, причем он «прижат» к этой плоскости сильнее любой другой газовой компоненты. Причину легко

понять: чем холоднее газ, тем труднее ему сопротивляться притяжению Галактики, которое стремится сконцентрировать все вещество в плоскости вращения (подобно тому как поступает Сатурн с частицами своего кольца).

Горячий корональный газ почти не удерживается вблизи плоскости Галактики и уходит наверх, в гало. Более холодные компоненты межзвездной среды образуют вдоль галактической плоскости диск, толщина которого возрастает от центра Галактики к периферии в несколько раз в связи с уменьшением силы тяжести. При этом чем холоднее газ, тем более тонкий диск он образует. В окрестности Солнца нейтральный межоблачный газ заполняет диск с характерной толщиной около 300 пк. Облака H I заполняют диск толщиной около 200 пк, а диск из молекулярных облаков едва достигает толщины 150 пк.

Так же плотно, как молекулярный газ, к плоскости Галактики прижаты только самые молодые звезды; звезды среднего и старшего возраста заполняют гораздо более толстый диск. Уже сам по себе этот факт указывает на генетическую связь молодых звезд с молекулярными облаками, хотя, как мы увидим, связь эта значительно теснее.

Заметим, что поскольку сами молекулярные облака имеют диаметры 30—50 пк (а наиболее крупные — даже до 100 пк), то практически это и определяет толщину их слоя в Галактике. Условно можно назвать этот слой мономолекулярным, имея в виду, что он состоит из движущихся почти в одной плоскости частиц-облаков.

Чтобы определить расстояние до молекулярных облаков, как правило, используют два метода. Если облако находится недалеко от Солнца и не закрыто от нас другими облаками, то часто удается обнаружить оптические объекты, связанные с этими облаками, — молодые яркие звезды или разогретые их излучением области H II, расстояние до которых астрономы умеют определять вполне надежно.

Если облако далеко от нас и наблюдается только в радиодиапазоне, то расстояние до него оценивается по лучевой скорости. Различные облака, наблюдаемые в одном направлении, но расположенные на разном расстоянии от центра Галактики, имеют разную ско-

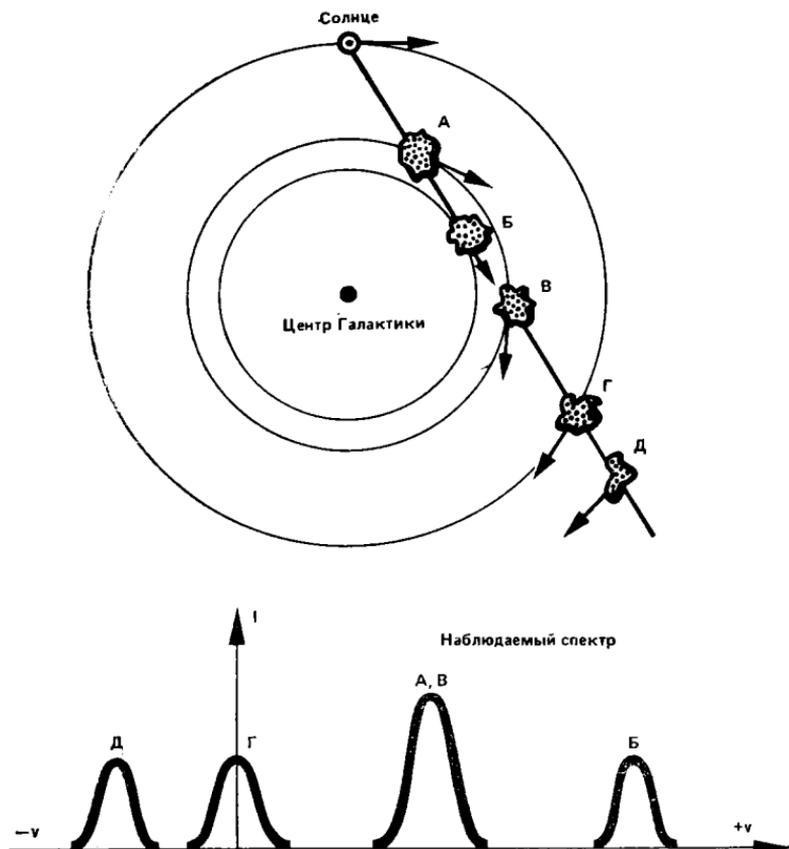


Рис. 4. При наблюдении в плоскости Галактики радиотелескоп обычно принимает излучение сразу от нескольких облаков, находящихся на разном расстоянии от Солнца и имеющих относительно него различную лучевую скорость (v). Наблюдаемый спектр формируется в результате доплеровского смещения линий излучения, которое дает возможность изучать облака отдельно и определять до них расстояние, правда, не всегда однозначно — обратите внимание на облака А и В

рость относительно Солнца; она и служит индикатором расстояния (рис. 4, 5). Точность этого метода зависит от того, насколько хорошо известна скорость вращения Галактики на разных расстояниях от ее центра и насколько точно известно положение самого Солнца в Галактике. Относительно расстояния Солнца от центра

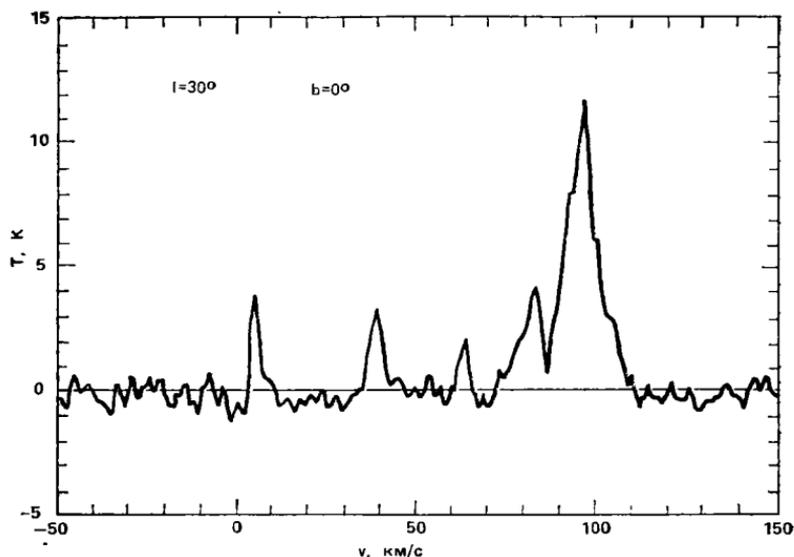


Рис. 5. Профиль линии излучения молекулы CO ($\lambda=2,6$ мм) в плоскости Галактики в направлении созвездия Орел: l и b — галактические долгота и широта наблюдаемой точки; T — яркостная антенная температура, пропорциональная потоку радиоизлучения; v — лучевая скорость относительно Солнца; отдельные пики в спектре соответствуют крупным облакам или их группам

Галактики у астрономов пока нет единого мнения. Согласно последним рекомендациям Международного астрономического союза это расстояние принимают равным 8,5 кпк. Такое же значение принято и в нашей брошюре, когда указываются различные линейные характеристики газовых подсистем.

Уже первый обзор части галактического диска в линии излучения молекулы CO , опубликованный американскими астрофизиками Н. Сквиллем и П. Соломоном в 1975 г., показал, что вдоль радиуса диска молекулярный газ распределен очень неоднородно: он сконцентрирован вблизи центра Галактики и в кольце с внутренним радиусом 3 кпк и внешним 7 кпк. В районе галактического центра молекулярный газ образует плотный диск с довольно резким внешним краем. Его ось вращения заметно наклонена к оси вращения Галактики. Молекулярное облачное кольцо выражено слабее: его плотность постепенно спадает к внутреннему и внеш-

нему краю так, что даже на расстоянии 10—15 кпк от центра Галактики еще встречаются молекулярные облака, хотя большая часть газа находится там в атомарном состоянии.

Центральный молекулярный диск имеет радиус около 1 кпк и отделен от молекулярного кольца областью шириной 2 кпк, в которой плотность межзвездного газа заметно понижена. Масса газа в центральном диске в связи с описанными выше неопределенностями оценивается от $3 \cdot 10^7$ до $10^9 M_{\odot}$. Диск почти целиком состоит из молекулярного газа с очень разнообразным химическим составом. Например, в находящемся недалеко от центра Галактики гигантском облаке Стрелец В2 (Sgr B2) обнаруживаются все молекулы, зарегистрированные радиоастрономами где-либо в других частях Галактики, — их там более полусотни типов, не считая различных изотопических аналогов. Кстати, это облако наиболее плотное и массивное из всех ГМО: при радиусе 15 пк оно имеет массу не менее $10^7 M_{\odot}$.

Хотя центральный диск, так же как и молекулярное кольцо, имеет облачную структуру, в определенном смысле его можно считать единым сверхгигантским облаком. Действительно, средняя плотность центрального диска (100 молекул/ см^3) лишь немногим меньше средней плотности типичных ГМО (300 молекул/ см^3). То, что мы называем облаками центрального диска (например, Стрелец В2), имеет такую же плотность, как компактные уплотнения внутри типичных ГМО ($n \approx 10^4$ молекул/ см^3). Самостоятельный, глубоко индивидуальный характер центрального молекулярного диска подчеркивается и его вращением: экваториальная плоскость диска наклонена как минимум на 7° к плоскости Галактики. Но и это еще не все.

Тонкий молекулярный диск погружен в более толстый и протяженный диск из атомарного водорода. Ось вращения этого «покрывала» наклонена к галактической оси еще сильнее — почти на 30° . Не исключено, что и по своему изотопному составу центральный диск отличается от других областей Галактики. Одним словом, к загадке галактического ядра теперь прибавились вопросы, связанные с центральным молекулярным диском. Не исключено, что подробное изучение этой любопытной газовой структуры поможет понять поведение активного ядра нашей звездной системы.

Молекулярное облачное кольцо — главный газовый резервуар Галактики. Оно занимает область от 3 до 7 кпк от галактического центра, и в нем сосредоточено около 80% всего молекулярного вещества межзвездной среды. Эта область Галактики выделяется и по другим характеристикам: в ней содержится наибольшее число пульсаров и остатков от взрыва сверхновых звезд, отсюда исходит наиболее сильное нетепловое радиоизлучение, в этом районе значительно повышена концентрация областей HII и ассоциаций молодых звезд (OB-ассоциаций). Разумеется, это совпадение не случайное: облака молекулярного газа являются «родильными домами» для звезд, а соседство молодых горячих звезд и плотного газа, в свою очередь, приводит к образованию ярких ионизованных газовых туманностей.

Радиопульсары и сверхновые, как известно, являются конечным продуктом эволюции довольно массивных звезд. Жизненный цикл этих звезд длится недолго — десятки миллионов лет, поэтому они не успевают далеко уйти от места своего рождения и заканчивают свою эволюцию в той же области Галактики, где родились, — в районе концентрации молекулярных облаков, в облачном-кольце.

Разные исследователи по-разному оценивают массу газа в кольце: от $5 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Во всяком случае и здесь масса молекулярного газа заметно превышает массу атомарного и тем более ионизованного газа. Но за орбитой Солнца это уже не так: там молекулярные облака — редкие гости и составляют незначительную долю от массы межзвездной среды. Хотя в целом межзвездная среда составляет лишь несколько процентов от массы Галактики, ее сильная концентрация к галактической плоскости приводит к тому, что в тонком слое вблизи нее пространственные плотности газа и звезд сравнимы. Мы уже отмечали, что в окрестности Солнца плотности газовой и звездной компонент практически равны (хотя их сумма не исчерпывает полную плотность материи в этой области, что указывает на присутствие невидимого вещества). С приближением к центру Галактики плотности как звездной, так и газовой составляющих возрастают, но при этом вблизи галактической плоскости остаются приблизительно равными друг другу. Причина этой закономерности пока не ясна.

Характеристики двух основных резервуаров МО Галактики даны в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики двух основных резервуаров молекулярных облаков Галактики

Характеристика	Центральный молекулярный диск	Молекулярное облачное кольцо
Масса, M_{\odot}	$3 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^9$
Радиус, кпк	0,7	3—7
Толщина, кпк	0,07	0,1
Средняя поверхностная плотность в проекции на плоскость Галактики, $M_{\odot}/\text{пк}^2$	300	12
Средняя объемная плотность, $\text{H}_2/\text{см}^3$	100	2,7
Отношение масс, H_2/HI	20	3
Скорость вращения, км/с	200	220
Наклон оси вращения к галактической оси, град.	7	0

«ОБЛАКА ПЛЫВУТ, ОБЛАКА...»

— Посмотрите-ка на это темное круглое пятно. Очевидно, это темное облако, не пропускающее свет звезд, расположенных позади него. Такие глобулы нередки в Млечном Пути, но обычно они имеют очень маленькие размеры. Боже мой, а взгляните на эту Громадина!

Итак, до 1975 г., т. е. до появления первых систематических обзоров Галактики в линии CO, межзвездная среда представлялась как множество облаков нейтрального водорода (HI), плавающих в разреженном и ионизованном межоблачном газе. Почти все вещество при этом заключено в облаках HI массой от 1 до $10^3 M_{\odot}$. Полная масса атомарного водорода в Галактике составляет $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$, причем большая ее часть находится на периферии диска, за пределом орбиты Солнца.

В 1975—1976 гг. были опубликованы первые обзоры в линии CO части Млечного Пути, видимой из Северного полушария. Эти обзоры были сделаны с помощью антенны диаметром чуть более метра, имеющих угловое

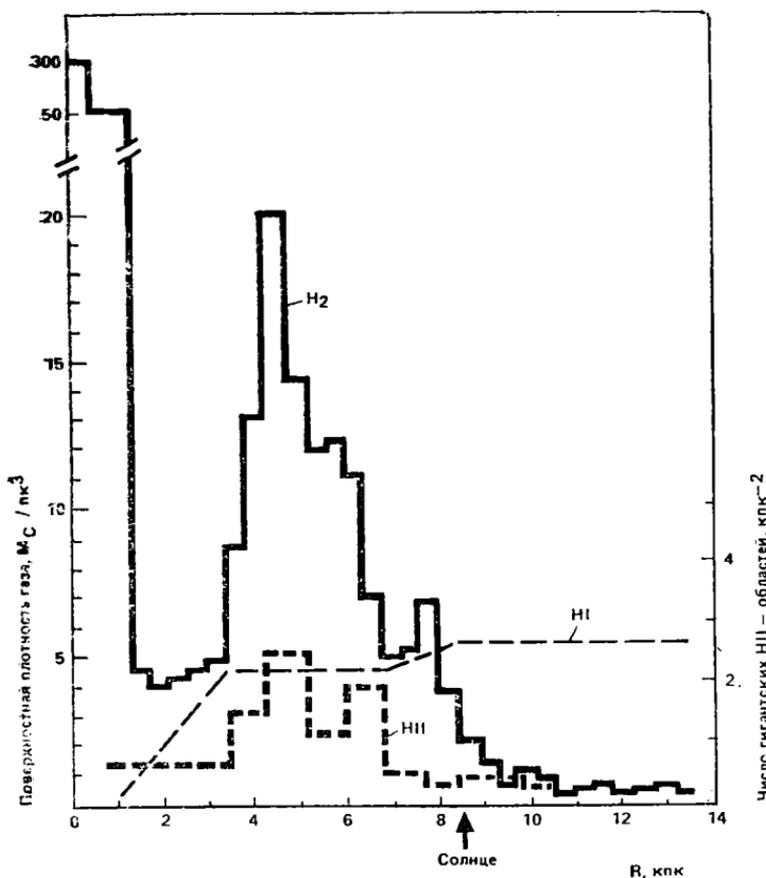


Рис. 6. Распределение поверхностной плотности молекулярного, атомарного и ионизованного межзвездного газа в проекции на плоскость Галактики. Наблюдаемая плотность H_2 и HI домножена на коэффициент 1,36 для учета содержания гелия. Распределение HII представлено в относительных единицах — количестве крупных HII -областей на единицу поверхности диска

разрешение около $0,1^\circ$, что на расстоянии 10 кпк соответствует размеру 20 пк. Естественно, по результатам таких наблюдений можно было выделить лишь наиболее крупные облака и их скопления, но нельзя было детально исследовать внутреннюю структуру самих облаков.

Однако уже эти результаты показали, что полная

масса молекулярного водорода в Галактике около $3,5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ и почти весь он находился внутри орбиты Солнца. Таким образом, после 1975 г. масса межзвездной среды в Галактике как бы удвоилась. А если учитывать не только водород, но также гелий и другие элементы, то сейчас масса межзвездного газа в Галактике оценивается примерно в $10^{10} M_{\odot}$. Это составляет 5% от массы Галактики в пределах радиуса 16—18 кпк. На больших расстояниях от центра Галактики, в ее короне ни звезд, ни межзвездного газа уже почти нет, хотя масса в большом количестве, вероятно, присутствует (проблема скрытой массы). Однако в этой брошюре мы ограничимся «классическим» телом Галактики, в основном ее диском.

Как уже говорилось выше, подсчет молекулярного газа показал, что в плоскости Галактики пространственная плотность межзвездной среды не уступает плотности звездного населения, причем эта газопылевая среда распределена еще более неоднородно, чем звезды, — она сконцентрирована в немногочисленных, но очень массивных облаках.

Оптические исследования Галактики, естественно, не могли привести к подобному открытию. Темная полоса поглощающей материи вдоль Млечного Пути кажется одинаково лишенной звезд и в том случае, когда поглощение света в данном направлении составляет 10^m и когда оно превышает 100^m . Поиски плотных облаков на фоне этой полосы подобны поискам черной кошки в темной комнате. Иное дело — радиоастрономические методы, которые основываются не на отсутствии излучения (в данном случае оптического излучения звезд), а на его наличии (линия CO). Радиокарта на рис. 3 показывает, как четко выделяются места скопления молекулярного газа. Однако и эта карта имеет серьезный недостаток: поскольку Солнце находится в галактической плоскости, мы не можем разделить облака, расположенные на разном расстоянии от Солнца, но в одном и том же направлении.

Вспомните, как летним днем в небе над нами плывут кучевые облака. Глядя в зенит, перпендикулярно слою облаков, мы легко различаем отдельные облака, поскольку видим промежутки между ними. Но если перевести взгляд ближе к горизонту, почти параллельно слою облаков, то все они сольются в единую массу и в

проекции друг на друга станут почти неразличимыми по отдельности.

Такая же картина на наших радиокάρтах. Вот если бы подняться и посмотреть на плоскость Галактики сверху! Но этой возможности у нас пока нет. Однако есть другая возможность, о которой уже упоминалось: различие в лучевых скоростях облаков позволяет по доплеровскому смещению линий разделить отдельные газовые конденсации, лежащие на луче зрения (см. рис. 4). Конечно, этот метод не всегда однозначен и совершенно не работает в направлениях, близких к центру и антицентру Галактики. Но все же во многих случаях лучевая скорость позволяет определить расстояние до облака, а значит, играет роль третьей пространственной координаты.

После 1980 г. излучение молекулы CO стали исследовать с гораздо лучшим угловым разрешением. Например, в обзоре 1981—1982 гг. Д. Сандерса, П. Соломона и Н. Сквилля*, проведенном на Объединенной радиоастрономической обсерватории пяти американских колледжей, использовалась антенна диаметром 14 м, имеющая на волне 2,6 мм угловое разрешение 47". В полосе шириной 2° и длиной 82° вдоль Млечного Пути было получено 40 тыс. спектров излучения молекулы CO. Это позволило создать не только двухмерные (в проекции на небо), но и квазиобъемные карты отдельных ГМО и их групп.

Пример перехода от двухмерного представления облаков к трехмерному мы имеем на рис. 7 и 8**. Если на рис. 7 замкнутые линии объединяют на плоскости точки с одинаковой яркостной температурой, то на рис. 8 это уже не линии, а замкнутые поверхности. Точнее говоря, это одна сложная поверхность, объединяющая точки с температурой $T=4$ К. Выбор этого значения температуры достаточно условен — можно было выбрать $T=3$ К или 5, 6, 7 К. В этом случае мы увидели бы очертания соответственно менее плотных, наружных, или более плотных, внутренних, частей облаков.

* См.: Sanders D. B., Solomon P. M., Scoville N. Z. *Astrophys. J.* — 1984. — V. 276. — P. 182.

** См.: Solomon P. M., Rivolo A. R. *Molecular clouds in the Galaxy* / In: *The Galaxy*. Ed's G. Gilmore, B. Carswell. D. Reidel Publ. Co.: Dordrecht, 1987.

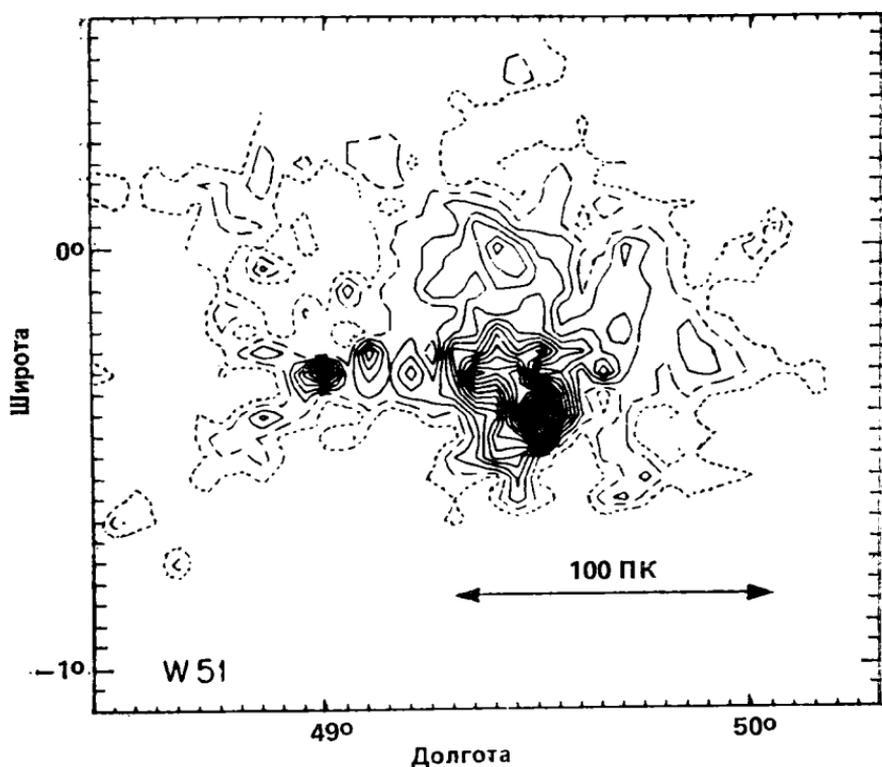


Рис. 7. Двухмерная (в проекции на небесную сферу) радиокарта излучения молекул CO от ГМО, с которым связана область звездообразования W51

Таким образом, с точки зрения радиоастрономии, межзвездное облако — это замкнутая область равной антенной температуры в пространстве $\{b, l, v\}$, т. е. в трехмерном пространстве, координатами которого являются галактическая широта (b) и долгота (l), а роль третьей координаты, эквивалентной расстоянию от наблюдателя, играет лучевая скорость (v).

Хотя на рис. 8 трехмерная поверхность изображена на плоскости (поскольку типография издательства «Знание» пока не имеет возможности изготавливать голографические иллюстрации), при желании можно рассмотреть ее в нескольких ракурсах (например, по-

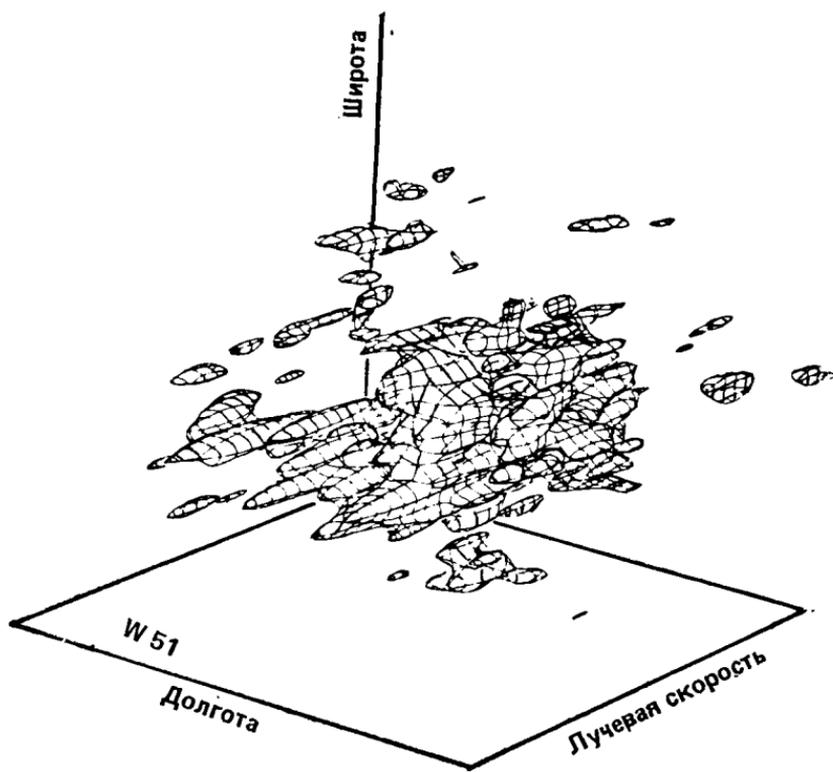


Рис. 8. Трехмерное перспективное изображение ГМО в окрестности W51. Как граница облака использована поверхность равной яркостной температуры $T=4$ К

следовательным поворотом на экране ЭВМ) и составить полное представление о поверхности облака.

Ясно, что рис. 7 и 8 не исключают, а дополняют друг друга. Двухмерное изображение позволяет «заглянуть» в глубь облака, но дает весьма смутное представление о его форме и даже о количестве облаков, лежащих на луче зрения. Трехмерное представление содержит значительно больше информации о топологии облака, но не позволяет одновременно изобразить внешние и внутренние его области (во всяком случае, без использования цвета). Есть у него и еще один недостаток: обратите внимание на сигарообразную форму отдельных конденсаций облака. Они возникли на изображении по

той причине, что вещество облака движется не только под действием гравитационного поля Галактики, но ощущает также притяжение других частей облака и давление окружающего газа. Любое отклонение от точного кругового движения по галактической орбите заставляет точки поверхности на рис. 8 перемещаться по координате v . Поэтому на рисунке многие части облака оказались вытянуты вдоль этой координаты: так проявило себя хаотическое движение газа внутри них.

ПЕРЕПИСЬ ОБЛАКОВ

— Мне кажется маловероятным, что это облако единственное в своем роде. Природа ничего не изготавливает в одном экземпляре. Поэтому допустим, что нашу Галактику населяет множество таких зверей. Тогда естественно предположить наличие связи между ними.

Полный подсчет молекулярных облаков в Галактике до сих пор не произведен. Точно так же, как не произведен полный подсчет звезд и других галактических объектов. Однако усилиями нескольких групп радиоастрономов уже описаны достаточно представительные выборки облаков, наблюдаемых, как правило, из Северного полушария, где по традиции больше научных инструментов и ученых.

К сожалению, у радиоастрономов нет панорамных приемников излучения, подобных фотопластинке или ПЗС-матрице у оптических телескопов. В радиодиапазоне построение изображения происходит последовательно — точка за точкой. Поэтому чем выше разрешающая способность инструмента, тем больше времени ему требуется для изучения данной области неба. Например, в начале 80-х годов группа радиоастрономов фирмы «Белл» (США) начала обзор Галактики в линиях CO с помощью антенны диаметром 7 м с угловым разрешением около $2'$ и разрешением по лучевой скорости $0,7$ км/с. Чувствительность радиотелескопа такова, что в любой области Галактики он замечает облака массой более $10^3 M_{\odot}$. Для наблюдений в основном используются холодные ясные зимние дни, когда в атмосфере мало паров воды, поглощающих миллиметровое радиоизлучение. В такой день удается получить запись

около 2000 спектров излучения молекулы СО, т. е. исследовать 2000 точек на небе. В процессе полного обзора предполагается получить четверть миллиона спектров (в линиях разных изотопических аналогов молекулы СО). Для этого потребуется около десяти лет наблюдений.

Наиболее полно изучена область Млечного Пути в интервале долгот $10^\circ \leq l \leq 80^\circ$. Найденные здесь характеристики молекулярных облаков считаются типичными для всей Галактики. Встречаются молекулярные облака с самой разной массой: от единиц до миллионов масс Солнца. Но сильнее всего поразили воображение астрономов облака массой 10^5 — $10^6 M_\odot$; они-то и получили название гигантских. Правда, пока специалисты не договорились, считать ли нижней границей массы ГМО значение $10^5 M_\odot$ или $5 \cdot 10^4 M_\odot$. Думается, что точного определения здесь и не требуется — ввиду неопределенности измерения массы и условности любой классификации.

Основные характеристики ГМО как объектов и характеристики их популяции в целом приведены в табл. 4 и 5. Первая таблица дает нам «портрет» типичного

Таблица 4

Индивидуальные характеристики ГМО

Характеристика	Среднее значение	Диапазон значений
Масса, M_\odot	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^6$
Радиус, пк	20	10—50
Средняя плотность, $\text{H}_2/\text{см}^3$	300	10^2 — 10^3
Температура, К	10	5—30
Гравитационная энергия связи GM^2/R , эрг	10^{51}	10^{50} — 10^{52}
Энергия диссоциации молекулярного водорода, эрг	$2 \cdot 10^{52}$	$3 \cdot 10^{51}$ — 10^{53}
Скорость ухода с поверхности $\sqrt{2GM/R}$, км/с	15	10—20
Скорость турбулентного движения газа внутри облака, км/с	9	2—17
Характерное время жизни, лет	10^8	10^7 — 10^9
Индукция магнитного поля, Гс	$5 \cdot 10^{-5}$	$(2-10) \cdot 10^{-5}$

**Характеристики популяции молекулярных
облаков Галактики**

Полная масса ($H_2 + He$)		$3 \cdot 10^9 M_{\odot}$
Количество облаков	$\left\{ \begin{array}{l} \text{полное} \\ M \geq 10^5 M_{\odot} \\ M \geq 10^6 M_{\odot} \end{array} \right.$	20 000
		6 000
		1 000
Спектр масс dN/dM		$\sim M^{-3/2}$
Отношение масс теплой и холодной подсистем		1/3
Отношение потоков в линии CO от теплой и холодной подсистем		1/1
Хаотическая скорость пространственного движения облаков, км/с		10
Средний промежуток времени между взаимными столкновениями облаков, лет		10^9

ГМО и диапазон изменения его характеристик от облака к облаку. Вторая содержит результаты «переписи» облаков. Поясним, что спектром масс (или функцией масс) объектов называется их распределение по значению собственной массы. Величина функции dN/dM есть не что иное, как количество облаков массой от M до $M+dM$. Наблюдательная функция масс представлена на рис. 9. В той области масс, где подсчет был достаточно полным, функцию масс облаков можно представить в виде степенной функции $dN/dM = AM^k$, где A — постоянная, зависящая от полного числа облаков, k — показатель степени. Из наблюдений следует, что $k = -1,55 \pm 0,10$, но для простоты обычно считают, что $k = -3/2$.

Как известно, спектр масс звезд Галактики тоже хорошо описывается степенной функцией, но с $k = -2,4$. С уменьшением массы звезд их количество стремительно увеличивается, так что большая часть вещества Галактики заключена в маломассивных звездах. Спектр масс ГМО имеет не такой крутой наклон, поэтому большая часть газа содержится в немногочисленных наиболее массивных облаках. Так, 90% молекулярного газа заключено в облаках с $M \geq 10^5 M_{\odot}$ (их в Галактике около 6000), а 30% этого газа — в облаках с $M \geq 10^6 M_{\odot}$ (их всего около 1000). Функция масс — одна из важнейших характеристик ГМО. Любая теория, стремящаяся описать их происхождение и эволюцию, должна дать объяснение наблюдательной функции масс.

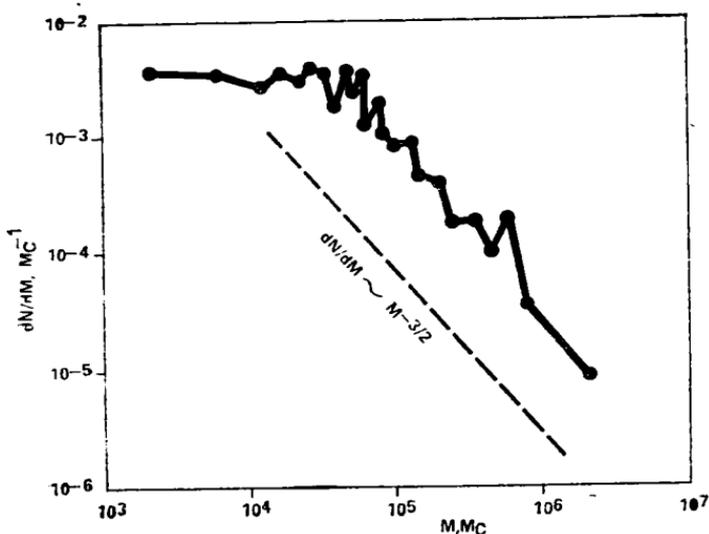


Рис. 9. Наблюдаемый спектр масс молекулярных облаков (сплошная кривая). Наблюдения полны в области $M \geq 5 \cdot 10^4 M_{\odot}$, где они хорошо аппроксимируются степенной функцией с показателем $k = -3/2$ (пунктирная линия). В области меньших масс наблюдения не полны, т. е. в процессе подсчета учтены не все облака

С момента открытия ГМО живейший интерес у астрономов был связан с вопросом: проявляется ли в пространственном распределении ГМО спиральная структура Галактики? Вообще ситуация со спиральным узором Галактики сейчас довольно пикантная: никто из астрономов не сомневается, что наша звездная система спиральная, но вы нигде не найдете изображения спиральных рукавов Галактики или даже точного указания на их количество. Впрочем, может быть, найдете и, вероятно, не одно. Но попытайтесь сравнить их между собой, и вам все станет ясно. Лишь вблизи Солнца (на расстоянии 2—3 кпк) с трудом удастся проследить обрывки нескольких рукавов, а на большом расстоянии картина становится неоднозначной: сколько методов исследования, столько рисунков спирального узора, мало похожих один на другой.

Конечно, нелегко восстановить узор звездного диска, если вы находитесь внутри него, а пространство вокруг вас заполнено непрозрачными облаками. Оптические ме-

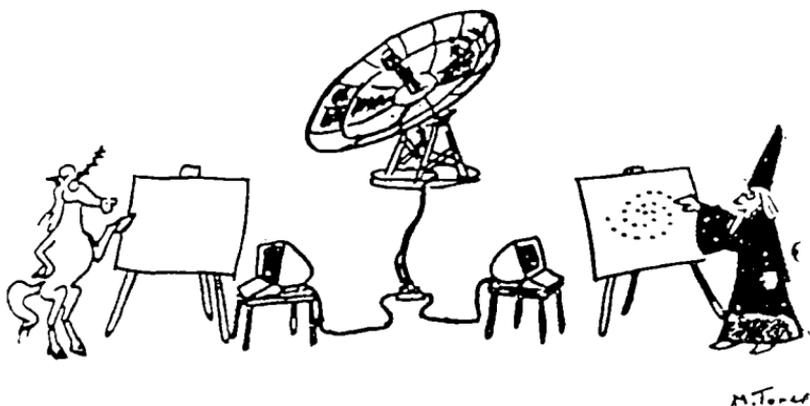


Рис. 10. Так шотландский астроном М. Тонер проиллюстрировал ситуацию, сложившуюся при исследовании распределения ГМО по диску Галактики: казалось бы, одинаковые наблюдательные данные можно интерпретировать совсем по-разному — одни исследователи видят спиральный узор, а другие нет

тоды при этом перестают работать на расстоянии нескольких килопарсек вдоль галактической плоскости. Надежды на наблюдение атомарного водорода в линии 21 см тоже оправдались не полностью, ибо он относительно подвижен, участвует в сложных некруговых движениях, а это мешает точному определению расстояния.

Обнаружение холодных и плотных молекулярных облаков, естественно, привлекло внимание исследователей спиральной структуры Галактики. В самом деле, у большинства других спиральных систем темные облака сконцентрированы вдоль внутренней кромки рукавов и резко очерчивают спиральный узор. Вероятно, этого же следует ожидать и в Галактике. Те самые облака, которые мешают наблюдениям в оптическом диапазоне, наверное, могли бы помочь радиоастрономам проследить спиральные ветви Галактики. Что же оказалось?

В начале 80-х годов ситуация сложилась драматическая, а может быть, курьезная: одни радиоастрономы утверждали, что с помощью ГМО хорошо прослеживается спиральный узор, а другие — что облака в диске Галактики распределены равномерно и не замечают спиральных рукавов (рис. 10). Проблема разрешилась в

середине 80-х годов, когда наблюдения на более чувствительных инструментах показали, что существуют два типа (или, как говорят, две подсистемы) ГМО — теплая и холодная. В качестве пограничного значения принято считать кинетическую температуру газа $T_{кин} = 10$ К. У холодных облаков $T_{кин} = 5-10$ К, а у теплых — $11-30$ К.

Холодные облака имеют относительно меньшую массу и заполняют весь диск Галактики — как межрукавное пространство, так и рукава. Поэтому подсистему холодных облаков называют населением диска. Процесс рождения звезд в недрах этих облаков (а ГМО, как известно, являются главными «роддомами» для звезд) если и протекает, то очень вяло.

Теплые облака, напротив, тесно ассоциируются в пространстве с областями III, с горячими O- и B-звездами, с остатками вспышек сверхновых, т. е. с очагами звездообразования, а, по существу, сами являются эти-

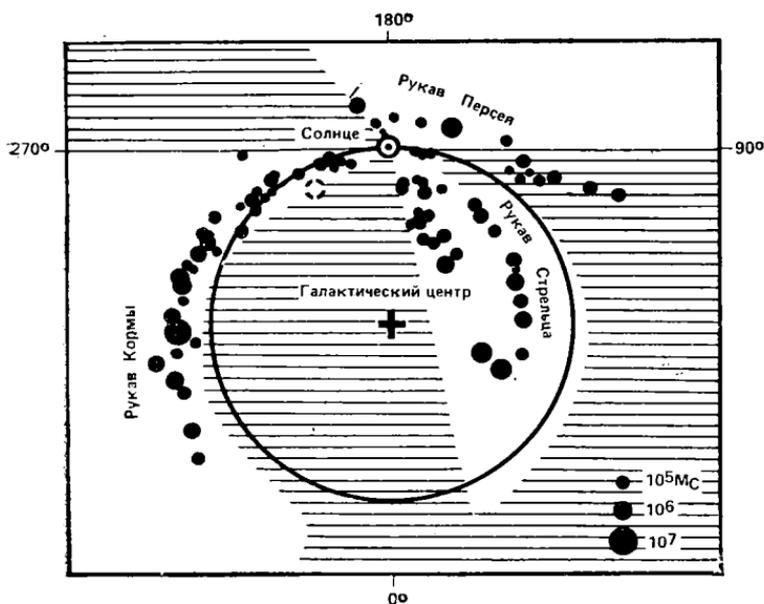


Рис. 11. Распределение на плоскости Галактики крупных ГМО; заштрихованы ненаблюдавшиеся или плохо изученные области

ми очагами (поэтому они и теплые!). Так же, как молодые звезды, теплые ГМО распределены по диску Галактики очень неравномерно: есть все основания считать, что и те и другие сконцентрированы в спиральных рукавах. Поэтому теплые облака относят к населению рукавов.

Если судьба теплых облаков кажется нам ясной — они должны разрушаться в процессе звездообразования, — то о судьбе холодных облаков нужно задуматься. Двигаясь по галактическим орбитам, они опережают вращение спирального узора, и поэтому время от времени облака должны догонять спиральные рукава и попадать в них. Часть из них при этом должна по-прежнему оставаться холодной, но другая часть должна переходить в разряд теплых облаков с соответствующим увеличением массы и включением процесса звездообразования. О том, как развивается этот процесс, мы поговорим позже, а сейчас вернемся к вопросу о спиральной структуре.

ГАЗОВЫЕ ОБЛАКА И СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ

— Такое впечатление, будто облако летит... как пуля в мишень

Приступая к анализу движения вещества в Галактике, теоретик должен решить, какой формализм он будет использовать в каждом конкретном случае. Поскольку звезды очень малы по сравнению с Галактикой и практически никогда не сталкиваются друг с другом, для описания их движения используются уравнения динамики материальной точки: свободная звезда движется под действием гравитационного поля Галактики. Те же уравнения годятся для описания движения звездных скоплений. А как быть с межзвездной средой, заполняющей весь объем Галактики и имеющей крайне неоднородную структуру? В рамках какого формализма описывать ее движение? Этот вопрос особенно важен для разгадки природы спиральных рукавов.

До 1975 г. исследователи спиральной структуры Галактики могли считать межзвездную среду газом и применять для анализа ее движения уравнения газодинамики. Действительно, в те годы считалось, что основная часть диффузного вещества сосредоточена в облаках НІ

массой от 1 до $10^3 M_{\odot}$, имеющих средний радиус 5 пк и распределенных в пространстве на взаимном расстоянии порядка 30 пк. Двигаясь с хаотической скоростью около 10 км/с, облака испытывают взаимные столкновения через промежуток времени порядка 10^7 лет, пролетая между столкновениями около 150 пк. Последнюю величину физики называют длиной свободного пробега и справедливо считают, что если она много меньше, чем характерный масштаб описываемых явлений, то для анализа движения всей совокупности взаимодействующих частиц (в нашем случае — облаков) можно применять уравнения газодинамики, т. е. считать вещество непрерывной средой. Поскольку толщина спиральных рукавов составляет 1—2 кпк, для облаков HI это условие выполняется. Поэтому в теориях спиральной структуры, развитых в 70-е годы, при описании межзвездной среды использовался газодинамический подход*

После обнаружения ГМО выяснилось, что основная масса межзвездного вещества (во всяком случае, внутри орбиты Солнца) заключена в компактных и массивных облаках, которые практически не взаимодействуют друг с другом и с межоблачной средой. Действительно, характерное время лобового столкновения массивных ГМО с себе подобными составляет около 10^9 лет, что, по-видимому, превышает время их жизни. За это время в сопутствующей системе отсчета (т. е. относительно окружающих облаков и звезд диска) ГМО успевает пролететь несколько килопарсек — это и есть его длина свободного пробега. Относительно спирального узора Галактики, который внутри орбиты Солнца отстает от вращения галактического диска, ГМО успевает свободно пролететь десятки килопарсек и несколько раз пересечь спиральные рукава. Конечно, если это позволит ему время собственной жизни.

Следовательно, в динамическом отношении ГМО ведут себя как материальные точки. Значит, их распределение в диске Галактики должно быть подобно распределению звезд? Но ведь из наблюдений известно, что основная масса звезд слабо концентрируется к спираль-

* См.: Ефремов Ю. Н., Корчагин В. И., Марочник Л. С., Сучков А. А. Современные представления о природе спиральной структуры галактик / УФН. — 1989. — Т. 157. — Вып. 4.

ным рукавам, в то время как межзвездное вещество явно предпочитает рукава. В чем же тут дело?

Причин несколько. Спиральный рукав обладает большим избыточным притяжением по сравнению с межрукавным пространством: его гравитационный потенциал на 5—10% больше потенциала соседних областей диска. Поэтому быстро движущиеся звезды почти не замечают рукавов, а более спокойная газовая среда концентрируется в них, как в потенциальной яме. При попадании в эту яму скорость элементов газа изменяется на $\Delta v \approx v_{\text{круг}} \cdot (5-10) \% = 220 \text{ км/с} \cdot (0,05-0,1) = 10-22 \text{ км/с}$. Это больше, чем скорость звука в межзвездном газе ($\lesssim 10 \text{ км/с}$), поэтому такие возмущения скорости вызывают ударную волну, уплотняющую газ в десятки раз.

ГМО в определенном смысле ведут себя как частицы газа (только очень массивные!). Скорость их хаотического движения в спиральном рукаве увеличивается, они чаще сталкиваются друг с другом, сильнее взаимодействуют с окружающим уплотненным газом и замороженным в него магнитным полем. В результате плотность числа ГМО в спиральных рукавах также увеличивается в 2—3 раза (см. рис. 4 в брошюре: Ламзин С. А., Сурдин В. Г. Что такое протозвезды? — М.: Знание, 1988).

Но не менее важным является и то, что при попадании в спиральный рукав ГМО включаются в процесс звездообразования, или, точнее, процесс звездообразования включается в них самих. Происходит это потому, что взаимные соударения, во-первых, вызывают слипание ГМО и рост их массы, а во-вторых, уплотняют в них вещество.

Рождение массивных звезд в облаке увеличивает его температуру — именно поэтому появляется «теплая» популяция ГМО, сосредоточенная в спиральных рукавах. Если звездообразование началось на краю облака — а при столкновениях, вероятно, так и бывает, — то там образуется область НII, легко наблюдаемая в оптическом диапазоне. Все это вместе приводит к заметному выделению спиральных рукавов на диске Галактики, несмотря на то, что в самих рукавах вещества не намного больше, чем в соседних областях диска.

Более подробно о процессе звездообразования в спи-

ральных рукавах и о его связи с ГМО можно прочитать в брошюре Ю. Н. Ефремова «Новый взгляд на Галактику» (М.: Знание, 1989). В ней приводятся многонаблюдательных примеров тех физических процессов, о которых говорится в нашей брошюре.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ГМО

— Если вы внимательно посмотрите на такие очень большие облака, то обнаружите, что они состоят из огромного числа гораздо более мелких.

Чем детальнее исследуются индивидуальные ГМО, тем более сложной выглядит их структура. Внутри облака наблюдается широкий диапазон физических условий и разнообразный химический состав. Довольно условная классификация структурных уровней в облаке и соответствующих им значений физических параметров приведена в табл. 6.

Обычно более мелкие и плотные конденсации вложены в более крупные и разреженные. Вообще говоря, такая «матрешечная» структура характерна для самогравитирующих объектов — звезд, планет. В них она формируется под влиянием силы тяжести: с одной стороны, под действием архимедовой силы плотное вещество опускается вниз, а менее плотное всплывает; с другой стороны, то, что находится ниже, ощущает большее давление вышележащих слоев и уплотняется. Так возникает «матрешечная» структура.

Но в межзвездной среде все проще. Плотность вещества, а значит, и гравитация в ней обычно невелики, а главную роль играет тепловое давление газа. Если в каком-то месте оно возрастает (например, в облаке сформировалась звезда и нагрела его), то газ расширяется и давление падает. Поэтому горячие плотные облака — эмиссионные туманности — существуют недолго. Почти во всем объеме межзвездной среды давление постоянно, т. е. постоянно произведение плотности газа на его температуру: $P \sim T \cdot n = 2000 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$. В диффузных облаках газ плотнее и холоднее, чем в межоблачной среде, но давление у них одинаковое, и поэтому они пребывают в относительном равновесии.

Формально давление газа в ГМО также близко к $2000 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$, и может показаться, что ГМО, как и обыч-

Таблица 6

Структурные и физические параметры ГМО

Физический параметр	Структурный уровень					оболочка HI
	малые уплотнения	мелкомасштабные конденсации	крупномасштабные конденсации	основное тело		
Масса, M_{\odot}	1	10^2-10^3	10^4	10^5-10^6	10^5	10^5
Радиус, пк	0,1	1	1-10	10-100	50	50
Температура, К	20	20	20	10	50	50
Плотность, H_2/cm^3	10^4-10^5	10^4	$5 \cdot 10^3$	300	100 H/cm^3	$100 H/cm^3$
Гравитационная энергия связи, эрг	10^{42}	$10^{45}-10^{47}$	$10^{46}-10^{41}$	$10^{50}-10^{51}$	10^{49}	10^{49}
Энергия диссоциации $H_2 \rightarrow 2H$, эрг	10^{47}	$10^{49}-10^{50}$	10^{51}	$10^{52}-10^{53}$	—	—
Время свободного сжатия, лет	$(1-4) \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$

Типы равновесия

Объект	Противодействующие силы		Причина нарушения равновесия, продолжительность равновесного состояния
	сжатие	расширение	
Двойная звезда, планетная система, спиральная галактика	Гравитация	Центробежная сила как следствие регулярного вращения	Коллапс вследствие излучения гравитационных волн, диссипация (выброс членов), 10^8 — 10^{16} лет
Нормальная звезда	Гравитация	Газовое давление	Исчерпание термоядерного топлива, 10^6 — 10^{12} лет
Белый карлик, нейтронная звезда	Гравитация	Давление вырожденного газа	Аккреция внешней массы, продолжительность жизни зависит от темпа аккреции (в тесной двойной системе обычно 10^8 — 10^{11} лет)
Планета	Гравитация	Электромагнитные силы	Практически вечное равновесие
Звездное скопление, эллиптическая галактика	Гравитация	Центробежная сила как следствие хаотического движения звезд	Диссипация (выброс звезд вследствие взаимных возмущений движения), скопления: 10^8 — 10^{12} лет галактики: 10^{13} — 10^{16} лет
Облако атомарного водорода (HI)	Внешнее газовое давление, гравитация	Внутреннее газовое давление, вращение, магнитное поле	Взаимные столкновения: коагуляция (слипание), частичный разлет вещества, 10^7 лет
Гигантское молекулярное облако	Гравитация, внешнее газовое давление	Центробежная сила как следствие сверхзвукового движения крупномасштабных потоков газа	Диссипация (рассеяние) кинетической энергии потоков, переход ее в тепловую энергию газа, остывание вследствие ИК-излучения пылинок, 10^7 лет

ные маломассивные облака, находятся в равновесии с окружающей их средой. Но это не так. Во-первых, даже тепловое давление газа внутри ГМО в несколько раз превосходит давление межоблачной среды (нужно учитывать, что молекулярный вес вещества в облаке вдвое больше, чем вне его). Однако значительно важнее то, что внутри ГМО наблюдаются бурные движения газа со сверхзвуковыми скоростями: в то время как скорость звука при температуре $T=10$ К составляет 0,2 км/с, потоки газа в облаке движутся со скоростями 2—10 км/с. Динамическое давление крупномасштабных потоков значительно превышает тепловое давление газа.

Окружающий межоблачный газ не способен был бы удерживать ГМО от расширения, и за несколько миллионов лет оно разлетелось бы, если бы не сила собственной гравитации, которая удерживает облако в равновесии. В этом смысле ГМО уникальны: нам не известны другие объекты, в которых гравитационные силы уравновешены крупномасштабным хаотическим движением вещества (табл. 7). Вероятно, у некоторых ГМО заметное противодействие гравитации оказывает также вращение облака и давление магнитного поля, которое в них усилено по сравнению с окружающей средой.

Как известно, при дозвуковых течениях кинетическая энергия потока рассеивается постепенно вследствие молекулярной вязкости. Но чем больше скорость, тем важнее становятся крупномасштабные возмущения, турбулентность, тем быстрее разрушается поток. При сверхзвуковых течениях взаимодействие потоков порождает ударные волны, в которых их кинетическая энергия моментально «разменивается» в тепловую. Без постоянной «поддержки» сверхзвуковые потоки быстро затухают.

Источником крупномасштабных газовых потоков в ГМО могут быть как взаимные столкновения облаков, так и активность молодых звезд, формирующихся в них. Наблюдения показывают, что нередко протозвезды и молодые звезды выбрасывают мощный звездный ветер и газовые струи. В принципе их энергии достаточно для поддержания хаотических движений газа в облаке в течение десятка миллионов лет.

ЯДРА ГМО

— Я тоже хотел бы задать вопрос, — сказал Паркинсон. — Почему вы все время говорите об этом звере в единственном числе? Почему в Облаке не может быть много маленьких зверей?

Особый интерес представляет исследование ядер ГМО: происходящие в них процессы тесно связаны с формированием звезд. Группа американских радиоастрономов исследовала в 1987 г. ядра двух массивных ГМО с высоким угловым разрешением (2—6") в линиях излучения различных молекул (HCO^+ , HCN , SiO и др.), а также в радиорекомбинационных линиях водорода и в континууме. Одно из этих облаков связано с яркой III-областью W 51 в спиральном рукаве Стрельца. В этом облаке плотное ядро имеет диаметр 1,4 пк и массу $5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Ядро вращается с угловой скоростью, существенно превосходящей скорость облака, что указывает на недавнее сжатие ядра с сохранением момента вращения. Не исключено, что его сжатие еще продолжается. Во всяком случае процесс звездообразования в этом ядре пока не заметен: ядро не проявляет высокой ИК-светимости и прочих признаков звездообразования.

Подобная картина наблюдается и в облаке, связанном с III-областью W 58. Размер ядра у этого облака около 1 пк, масса $\sim 10^4 M_{\odot}$, а температура молекулярного газа около 40 К. Как и ядра других облаков, это ядро быстро вращается: скорость на краю достигает 6 км/с, а направление совпадает с направлением вращения Галактики. Пока сжимающееся облако было полупрозрачным и частично ионизованным, межзвездное магнитное поле было «вморожено» в него и как резиновый жгут связывало между собой почти неподвижную межзвездную среду и вращающееся облако, тормозя тем самым его вращение.

Но то, что угловая скорость ядра сейчас в 300 раз больше, чем у межзвездной среды в Галактике, говорит о том, что его сжатие — по крайней мере на заключительном этапе — происходило с сохранением момента вращения и не сдерживалось магнитным полем. В какой же момент поле «отпустило» центральную часть облака?

Используя закон сохранения момента, легко рассчитать, что, когда облако вращалось синхронно с газовым диском Галактики, его размер был около 20 пк, а плотность — примерно 100 см^{-3} . Как раз при таких параметрах, сжимаясь, облако стало оптически непрозрачным (ведь при сжатии концентрация пыли увеличивается), оптическое излучение окружающих звезд перестало проникать в облако, газ стал быстро остывать, и имевшиеся в нем ионы и электроны рекомбинировали. С нейтральным же газом магнитное поле не взаимодействует. Облако, как говорят, оторвалось от магнитного поля, а вместе с ним и от медленно вращающегося окружающего газа и стало сжиматься самостоятельно, увеличивая свою угловую скорость. Сейчас, в момент наблюдения, ядро облака, по-видимому, стабилизировалось: центробежная сила уравнивает гравитацию и сжатие прекратилось. Заметная ИК-светимость ядра говорит о том, что процесс звездообразования там уже начался.

Значительно дальше проэволюционировало в этом смысле ядро другого массивного ГМО, связанного с III-областью W 49. Это облако находится на расстоянии 14 кпк от Солнца, но методами радиоспектроскопии динамику его ядра удалось изучить достаточно подробно. При радиусе около 1 пк ядро так же, как в случае W 51, имеет массу $5 \cdot 10^4 M_{\odot}$. Заметим, что массы этих ядер определялись надежным динамическим методом, основанным на измеренной скорости их вращения: $M \approx Rv^2/G$. Этот метод учитывает гравитирующую массу в любой форме — не только в виде газа, но и в виде звезд. А звезд, судя по всему, там немало.

Облако W 49 при полной массе $\sim 10^6 M_{\odot}$ имеет ИК-светимость $\sim 10^7 L_{\odot}$, что указывает на активно протекающее в нем звездообразование. При этом почти все индикаторы звездообразования (H_2O -мазеры, биполярные потоки, облака ионизованного газа) сосредоточены в области ядра. По излучению в радиоконтинууме обнаружено 40 отдельных плотных конденсаций ионизованного газа, в каждой из которых, вероятно, находится недавно сформировавшаяся O-звезда. Дюжина или больше таких звезд образует кольцевую структуру по периферии ядра. Поскольку такая структура динамически неустойчива и вряд ли может существовать более одного оборота, образующие ее звезды должны были

сформироваться за время около 1 млн. лет ($\approx R/v$). Можно полагать, что, кроме массивных O-звезд в этой области, образовались и менее массивные звезды, так что в ядре W 49, вероятно, находится молодое звездное скопление с полной массой $\sim 10^4 M_{\odot}$.

Исследовавшие это облако американские специалисты считают, что резкий коллапс ядра и вызванное этим одновременное рождение большого количества звезд могут быть связаны с тем, что препятствовавшее его сжатию давление магнитного поля резко ослабло в результате диссипации этого поля, когда электрическая проводимость охлаждающегося газа достигла критически низкого значения.

Как правило, в центральной части ГМО находится не одно, а несколько уплотнений, которые мы называем ядрами. Это не удивительно: облака нередко имеют сложную форму, далекую от шарообразной, и уже поэтому нельзя ожидать, что гравитация будет выделять только одно ядро. К тому же формирование локальных уплотнений может происходить при столкновении сверхзвуковых потоков газа, которые движутся во всем объеме облака.

Но особенно интересный случай представляют кратные ядра, происхождение которых связывают с процессом гравитационной фрагментации. Расстояние между ядрами того же порядка, что и их собственный размер ($\lesssim 1$ пк), поэтому вполне вероятно, что это фрагменты некогда единого ядра, разделившегося при сжатии под влиянием центробежных сил и гравитационной неустойчивости.

В табл. 8 приведены параметры некоторых двойных ядер по результатам наблюдений в далеком ИК- и субмиллиметровом диапазоне. Температура газа в ядрах 30—50 К, плотность молекулярного водорода 10^5 — $3 \cdot 10^6$ см $^{-3}$, а поглощение света достигает сотен звездных величин. Ядра в парах движутся друг относительно друга со скоростями 1,4—4,0 км/с. Возможно, что это взаимное орбитальное движение такое же, как у звезд в двойных системах.

Любопытно, что станет с такими ядрами, когда в них сформируются звездные скопления? Сохранят ли они свою гравитационную связь? Если звездообразование будет протекать достаточно эффективно и большая

часть газа превратится в звезды, то это вполне возможно: из двойных ядер рождаются двойные звездные скопления.

Астрономам известны некоторые случаи, когда скопления расположены очень близко друг к другу и имеют сходные параметры — возраст, массу, пространственное движение. Например, знаменитая пара рассеянных скоплений h и χ Персея. Большое количество таких пар обнаружено и в соседней галактике — в Большом Магеллановом Облаке. Как знать, может быть, эти пары скоплений родились в недрах одного ГМО.

Таблица 8

Параметры кратных ядер у некоторых ГМО

Облако	Размеры ядра, 10^{18} см	Масса ядра, M_{\odot}
IRC 4	1,5	650
W 3		
IRC 5	0,9	450
OMC	0,3	100
	0,3	100
S 255	2,1	350
	1,0	500

ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГМО

- Сколько же вам сейчас лет?
- Несколько больше пятисот миллионов.

В течение всей жизни ГМО в нем происходит химическая эволюция вещества, заметно изменяется его молекулярный состав. Сначала из простых элементов довольно быстро образуются примитивные молекулы, состоящие из 2—4 атомов (H_2 , CO, OH, NH_3 , H_2CO и др.). Молекулы водорода формируются в основном на поверхности межзвездных пылинок, играющих роль катализатора. Образование большинства других молекул происходит в результате газофазных реакций. Наиболее быстро идут реакции с участием ионизованных атомов и молекул, так как эффективность взаимодействия заряженных частиц с нейтральными в среднем на 4 по-

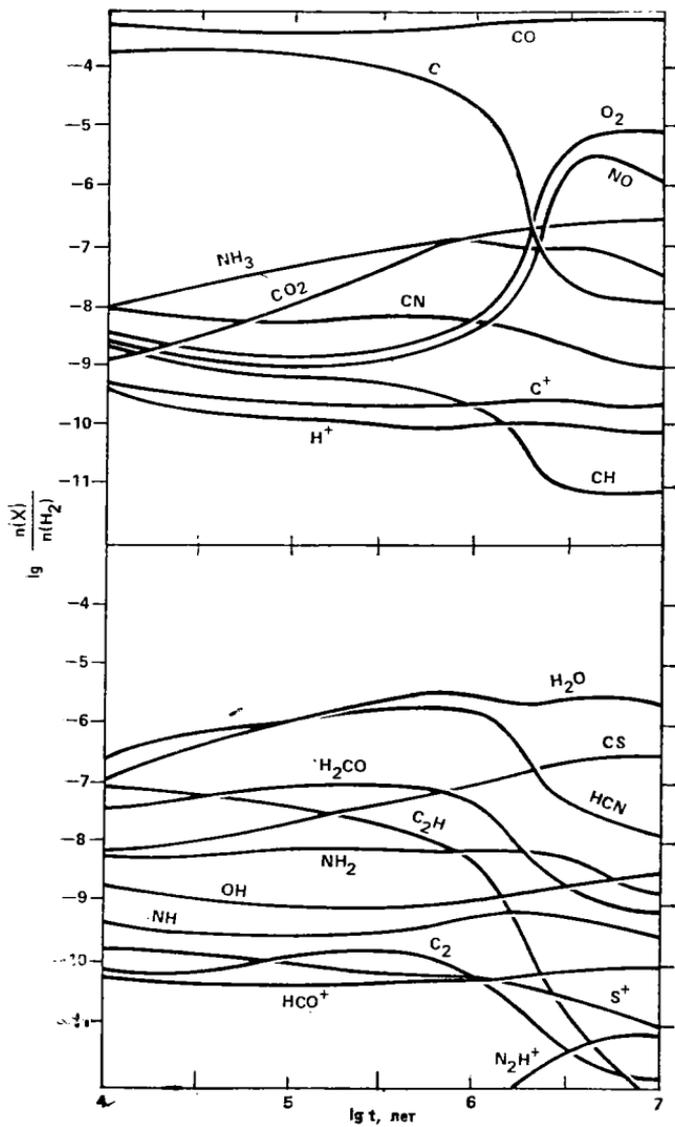
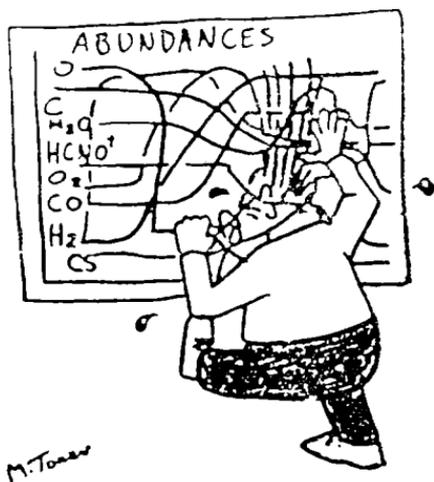


Рис. 12. Эволюция концентрации различных молекул (X) в облаке с постоянной плотностью $n_{\text{H}}=10^5 \text{ см}^{-3}$ и температурой $T=30 \text{ К}$. Расчет выполнен G. D. Watt (1984)



Interstellar Chemistry.

Рис. 13. М. Тонер считает, что астрономы легко могут запутаться в химических превращениях межзвездного вещества

рядка выше, чем нейтральных частиц с нейтральными.

Для возникновения сложных молекул, включающих в себя 10—13 атомов, требуются десятки миллионов лет, что сравнимо с временем жизни облака. Поэтому процесс формирования все более и более сложных молекул является своеобразными «химическими часами», отсчитывающими время истории молекулярного облака. Если в облаке наблюдаются радиолинии молекул разной степени сложности, то в принципе можно в рамках существующих моделей межзвездной химии оценить возраст этого облака.

Первые работы в этом направлении уже начаты. На рис. 12 показаны химические превращения в стационарном облаке высокой плотности. Концентрация всех элементов указана по отношению к концентрации молекулярного водорода, который составляет основную долю вещества облака. При подобных расчетах учитываются сотни химических реакций, ведущих к синтезу или рас-

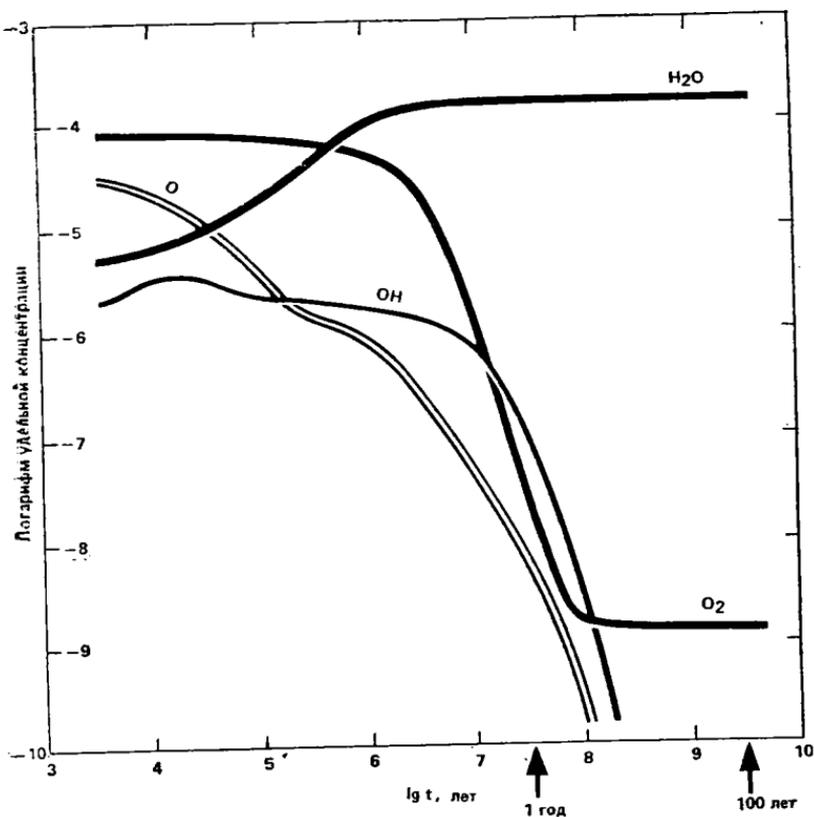


Рис. 14. Изменение концентрации некоторых молекул в облаке с начальной плотностью $n_H = 10^5 \text{ см}^{-3}$ после прохождения по нему в момент $t=0$ ударной волны со скоростью $v=10 \text{ км/с}$

паду десятков молекул. Непростой задачей оказывается отобразить результаты расчета на бумаге. Из-за тесноты линий рис. 12 разделен на две части. Смотрите, не запутайтесь!

А надежно ли работают «химические часы»? К сожалению, не очень: иногда они могут давать сбои. Например, сталкиваются облака, проходит сквозь них, разогревая газ, ударная волна и химический состав облака заметно изменяется. Последствия такого происшествия показаны на рис. 14. Непосредственно за фронтом ударной волны температура газа около 5000 К, но уже че-

рез 1 год газ в этом месте остывает до 2000 К, а через 100 лет — до 35 К. В основном это облако состоит из молекул H_2 , CO и атомов H и He, концентрация которых практически не меняется. Другие же простейшие молекулы, как мы видим, могут заметно изменить свою концентрацию.

ГМО И ГАММА-ЛУЧИ

— Вполне вероятно, — продолжал Марлоу, — что внутри Облака действуют очень сильные магнитные поля.

По результатам наблюдений со спутника Cos-B (1975—1982 гг.) было обнаружено, что распределение интенсивности гамма-излучения с энергией квантов $E \geq 50$ МэВ вдоль Млечного Пути совпадает с распределением излучения молекул CO (разумеется, в гамма-диапазоне предварительно вычитался вклад нескольких точечных источников, связанных с молодыми пульсарами и неотожествленными пока объектами). Низкое угловое разрешение аппаратуры спутника ($1-3^\circ$) не позволило исследовать распределение интенсивности гамма-излучения внутри индивидуальных ГМО, поскольку при характерном диаметре 50 пк и расстоянии 3 кпк их угловой размер не превышает 1° .

Однако уже в начале 80-х годов было ясно, что основной поток гамма-квантов из межзвездного пространства рождается внутри ГМО и может служить хорошим индикатором распределения и общего количества межзвездного вещества в Галактике, поскольку это излучение в диапазоне от 100 МэВ до 5 ГэВ без помех проходит сквозь всю Галактику и надежно регистрируется аппаратурой спутников. Основной механизм генерации гамма-излучения в условиях межзвездной среды — взаимодействие протонов космических лучей с ядрами атомов водорода независимо от того, в какой форме он находится: H_2 , HI, HII. Рождающийся при этом нестабильный π^0 -мезон распадается на два гамма-кванта: $p + p \rightarrow 2p + \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Значит, наблюдаемая яркость гамма-излучения зависит как от плотности межзвездной среды, так и от плотности космических лучей в данном направлении. Чтобы из наблюдений восстановить одну

из этих плотностей, необходимо иметь представление о распределении второй.

Если источники космических лучей в основном находятся в межоблачном пространстве, то неясно, как же космические лучи оказываются внутри облаков. Снаружи они проникнуть фактически не могут: их энергия рассеивается в тонком поверхностном слое за счет потерь на ионизацию холодного газа. К тому же более поздние наблюдения в гамма-диапазоне показали, что плотность космических лучей внутри некоторых облаков выше, чем снаружи. Следовательно, источники космических лучей находятся внутри облаков. Сейчас обсуждаются* три возможных механизма генерации космических лучей:

1) ускорение частиц на ударных фронтах оболочек сверхновых звезд или расширяющихся оболочек, созданных звездным ветром О- и В-звезд. Нет сомнения, что эти звезды часто находятся внутри или в непосредственной близости от ГМО;

2) возможно, что космические лучи низкой энергии, гибнущие в результате ионизационных потерь в оболочке ГМО, генерируют сходящийся к центру облака поток альвеновских волн. Эти волны могут эффективно ускорять частицы высокой энергии, которым не страшны ионизационные потери;

3) последняя гипотеза связывает ускорение космических лучей с турбулентностью нейтрального газа в облаке. Поскольку в ГМО поддерживается определенная степень ионизации (отношение плотности ионов к плотности нейтральных частиц $n_i/n_n \sim 10^{-5} - 10^{-8}$), то вместе с нейтральным газом в турбулентном движении участвует и ионизованный. Взаимодействие последнего с магнитным полем возбуждает магнитогидродинамические колебания, которые при существующих в облаках условиях могут ускорять заряженные частицы до энергии порядка 10 ГэВ. Этот механизм способен объяснить некоторые особенности гамма-излучения от ГМО и состава космических лучей у Земли**

* Гинзбург В. Л. Догель В. А. УФН. — 1989. — Т. 158. — Вып. 1.

** Догель В. А., Шаров Г. С. Письма Астрономический журнал. — 1988. — Т. 14. — С. 417.

РОЖДЕНИЕ И ГИБЕЛЬ ГМО

— Да. Размножение... происходит у нас совершенно иначе. Видите ли, если бы не несчастные случаи или непреодолимое желание уничтожить себя — также случается с нами иногда, как и с вами, — я мог бы жить бесконечно.

Вопрос о формировании ГМО до сих пор вызывает споры. Предложено несколько механизмов, каждый из которых, по-видимому, работает в своем диапазоне условий или на разных стадиях формирования облака. Упомянем некоторые из них:

1) коагуляция, т. е. слипание маленьких облаков при столкновении, приводящее к постепенному росту их массы;

2) гравитационная неустойчивость системы маленьких облаков, усиливающая коагуляцию и приводящая к рождению больших облаков значительно быстрее, чем последовательное слипание;

3) «сгребание» и уплотнение межоблачной среды и мелких облаков при расширении сверхоболочек, стимулированном активным выделением энергии группой молодых звезд. С этим процессом мы познакомимся подробнее, потому что он касается не только рождения новых ГМО, но и гибели старых, замыкая тем самым их эволюционный круг.

То, что гибель ГМО есть результат зарождения в них звезд, кажется сейчас достаточно очевидным — этот процесс непосредственно наблюдается*. Какова судьба ГМО, разрушенного в процессе звездообразования? Вблизи горячих звезд и сверхновых газ нагрет и образует области III. Но основная часть газа в облаке остается довольно холодной и пребывает в форме атомов и молекул. Однако собственная гравитация облака уже не может противостоять давлению разогретого звездами газа, и он расширяется. Если область звездообразования сформировалась на краю облака, то горячий газ прорывается в межоблачное пространство и свободно устремляется в него. Выброс из недр холодного облака струи горячего газа принято называть сейчас среди аст-

* См.: Ламзин С. А., Сурдин В. Г. Что такое прото-звезды? — М.: Знание, 1988.

рофизиков эффектом шампанского. Это явление действительно эффектно проявляет себя в наблюдениях.

Если область звездообразования сформировалась в районе центра ГМО, то расширение области НII приводит к довольно симметричному расширению всего облака: оно становится похожим на раздувающийся футбольный мяч. Расширяющаяся оболочка увеличивает свою массу за счет «сгребенного» ею межоблачного газа и, испытывая при этом сопротивление, понемногу тормозится. Такие оболочки напоминают остатки взрывов сверхновых звезд, но имеют существенно больший размер и массу: ведь энергия взрыва одной сверхновой $\sim 10^{51}$ эрг, а энерговыделение молодого звездного агрегата массой 10^3 — $10^4 M_{\odot}$ составляет 10^{52} — 10^{53} эрг.

В 1979 г. Хэйлес обнаружил в диске нашей Галактики несколько десятков гигантских оболочек из нейтрального водорода. Чтобы отличать их от остатков сверхновых, Хэйлес предложил называть эти структуры сверхоболочками. Подобные же структуры были обнаружены и в соседних галактиках; их иногда называют сверхпузырями или дырами.

Существуют теоретические модели сверхоболочек, позволяющие проследить их эволюцию. Это стало возможным лишь в последние годы благодаря появлению мощных ЭВМ, с помощью которых можно проводить трехмерные газодинамические расчеты. Дело в том, что толщина газового диска Галактики составляет 100—200 пк. Оболочки сверхновых обычно имеют радиус менее 100 пк и поэтому остаются сферическими. Сверхоболочки способны прорваться сквозь газовый диск в вертикальном направлении и выбросить наполняющий их горячий газ в гало Галактики. Ясно, что расчет такой сугубо-несферической структуры совсем не прост.

Оказывается, что на поздней стадии расширения сверхоболочки дифференциальное вращение галактического диска превращает ее в «сигару» (или «банан»). При этом уплотненный в оболочке газ собирается в основном на концах этой «сигары» и образует там два массивных молекулярных облака.

Таким образом, в процессе звездообразования осуществляется любопытная цикличность: ГМО рождает молодой звездный агрегат, который разрушает родительское облако, формирует расширяющуюся оболочку, которая в конце своей эволюции порождает новые ГМО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие новых объектов и явлений бывает либо неожиданным, либо долгожданным: сверхпроводимость была неожиданной, нейтрино — долгожданным, квазары — неожиданными, а пульсары (нейтронные звезды) — долгожданными. Как отнеслись астрономы к ГМО? По-моему, это долгожданное дитя наблюдательной астрономии, ибо для них сразу же нашлось множество ролей в незавершенной пока картине строения и эволюции Галактики.

Множество молекулярных соединений, обнаруженных в ГМО, позволило перекинуть мостик от простейшего химического состава звезд к сложному составу комет и планет. Это и очень важное звено в химической иерархии Вселенной.

С появлением на «сцене» ГМО стали ясны причины коллективного рождения звезд и даже звездных скоплений. Обнаруженный недавно факт, что молодые звездные скопления частично объединены в двойные системы и даже в более многочисленные группы, находит простое объяснение в иерархической структуре ГМО и комплексов ГМО.

Астрономам теперь ясны причины тех трудностей, которые приходится преодолевать при наблюдениях процесса звездообразования: пробиться вглубь ГМО, к месту формирования звезд, может далеко не каждый астрономический инструмент.

Наконец, есть надежда, что именно присутствие ГМО в диске Галактики позволит объяснить некоторые детали ее спиральной структуры, процесс разрушения звездных скоплений, вспышки звездообразования в центральной области Галактики и рекуррентную активность ее ядра.

Впрочем, как всегда, новый класс объектов рождает новые проблемы, и ГМО здесь не исключение. Нам еще предстоит понять механизмы их формирования и поддержания равновесия. Это интересная задача для астрономов и физиков на ближайшие годы.

ПОЛНОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 22 ИЮЛЯ 1990 г.**Д. ПОНОМАРЕВ:**

Это затмение будет видно по всему северу европейской и азиатской частей Советского Союза. Все фазы его можно будет увидеть на территории страны. Оно относится к серии затмений цикла саросов под номером 126. Следующее затмение этой серии будет видно как полное 1 августа 2008 г.

В последние десятилетия нашего века солнечные затмения редко видны на территории СССР. И хотя каждый год на Земле наблюдается от двух до пяти солнечных затмений, взаимное расположение Солнца, Земли и Луны сложилось для нас в этом отношении неблагоприятно. После полного затмения 31 июля 1981 г. и вплоть до 1990 г. в нашей стране не было полных солнечных затмений, а следующее можно будет наблюдать только 9 марта 1997 г. в районе Иркутска и Хабаровска. А до конца века будет видно еще только одно — 11 августа 1999 г., полоса полной фазы которого пройдет через Крым и Закавказье.

Напомним, что диаметр Луны равен 3474 км, диаметр Солнца — 1392 000 км, или в 400 раз больше. Но Луна отстоит от Земли на 384 440 км, а Солнце — на 149 597 870 км, т. е. тоже примерно в 400 раз больше. В результате их видимые диаметры примерно одинаковы: средний диаметр Луны равен $31'05''$, а Солнца — $31'59''$. И когда диск Луны заслоняет собой Солнце, то с Земли, если бы орбита Луны была круговой, был бы виден тонкий блестящий ободок: затмения были бы кольцеобразными. Но в перигее видимый угловой диаметр Луны равен $33'32''$, а в апогее — $29'20''$. Видимый диаметр Солнца меняется от $32'36''$ в январе до $31'31''$ в июле. Вследствие этого, если Луна находится вблизи перигея, она закрывает весь диск Солнца и затмение будет полным, а если вблизи апогея, то кольцеобразным.

Полное солнечное затмение начнется ранним утром в воскресенье, 22 июля 1990 г., в Европе и закончится вечером того же дня в акватории Тихого океана. Полоса полной фазы возникнет в 5 ч 53 мин по московскому времени в точке с координатами: восточная долгота — 1 ч 34,9 мин, северная широта — $59^{\circ}46'$. Эта точка находится в Финском заливе, северо-западнее советского острова Найссаар. Полная фаза здесь начнется с восходом Солнца. Полная фаза в полосе шириной около 172 км захватит небольшой участок Эстонской ССР с городами Таллинн и Маарду (где короткое время можно будет видеть низко над горизонтом полную фазу затмения) и юг Финляндии со столицей Хельсинки.

Затем полоса полной фазы пройдет через Карельскую АССР и выйдет к Белому морю у Беломорска, где продолжительность полной фазы длится 1 мин 36,5 с. Ширина полосы здесь составляет 179 км и охватывает зону от Сумского Посада до городков Кузема и Сиг, включая город Кемь, где высота Солнца над горизонтом будет уже 7° . Далее, пройдя через Соловецкие острова, тень Луны пересечет Кольский полуостров по его восточному побережью и снова выйдет к Белому морю у городка Поной, где полная фаза начнется в 5 ч 56 мин по московскому времени при

высоте Солнца около 11° и будет продолжаться 1 мин 43 с. Следуя по акватории Баренцева моря, полоса пересечет полуостров Канин Нос, остров Колгуев и южную часть Новой Земли. В этих пунктах тень восходящего Солнца будет двигаться очень быстро, пробегая за 5 мин более 900 км. Продолжая движение, тень пересечет Карское море и примерно в 6 ч 19 мин по московскому времени вступит на полуостров Таймыр.

Постепенно поворачивая к юго-востоку и замедляя свой бег, тень Луны вблизи устья Индигирки вступит на материк. Пересекая Колыму, она пройдет рядом с поселками Черский, Нижнеколымск и Анюйск. В этом районе полное затмение будет наблюдаться при наибольшей высоте Солнца — 40° . После этого тень около 20 мин будет скользить по Чукотскому национальному округу, у поселка Марково пересечет реку Анадырь и в 7 ч 11 мин по московскому времени покинет территорию суши южнее мыса Наварин, недалеко от поселка Хатырка. Условия здесь остаются благоприятными: высота Солнца 40° , продолжительность полной фазы 2 мин 35 с, ширина полосы 120—130 км.

Дальше полоса полной фазы, следуя по Берингову морю, в 7 ч 35 мин вступит на Алеутские острова. Поскольку они лежат Западном полушарии Земли, по пути от побережья Советского Союза к этим островам полоса полного солнечного затмения пересечет линию перемены дат, и на Алеутских островах в этот момент будет предыдущий день. Таким образом, возникает довольно любопытная ситуация, когда солнечное затмение начнется утром в воскресенье, 22 июля, в Европе, а закончится через 2 ч 18 мин накануне, в субботу 21 июля, в Тихом океане.

Частные фазы затмения будут видны почти на всей территории нашей страны. Затмение начнется в 4 ч 40 мин по московскому времени к югу от Аральского моря в точке с координатами: восточная долгота — 61° , северная широта — $43^\circ 28'$. На большей части СССР будут видны те или другие фазы затмения.

В Москве и Ленинграде Солнце взойдет после начала затмения, но его наибольшая фаза будет отчетливо видна: в Ленинграде — в фазе 0,974 в 5 ч 51 мин по московскому времени при высоте 3° над горизонтом, в Москве — в фазе 0,856 в 5 ч 43 мин при высоте 2° над горизонтом. Закончится затмение в 9 ч 24,5 мин по московскому времени в Тихом океане в точке с координатами: западная долгота — $165^\circ 17'$, северная широта $+11^\circ 23'$.

Геоцентрическое соединение Солнца и Луны по прямому восхождению произойдет 22 июля 1990 г. в 6 ч 36 мин 44,998 с, что соответствует юлианской дате 2 448 094, 6 088 541. Для этого момента:

прямое восхождение α Солнца и Луны 8 ч 04 мин 47,2 с;
его часовое изменение для Солнца +9,97 с, для Луны
+146,62 с;

склонение Солнца $+20^\circ 21' 01''$, его часовое изменение — $29,5''$;
склонение Луны $+21^\circ 08' 13''$, его часовое изменение — $635,0''$;
экваториальный горизонтальный параллакс Солнца — $8,66''$;
его угловой радиус — $15' 44''$;
экваториальный горизонтальный параллакс Луны — $59' 24,23''$;
ее угловой радиус — $16' 11''$.

Обстоятельства затмений для 15 пунктов, расположенных в полосе полной фазы, приведены в табл. 1. В ней даны название

Таблица 1

Условия видимости солнечного затмения 22 июля 1990 г. в полосе полной фазы

Населенный пункт	T_1 , ч, мин, с	T_2 , ч, мин, с	T_m , ч, мин, с	T_3 , ч, мин, с	T_4 , ч, мин, с	Φ_m	P_1 , град.	P_2 , град.	P_3 , град.	P_4 , град.
Ангарка	5 49 18	6 55 34	6 56 46	6 57 59	8 02 08	1,012	289	122	257	93
Анюйск	5 46 46	6 52 27	6 53 43	6 55 00	7 58 53	1,016	239	89	293	96
Беломорск	5 02 11	5 53 39	5 54 27	5 55 15	6 48 42	1,023	302	135	295	128
Ваенг	5 58 00	7 03 50	7 05 07	7 06 26	8 09 56	1,018	283	88	281	89
Кальмское	5 43 32	6 49 31	6 50 38	6 51 45	7 56 11	1,010	291	134	251	97
Канин Нос	5 03 40	5 56 59	5 57 46	5 58 32	6 53 55	1,009	301	97	332	127
Кемь	5 02 41	5 54 59	5 55 01	5 55 49	6 49 19	1,012	301	110	319	128
Кузомень	5 03 15	5 55 29	5 56 08	5 56 46	6 51 01	1,006	301	85	344	128
Маарду	5 02 30	5 52 09	5 52 30	5 52 51	6 44 22	1,002	301	186	245	129
Маркво	5 56 23	7 02 37	7 03 54	7 05 11	8 08 46	1,018	283	88	282	90
Нижне- лымск	5 45 41	6 51 19	6 52 37	6 53 54	7 57 51	1,018	289	95	288	96
Полярное	5 35 37	6 40 27	6 41 39	6 42 51	7 46 48	1,013	295	128	267	102
Таллин	5 02 35	5 52 08	5 53 34	5 53 58	6 44 23	1,003	301	180	251	129
Хатырка	6 03 37	7 09 53	7 11 03	7 12 13	8 15 17	1,011	278	65	295	86
Черский	5 46 13	6 51 50	6 52 58	6 54 05	7 58 00	1,010	288	72	311	97

пункта, моменты начала частного затмения T_1 , начала полной фазы T_2 , момент наибольшей фазы T_m , конца полного затмения T_3 , конца частного затмения T_4 , величина наибольшей фазы Φ_m и позиционные углы P_1 , P_2 , P_3 и P_4 — углы точек касания Луны с диском Солнца, считаемые от направления на север против часовой стрелки.

Затмение 22 июля 1990 г., как и любое солнечное затмение, начинается с правого, западного, края Солнца. Сначала на диске Солнца появляется ущерб в форме дуги того же радиуса, что и диск Солнца. Постепенно фаза затмения увеличивается, и Солнце принимает вид серпа. При внимательном наблюдении можно заметить, что этот серп отличается от привычного нам серпа молодой Луны: фазы Луны ограничиваются эллиптическим терминатором, а темный диск Луны, затмевающий Солнце, имеет строго круговую форму.

В полосе полной фазы наступает момент, когда Луна полностью закрывает Солнце, наступает полумрак, как в самые темные сумерки, вокруг Солнца вспыхивает серебристо-жемчужное сияние солнечной короны, а на небе становятся видны яркие звезды. Но ярче всех звезд сверкают около Солнца три планеты: восточнее Солнца, между затмением и созвездием Льва, блещит Меркурий, имеющий нулевую звездную величину; рядом с Солнцем, в 5° к западу от него сверкает Юпитер, его блеск — $1,4^m$, еще дальше, почти в 30° к западу, в созвездии Близнецов ярко сияет Венера, имеющая в эти дни блеск, равный — $3,3^m$. При частных затмениях все это, разумеется, видно не будет.

Согласно предварительным прогнозам на 1990 г. придется очередной максимум солнечной активности. Ожидается, что он будет рекордным по числу солнечных пятен и вспышек на Солнце и по интенсивности связанных с ними геофизических явлений. Уже в 1989 г. наблюдалось появление огромных устойчивых пятен и сильнейших вспышек, за которыми последовали сильные геомагнитные бури и яркие полярные сияния на Земле. Поэтому даже при частных фазах будет интересно наблюдать постепенное покрытие Лунной солнечными пятнами. Вести такие наблюдения лучше всего, проектируя изображение Солнца с помощью бинокля или небольшого телескопа на экран.

Научно-популярное издание

Сурдин Владимир Георгиевич

ГИГАНТСКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*. Редактор *И. Г. Вирко*. Мл. редактор *С. С. Патрикеева*. Обложка художника *Т. С. Егоровой*. Худож. редактор *К. А. Вечерин*. Техн. редактор *Н. В. Клецакая*. Корректор *В. В. Каночкина*.

ИБ № 10577

Сдано в набор 22.02.90. Подписано к печати 17.04.90. Т-09104. Формат бумаги $84 \times 108^{1/32}$. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,48. Тираж 28 245 экз. Заказ 384. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 904205. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Дорогой читатель!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.

Подписка на брошюры издательства «Знание» ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в «Каталоге советских газет и журналов» в разделе «Центральные журналы», рубрика «Брошюры издательства «Знание»

Цена подписки на год 1 руб. 80 коп.



Наш адрес:
СССР,
Москва,
Центр,
проезд Серова, 4