

# КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

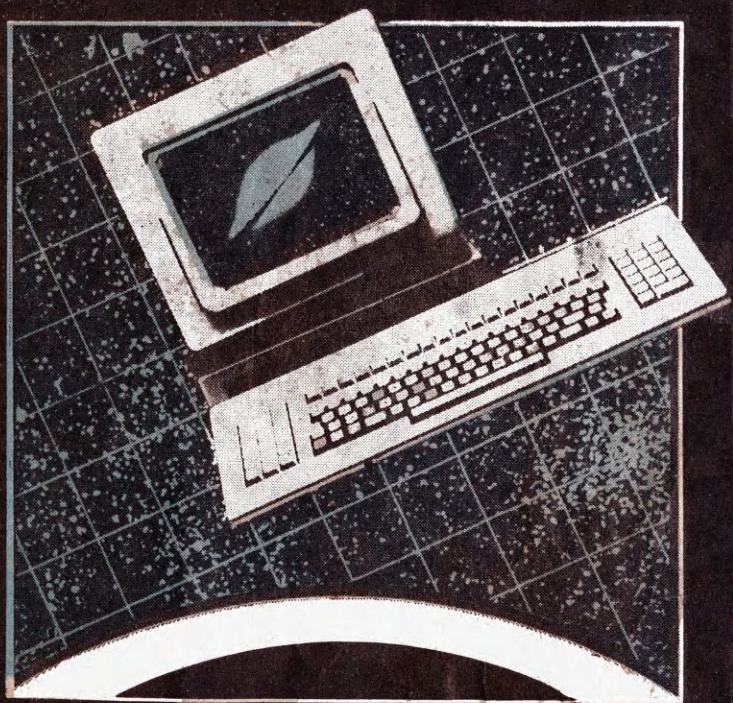
ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1989/9

Ю.Н.Ефремов

НОВЫЙ  
ВЗГЛЯД  
НА ГАЛАКТИКУ



**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

# **КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ**

9/1989

Издается ежемесячно с 1971 г.

Ю. Н. Ефремов

## **НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ГАЛАКТИКУ**



Издательство «Знание» Москва 1989

ББК 39.6  
Е 92

Редактор: *ВИРКО И. Г.*

**Ефремов Ю. Н.**

Е 92 Новый взгляд на Галактику.— М.: Знание, 1989. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 9).

ISBN 5-07-000279-1

15 к.

В брошюре излагаются современные представления о строении Галактики. Приводятся сведения о ее структуре, звездных населенных комплексах, ассоциациях и молекулярных облаках, о соседних галактиках и спиральных рукавах и о многом другом.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

3500000000

**ББК 39.6**

ISBN 5-07-000279-1

© Издательство «Знание», 1989 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Наша планетная система — семья Солнца, рядового члена гигантской звездной системы, насчитывающей сотни миллиардов звезд и простирающейся на десятки тысяч световых лет. И если семья занимает квартиру, то звездная система — это гигантский город. Контур его можно увидеть в ясную августовскую ночь. Светлая туманная полоса Млечного Пути проходит через все небо, раздваиваясь близ зенита в Лебеде и становясь все ярче к югу — в Щите и особенно в Стрельце. Еще Галилей установил, что Млечный Путь — слитное сияние далеких и слабых звезд, не видимых по отдельности невооруженным глазом. В начале XIX в. после трудов В. Гершеля стало окончательно ясно, что явление Млечного Пути объясняется тем, что Солнце находится близ экваториальной плоскости уплощенной звездной системы; перпендикулярно этой плоскости направленный взор встречает лишь сравнительно близкие звезды. Звездная система Млечного Пути получила название Галактики (от греческого *galaktikos* — млечный), и когда (совсем недавно — в 20-х годах!) выяснилось, что подобных систем неисчислимо множество, их стали называть галактики с маленькой буквы.

Строение, кинематику, динамику и эволюцию Галактики изучает звездная астрономия — наука о коллективных, системных характеристиках звезд, звездных «биогеоценозах». Но система Млечного Пути состоит не только из звезд, но и из газа. И хотя доля его по массе не превосходит нескольких процентов, без сведений о газовых облаках нельзя понять строение и эволюцию галактик. Дело не только в том, что эволюция галактик в существенной степени является историей звездообразования в них, а звезды образуются при фрагментации

наиболее плотных и холодных газовых облаков. В этих облаках концентрируется межзвездная пыль (микроскопические частицы углерода и кремния), поглощающая свет звезд. Облака сосредоточены близ экваториальной плоскости Галактики, и поэтому в оптическом диапазоне во многих направлениях, особенно в сторону центра Галактики, дальше нескольких тысяч световых лет ничего не видно. Бессильны даже самые мощные телескопы. Но газовые облака — они состоят в основном из водорода — излучают в радиодиапазоне, в котором поглощения практически нет, и именно радиоастрономия позволила нам в последние десятилетия составить представление о строении всей Галактики, а не только ближайших окрестностей Солнца.

Расположение Солнца близ экватора Млечного Пути весьма неудобно (хотя и не случайно) для исследования нашей звездной системы. Проблема аналогична задаче построения плана города из окна невысокого здания, да еще к тому же в туманный день. Насколько яснее картина с птичьего полета. Не удивительно, что и сейчас много пользы приносит изучение других галактик, особенно близких. Само представление о спиральной структуре системы Млечного Пути почерпнуто из данных о других галактиках; в сущности, изучение нашей звездной системы как таковой началось именно после осознания того, что она — одна из многих.

Контуры Галактики как линзообразной системы с центром в направлении созвездия Стрельца на расстоянии около 30 000 световых лет от Солнца сложились в 20-х годах. Тогда же стало ясно, что вокруг этого центра совершается вращение звезд, газовых облаков и звездных скоплений, находящихся близ экваториальной плоскости — в диске Галактики. В 40-х годах выяснилось, что отклонения от этого кругового вращения нарастают с увеличением высоты объекта над галактической плоскостью, а шаровые скопления, образующие почти сфероидальную подсистему, во вращении диска вообще не участвуют — они двигаются вокруг центра Галактики по вытянутым орбитам во всевозможных направлениях. С развитием теории звездной эволюции стало понятно, что в сфероидальную подсистему входят наиболее старые объекты, а самые молодые звезды сосредоточены в тонком слое вдоль галактического экватора — как и порождающие их и в настоящее время газовые

облака. Стали ясны тем самым основные черты эволюции Галактики. Данные о других галактиках позволили установить, что линзообразные галактики, окруженные концентрирующимися к центру старыми звездами и скоплениями и с продолжающимся в диске звездообразованием, обладают спиральной структурой, причем спиральные рукава выделяются прежде всего по молодым горячим звездам высокой светимости. Совершенствование методов определения расстояний до таких звезд позволило в 50-х годах установить положение трех отрезков спиральных рукавов, достаточно близких к Солнцу. Вскоре эти результаты были расширены на всю Галактику наблюдениями линии излучения водорода на длине волны 21 см с помощью радиотелескопов. Сложившиеся тогда представления о строении Галактики лишь уточнялись и расширялись в 60-е годы, и стало казаться, что эта проблема астрономии в принципе уже решена. Однако во второй половине 70-х годов устоявшиеся взгляды были поколеблены серией неожиданных открытий, принесших существенные изменения в выводы звездной астрономии.

Среди этих достижений — обнаружение гигантских молекулярных облаков, которые оказались наиболее массивными объектами Галактики; вывод о наличии у Галактики массивной короны, содержащей львиную долю общей массы системы; открытие перерывов в звездообразовании, происходивших во всей Галактике; вывод о совместном образовании не только звезд, но и звездных скоплений в гигантских комплексах. Формируются действительно новые представления о нашей звездной системе. Им и будет посвящена наша брошюра. Ее тема и название предложены Е. Ю. Ермаковым, который много лет был редактором этой серии. О безвременной его кончине скорбят все авторы, работавшие вместе с ним.

## **Глава 1. КАК ОТКРЫЛИ ГАЛАКТИКУ МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ**

Два века продолжались споры — охватывает ли система Млечного Пути всю наблюдаемую Вселенную или же это лишь одна из множества звездных систем — островов в океане Вселенной. В сущности, речь шла о размерах Млечного Пути и о природе слабых туманностей,

которых к концу XIX в. было обнаружено более 10 000 000. У некоторых из них была найдена спиральная структура; она стала видна на первых же фотографиях туманности Андромеды, полученных в 1887 г.

Решение проблемы пришло только в 1925 г., когда были обнародованы результаты Э. Хаббла, который на серии фотографий туманности Андромеды, полученных на крупнейшем тогда 2,5-метровом рефлекторе, не только отчетливо распознал индивидуальные звезды в спиральных рукавах туманности, но обнаружил, что несколько десятков из них являются переменными — такими же цефеидами, как в Магеллановых Облаках и в окрестностях Солнца. Применение зависимости период — светимость сразу же показало, что туманность Андромеды (M31) находится на расстоянии 900 000 световых лет\*.

Сейчас нам кажется, что спор сразу же был окончен, но у современников такого ощущения не было. Дж. Хейл, создатель обсерватории Маунт Вилсон (на которой работал Хаббл), писал в книге «Глубины небес» (ее русский перевод вышел в 1927 г.) по поводу спора Кертиса и Шепли, что вопрос еще не решен и что «были выдвинуты интересные доказательства с обеих сторон, но их слишком много, чтобы останавливаться на них здесь». О Хаббле (зная его результаты) он упоминает лишь в связи с его работами о возбуждении свечения газовых туманностей горячими звездами. Тогда же Лундмарк, сам получивший примерно такое же, как у Хаббла, расстояние для M31, допускал, что «маятник может качнуться еще раз». Даже в 1928 г. на IV съезде российских астрономов А. В. Марков доказывал, что спиральные туманности не суть «скопления космической пыли, светящейся отраженным светом звезд». Открытие Хаббла не упоминалось в обзоре важнейших новых направлений астрофизики, который сделал на этом съезде (ему было суждено стать последним съездом астрономов-профессионалов нашей страны) Г. А. Шайн.

Прекрасные фотографии ряда галактик были получены еще в 1909 г. Дж. Ричи на 1,5-метровом рефлекторе обсерватории Маунт Вилсон. На полученных им снимках M31 видна дюжина цефеид, а галактика Тре-

---

\* Подробнее см.: Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. — М.: Наука, 1984.

угольника (М33) была просто усыпана звездами. Цефеиды в М31 разыскал на пластинках Ричи лишь Хаббл, открывший их на снимках, полученных позднее на 2,5-метровом телескопе, но звезды в М33 бросались в глаза, и молодой тогда В. Бааде спросил в 1920 г. у Шепли, почему тот не продолжает исследования галактик. Но Шепли отвечал, что изображения не звездные, слишком размыты, и убедить его не удалось. В следующем году Шепли ушел из Маунт Вилсон, чтобы занять пост директора обсерватории Гарвардского университета. Когда Хаббл, воспользовавшись созданным Шепли методом — зависимостью период — светимость для цефеид, — доказал существование внешних галактик, Шепли активно включился в их исследование. Сам термин «галактика» распространился под влиянием Шепли; по-английски слово «галактика» может означать и блистательную компанию, особенно красоток, и Хаббл предпочитал говорить «внегалактические туманности». Но завоевание мира туманностей — это достижение больших телескопов (слова Хаббла), а у Шепли в Гарварде их не было...

Почему же у Шепли были такие сомнения и почему сам Хаббл не спешил с публикацией своих результатов? Дело в том, что еще в 1916 г. авторитетный астроном ван Маанен, измеряя собственные движения (смещение по небесной сфере) деталей спиральных галактик (узлов, «туманных звезд»), нашел, что эти движения вполне заметны и составляют сотые доли секунды дуги в год. Сопоставляя их со скоростями вращения, измеряемыми (по эффекту Доплера) километрами-секундами, можно оценить расстояние. Для М33 оно получилось, например, всего 2000 пк. Первоначально Хаббл вынужден был просто повернуться к результатам ван Маанена «слепым глазом», и лишь в 1935 г. ван Маанен согласился с тем, что измеренные им собственные движения иллюзорны и связаны с использованием разных телескопов при измерении объектов с заметным угловым размером. Много лет спустя Шепли вспоминал: «Я ошибался, потому что ставил на измерения движений в спиральных, сделанные ван Мааненом... Я считаю своим промахом то, что я так слепо доверял тут моему другу ван Маанену...»

Работы Хаббла стали, в сущности, и открытием нашей собственной Галактики, которая явилась теперь не



всеобъемлющей звездной вселенной, а одной из бесчисленного множества звездных систем.

## Глава 2. ЗВЕЗДНЫЕ НАСЕЛЕНИЯ

Авторитетнейший в то время голландский астроном Я. Каптейн не поверил в расстояния шаровых скоплений, определенные Шепли, как не поверил и в то, что центр симметрии их распределения в пространстве является и центром нашей звездной системы. В 1922 г. он опубликовал свой последний вариант «вселенной Каптейна» — двояковыпуклая линза диаметром около 20 000 пк; на расстоянии всего лишь 650 пк от ее центра (а не 15 000, как у Шепли) находится Солнце. Незадолго перед этим немецкий астрометрист Ф. Кюстнер спросил у прибывшего в Бонн маститого голландского коллеги: не рано ли строить схему Млечного Пути, не подождать ли, пока данных не станет побольше? Каптейн, как вспоминал Кюстнер, пришел в ярость. Он топнул ногой и закричал: «Я не хочу ждать! Я хочу знать это теперь!» Это благородное нетерпение остается движущей силой науки, ибо никогда не настанет момент, когда данных станет вполне уж достаточно. Но, увы, в том же 1922 г. Каптейн умер, оставив нам не только неверную схему Галактики, но и план, согласно которому надлежало изучить всевозможные характеристики звезд в 206 равномерно распределенных по небу площадках; выполнение этого плана, конечно, способствовало построению современных представлений о Галактике.

Главной причиной ошибки Каптейна было поглощение света в межзвездном пространстве. Мы знаем теперь, что в плоскости галактического диска оно составляет в среднем 1—3 звездной величины на килопарсек, а во многих направлениях и еще больше; из-за этого звезда данной светимости кажется нам более слабой и, значит, более далекой. Вот почему Шепли, не знавший о поглощении, преувеличил расстояние до шаровых скоплений и до центра Галактики. Однако Каптейн, который, следуя Гершелю, вел подсчеты звезд в площадках, обнаружил, что во всех направлениях от Солнца пространственная плотность звезд падает, и, не зная о поглощении, счел это доказательством нашего близцентрального положения в звездной системе.

Отголоски этого представления были живы до середины 30-х годов, особенно в связи с тем, что размеры нашей Галактики представлялись необычно большими. Некоторые авторы считали, что мы живем в тесной группе галактик, состоящей из Местной системы (близ центра которой находится Солнце), центральной си-

стемы (к центру которой концентрируются шаровые скопления) и двух Магеллановых Облаков — Большого и Малого. Сам Шепли еще в 1930 г. считал, что система Млечного Пути является «сверхгалактикой — сплюснутой системой типичных галактик» и сравнивать ее надо со скоплением галактик в Деве и Волосах Вероники, а с типичной внегалактической туманностью надо сравнивать Местную систему — звездное облако диаметром в несколько тысяч световых лет.

Конечно, высказывались и правильные взгляды: Ф. Сирс еще в 1928 г. был убежден, что Галактика является спиральной системой, а Местная система — всего лишь звездное облако (хотя и содержащее миллионы звезд), аналогичное «узлам», наблюдаемым в рукавах спиральных галактик (в особенности в М33, аналогом которой Сирс и считал нашу систему). Поддерживая эти взгляды, Б. Бок писал в 1936 г., что картина, согласно которой Солнце находится в одном из узлов спирального рукава, протягивающегося от Лебедя к Килью, примерно на расстоянии две трети от радиуса всей системы, удивительно хорошо соответствует непосредственному впечатлению от вида Млечного Пути, наблюдаемого из тропиков, где хорошо видны его ярчайшие области в Стрельце. Это справедливо в целом и по сей день.

Окончательно эти представления победили лишь в результате исследований звездных движений. Эти исследования показали, что объекты галактического диска вращаются примерно по круговым орбитам вокруг далекого центра, находящегося в направлении созвездия Стрельца. К середине 20-х годов было уже известно, что большинство звезд в окрестностях Солнца имеют относительно него небольшие (менее 30 км/с) и хаотически направленные пространственные скорости, меньшая же часть звезд (преимущественно находящаяся на больших широтах, как и шаровые скопления) показывает высокие (до 200 км/с) и направленные преимущественно в одну сторону скорости; так же ведут себя и шаровые скопления. В 1926 г. Б. Линдبلاد предположил, что высокие скорости объектов, не концентрирующихся к галактической плоскости, объясняются тем, что в отличие от Солнца и звезд диска они гораздо медленнее вращаются вокруг центра Галактики, направление на который должно быть перпендикулярно векторам их скоростей относительно Солнца. Это направление, как отметил Линдبلاد, примерно совпадает с направлением на центр системы шаровых скоплений. Он заключил, что «звездную систему можно разделить на ряд подсистем, симметричных относительно одной и той же оси, имеющих различные скорости вращения на одном и том же расстоянии от этой оси и поэтому сплюснутых в разной степени [...]. Системы с наибольшими скоростями вращения образуют облака Млечного Пути». Солнце входит в быстро вращающуюся плоскую подсистему, и относительно него эллипсоидальная система медленно вращающихся шаровых скоплений показывает высокую скорость.

Через год гипотеза Линдблода была доказана Яном Оортом, последним из ныне здравствующих основоположников современной астрономии. Он рассмотрел, какое влияние вращение Галактики должно оказать на собственные движения и лучевые скорости звезд, наблюдаемых на разных долготах. Твердотельное вращение сказало бы только на собственных движениях, и тогда вся масса Галактики должна быть равномерно распределена в ее диске; кепле-

ровское вращение сказывается и на лучевых скоростях, и на собственных движениях, и тогда львиная доля массы должна быть сконцентрирована близ центра, подобно Солнцу в планетной системе. Получение зависимости скорости вращения от расстояния до центра — кривой вращения — остается с тех пор важнейшей задачей исследования и нашей и других галактик.

Оорт нашел в 1926 г., что вращение Галактики дифференциально, его угловая скорость убывает с расстоянием от центра (хотя и медленнее, чем это должно быть по закону Кеплера). Поэтому в зависимости лучевых скоростей звезд от долготы наблюдается характерная двойная волна. Исследовав эту зависимость для разных групп звезд, Оорт заключил, что центр вращения Галактики находится на расстоянии около 5000 пк в направлении, близком к полученному Шепли и Линдбладом. Он отметил при этом, что линдбладовские пространственно-кинематические подсистемы населены объектами разного физического типа. Значение этой взаимосвязи было до конца осознано лишь в 40-х годах в первую очередь благодаря исследованиям галактики Андромеды.

Центральную часть этой галактики Хаббл не смог разрешить на звезды и даже в 1929 г. считал вполне возможным, что она состоит из плотного газа, который только на периферии сконденсировался в звезды. Не разрешались на звезды и эллиптические спутники М31. Успеха добился лишь в 1943 г. В. Бааде, почти в безраздельном владении которого оказался в годы войны 100-дюймовый (2,5-метровый) телескоп. Он — выходец из Германии — не получил к тому времени американское гражданство и не имел права менять место жительства, большинство же астрономов Маунт Вилсона, в том числе и Хаббл, были призваны в армию или занимались военными проектами. Интегральный спектр центральной части М31 (балджа, как сейчас говорят) был G5, и поэтому Бааде решил попытаться счастья, используя пластинки, чувствительные к красным лучам, — для этих звезд они могли дать выигрыш в предельной величине на 0,5<sup>m</sup>. И на пластинках, полученных в августе 1943 г., появились десятки тысяч слабых звезд. Вскоре были разрешены на звезды и спутники галактики Андромеды.

Не сразу понял Бааде, что же это за звезды. Красные гиганты в окрестностях Солнца и в рассеянных звездных скоплениях слишком слабы, чтобы были шансы их «изловить» в М31, а сверхгиганты слишком редки и всегда сопровождаются более многочисленными голубыми звездами высокой светимости, которые в основном и обнаружил Хаббл в спиральных рукавах галактики Андромеды. На диаграмме Герцшпрунга — Рассела для рассеянных скоплений ярчайшие звезды главной последовательности обычно не уступают ни по числу, ни по светимости красным гигантам; в бедных скоплениях последние вообще отсутствуют. Диаграммы цвет — светимость шаровых скоплений в то время были известны мало;

из-за их удаленности удавалось измерить только ярчайшие звезды, и это были красные звезды, примерно на  $3^m$  более яркие, чем типичные красные гиганты в рассеянных скоплениях. Вспомнив об этом, Бааде понял, что звездное население ядерных областей спиральных галактик аналогично населению эллиптических галактик — и шаровых скоплений! Он предложил ввести понятия населения I (галактического диска, спиральных рукавов), для которого характерна диаграмма цвет — величина рассеянных скоплений, и населения II (эллиптических галактик, ядер спиральных галактик и их эллипсоидального гало), для которого характерна диаграмма шаровых скоплений. Корреляция кинематики, пространственного распределения и физических характеристик звезд и скоплений, отмеченная Линдбладом и Оортом, получила четкое выражение в концепции двух типов звездного населения.

Позднее Бааде отмечал\*, что для создания этой концепции, в сущности, не было крайней необходимости в разрешении на звезды центральных областей галактики Андромеды. В ближайших карликовых эллиптических галактиках уже были известны переменные звезды типа RR Лиры — типичные объекты галактического гало и обычные члены шаровых скоплений; в то же время уже знали, что цветовые характеристики ядерных областей спиральных галактик, эллиптических галактик и шаровых скоплений весьма похожи. Однако никто не сопоставил это сходство с «аномалиями» диаграмм цвет — величина шаровых скоплений, и будь M31 по-прежнему, неизвестно, когда бы появилась концепция двух населений. В ряде спиральных галактик (в частности, в M33) население I встречается вплоть до самого центра, а население II выражено весьма слабо.

Значительный вклад в развитие представлений о подсистемах галактики внес Б. В. Кукаркин, исследовавший в 1943—1949 гг. пространственное распределение переменных звезд. Особенности их кинематики изучил затем П. П. Паренаго. Они объединили подсистемы звезд разного типа, но с близкими пространственно-кинематическими характеристиками в плоскую составляющую Галактики, соответствующую населению I по Бааде, и в сферическую составляющую — население II, была выделена также промежуточная составляющая. Долгое время шли споры о том, два или три, или даже пять типов звездного населения надо выделять, насколько резки переходы между ними. Сейчас, пожалуй, достигнуто согласие в том, что дискретность составляющих явно имеет место: при этом скачок в характеристиках особенно велик между населением II (сферической составляющей) и населением I (промежуточной и плоской составляющей), или, как сейчас чаще говорят, толстым и тонким диском.

Понять значение и причины существования различных звездных населений невозможно без знания эволюции звезд и галактик. Для звезд оно пришло в 50-х годах. Теория звездной эволюции, основанная на достижениях ядерной физики, показала, что на главной последовательности диаграммы температура — свети-

\* См.: Бааде В. Эволюция звезд и галактик. — М.: Мир, 1966.

мость, соответствующей самой длительной стадии эволюции, звезда живет, пока источником ее энергии является превращение водорода в гелий. После истощения водорода в ядре звезды она уходит в область красных гигантов и сверхгигантов, и это происходит тем быстрее, чем больше масса и светимость звезды. Поэтому о возрасте звездного скопления можно судить по светимости ярчайших звезд, еще оставшихся на главной последовательности. Для шаровых скоплений эта светимость у всех почти одинакова (около  $4^m$ ) и свидетельствует о возрасте 12—18 млрд. лет; это старейшие объекты Галактики. Возраст рассеянных скоплений от 8—10 млрд. лет до 1 млн. лет и меньше; их образование продолжается в диске Галактики и сейчас.

В те же годы стало ясно, что содержание элементов тяжелее гелия (эти элементы вырабатываются в недрах звезд и при взрывах сверхновых поступают в межзвездную среду, которая постепенно ими обогащается) в объектах населения II на порядок и два порядка меньше, чем в плоской составляющей. Стало также ясно, что в первоначально сферической газовой протогалактике образовывались объекты населения II, а после оседания газа к плоскости, перпендикулярной оси вращения, и его обогащения в результате взрывов сверхновых звездообразование сосредоточилось в диске, и рождавшиеся в нем звезды населения I имеют «нормальный» (т. е. близкий к солнечному) химический состав.

Эволюция Галактики — это, в сущности, история звездообразования в ней. Если темп перехода газа в звезды высок, запасы его исчерпываются прежде, чем газ осядет к плоскости вращения. Это, очевидно, имеет место, если исходный момент вращения протогалактики невелик; в результате рождаются сфероидальные (эллиптические) галактики, состоящие лишь из звезд населения II. Сплюснутая форма большинства из них отнюдь не связана с вращением всей системы, их звезды хаотично вращаются вокруг центра в разных плоскостях и направлениях. При более медленном начальном темпе звездообразования из вращающейся достаточно массивной протогалактики рождается спиральная галактика.

Не так давно А. Сендидж обратил внимание на то обстоятельство, что в спиральных и неправильных галактиках с активным звездообразованием запасов газа

хватит еще лишь на 2—5 млрд. лет. Астрономам далекого будущего суждено увидеть мертвый мир, оживляемый лишь вспышками новых звезд и сверхновых I типа, а еще через десяток миллиардов лет исчезнут и эти картины и вселенная будет заполнена галактиками из потухших звезд... Более вероятным Сендидж считает зависимость начальной функции масс звезд, т. е. их распределение по массам в момент рождения, от окружающих условий. Газа хватит намного дольше, если в областях современного звездообразования, в условиях высокого его темпа звезды с массами меньше 2—3 солнечных рождаются в очень небольшом количестве. Но возможен и другой подход — от времени и места зависит не начальная функция масс, а темп звездообразования, и в ряде галактик он раньше не был таким высоким.

Представления о переменной во времени интенсивности звездообразования в нашей Галактике активно развиваются А. А. Сучковым. Совместно с В. А. Марсаковым он еще в 1976 г. обратил внимание на то, что в распределении звезд Галактики по возрасту, химическому составу и высоте над экваториальной плоскостью ( $Z$ -координате) имеются пробелы, причем, кроме соответствующих разрыву между диском и гало, существует еще по одному (хотя и менее выраженному) внутри каждого из этих населений. Эти пробелы А. А. Сучков \* объяснил перерывами в звездообразовании, возникающими повсеместно в Галактике в эпохи многочисленных взрывов сверхновых. Взрывы нагревают и турбулизуют межзвездную среду и мешают звездообразованию, но в то же время обогащают окружающую среду тяжелыми элементами. За время перерыва продолжается оседание газа к плоскости вращения, и новое поколение звезд рождается в более тонком диске и с большим содержанием металлов (как иногда называют для краткости все содержащиеся в звездах элементы тяжелее гелия, в основном металлы и особенно железо).

К аналогичным, в сущности, выводам независимо пришел несколько лет назад Дж. Скало, который предположил, что два горбика на функции масс звезд Галактики можно объяснить тем, что 5 млрд. и затем 200 млн. лет назад звездообразование шло необычайно ин-

---

\* См.: Сучков А. А. Галактики знакомые и загадочные.— М.: Наука, 1988.

тенсивно. Понятно, что вскоре во взрывах сверхновых последовала гибель необычно большого количества звезд — и соответствующий перерыв в звездообразовании. Ряд авторов находит и дискретность в распределении звезд по  $Z$ -координатам. Встреченные когда-то в штыки выводы А. А. Сучкова все больше подтверждаются, хотя за границей эти пионерные исследования остаются малоизвестными.

Можно сказать, что в астрономии сейчас происходит примирение принципа актуализма Лайеля с теорией катастроф Кювье. Нынешнюю ситуацию в галактическом диске нельзя экстраполировать назад на все время его существования, были и более бурные эпохи. А вот чем объясняется эта неравномерность эволюции, об этом есть пока только догадки.

### Глава 3. КОРОНА ГАЛАКТИКИ

Мы рассмотрим теперь сферическую составляющую Галактики, состав и строение ее гало, состоящего из объектов населения II. Мы объединяем их всех под названием «корона» — русский перевод слова «гало», но в специальной литературе под короной подразумевают чаще всего самые внешние части сферондальной системы с характерным радиусом около 70 кпк и массой около тысячи миллиардов масс Солнца. Эта масса вдесятеро больше, чем масса всех остальных составляющих Галактики, но мы не знаем, из чего состоит корона (или внешнее гало, как еще ее называют), каково ее происхождение.

Из всех достижений в изучении Галактики доводы в пользу существования внешнего гало — огромного и массивного — конечно, наиболее впечатляют. Но мы недаром говорим: доводы, а не обнаружение (хотя доводы, по-видимому, неопровержимые); о материальных носителях этой массы идут споры. Скорее всего это не потухшие звезды — черные карлики, и не межзвездные планеты, и не пыль, и не газ, а слабо взаимодействующие элементарные частицы — нейтрино, если подтвердится у них наличие массы покоя, либо какие-то другие, еще не обнаруженные частицы, но не барионная материя. У некоторых галактик, видимых с ребра, обнаружена слабо светящаяся эллипсоидальная корона, состоящая, очевидно, из красных карликов, но и размеры

и массы таких корон намного меньше тех, о которых идет сейчас речь.

Откуда же тогда появились представления о гигантских внешних коронах из невидимого вещества? Их выдвинули почти одновременно в 1974 г. эстонский астроном Я. Эйнасто со своими сотрудниками и Дж. Острайкер в США. Они нашли, что большая масса гало требуется для поддержания в устойчивом состоянии галактического диска и она же может объяснить особенности движения спутников нашей Галактики. Но главный довод — это кривая вращения Галактики, зависимость линейной скорости вращения объектов диска от их расстояния от центра системы. Если бы вся масса системы была бы сосредоточена в центре (как в случае Солнечной системы), вращение происходило бы по закону Кеплера и его скорость убывала бы с расстоянием. Если бы масса была распределена равномерно, вращение было бы близко к твердотельному, как у патефонной пластинки. Понятно, что истина посередине, но видимое вещество Галактики (в первую очередь звезды населения II) концентрируется к центру, плотность системы уменьшается с ростом расстояния, поэтому должна убывать и скорость вращения. Но этого не наблюдается; вплоть до расстояний в 15—20 кпк (где еще могут наблюдаться области ионизованного водорода с более или менее уверенно определяемыми расстояниями) кривая вращения пологая, а может даже и подниматься вверх. Этот результат стал вполне достоверным, когда по наблюдениям нейтрального водорода (HI) в линии 21 см для многих спиральных галактик также были построены кривые вращения, идущие параллельно оси абсцисс на многие десятки килопарсек, далеко за пределы непосредственно видимого в оптическом диапазоне диска. Единственное объяснение — плотность вещества Галактики спадает гораздо медленнее, чем у непосредственно наблюдаемых его форм, и тянется эта невидимая корона гораздо дальше.

Надо сказать, что непосредственно на наши представления о строении или динамике более близких к центру частей Галактики наличие внешней короны не влияет (потенциал сферической оболочки не сказывается на лежащих внутри нее телах), однако существование этой короны и проблема ее природы принципиально важны для понимания происхождения и эволюции Галак-



тики. Более того, проблема корон галактик — это проблема скрытой массы во Вселенной, массы, которой «недостает» для того, чтобы Вселенная была замкнутой. Плотность светящейся материи меньше требующейся в модели замкнутой Вселенной, и есть все основания полагать, что недостающая масса как раз и заключена в коронах галактик.

Однако далеко не все галактики обладают массивными протяженными коронами; во всей проблеме еще много неясного. Исследованиями И. Д. Караченцева\* установлено, что таких корон нет у двойных галактик. Статистика этих галактик приводит к динамическим массам, близким к получающимся из обычного соотношения масса — светимость, и никаких несветящихся масс не требуется. В ряде предыдущих исследований к двойным галактикам причисляли и те галактики, что находились в пространстве далеко друг от друга и лишь просцировались рядышком на небосвод. Разность скоростей у таких оптических пар может быть весьма велика, а ее относили за счет больших скоростей орбитального движения и, значит, больших масс. Многие исследователи полагают, что массивными коронами обладают лишь галактики ранних типов — эллиптические, линзообразные и спирали класса Sa, обладающие заметным балджем.

Балдж — это та подсистема сферической составляющей, которая на фотографиях спиральных галактик с ребра (например, изображенной на обложке NGC 4594, «Сомбреро») образует центральное вздутие (bulge), «выпячивающееся» над диском вокруг ядра Галактики. Это слово — настоящее проклятие для редакторов астрономической литературы, поскольку общепринятого русского эквивалента не существует. Слово «вздутие» не вполне точно отражает существо дела, поскольку это не разбухание диска; объекты балджа к диску не принадлежат, они составляют, в сущности, наиболее плотную часть обычной сферической составляющей и отличаются, по-видимому, лишь большим содержанием тяжелых элементов. Концентрация в балдже тех же звезд населения II, которые мы знаем и в окрестностях Солн-

---

\* См.: Караченцев И. Д. Двойные галактики.— М.: Наука, 1987.

ца, дает, в частности, один из способов определения расстояния до центра Галактики.

К объектам населения II относятся субкарлики, переменные звезды типа RR Лиры, шаровые скопления и некоторые красные гиганты. Субкарлики — это звезды преимущественно классов G и K, которые на диаграмме цвет — светимость лежат на  $1^m$ — $1,5^m$  ниже звезд главной последовательности тех же классов (показателя цвета). Это объясняется не их меньшими массами, как думали до 60-х годов, а меньшим (на порядок и два), чем у звезд диска, содержанием металлов. Это приводит к уменьшению светимости звезды и к ее «поголубению», поскольку линии металлов (более слабые у субкарликов) концентрируются в голубой области спектра.

Переменные типа RR Лиры, или, как иногда их называют и сейчас, короткопериодические цефеиды, — звезды, пульсирующие с периодом от 0,3 до 0,7 дня. Звезды RR Лиры и некоторые красные гиганты обладают высокими скоростями относительно Солнца (т. е. не участвуют во вращении галактического диска) и ослабленными линиями металлов. Еще одним критерием отнесения звезды к населению II является превышающая несколько сот парсек (в среднем для объектов данного типа, конечно; отдельные из них могут быть и близко к плоскости, но не концентрируются к ней) Z-координата. Этот признак дает возможность относить к населению II также пульсирующие звезды типы W Девы, похожие по периодам и кривым блеска на гораздо более многочисленные «классические» цефеиды, концентрирующиеся в диске. Некоторые долгопериодические переменные звезды типа Миры Кита (с периодом, меньшим 220 дней) и полуправильные звезды также относятся к сферической составляющей.

Помимо близости пространственно-кинематических характеристик, все эти объекты объединяет большой возраст, что доказывается их присутствием в старейших объектах Галактики — шаровых скоплениях. Их насчитывается сейчас в ней около 130; по оценке А. С. Шарова (пожалуй, слишком оптимистической), шаровых скоплений всего в нашей системе около 500. Химический состав звезд этих скоплений оказался таким же, как у субкарликов.

Возраст шаровых скоплений неоднократно уточнял-

ся. По данным разных авторов, он находится в диапазоне 13—18 млрд. лет.

Надежное определение возрастов шаровых скоплений — задача исключительной важности, поскольку это старейшие объекты Галактики. Они дают, таким образом, ограничения на временную шкалу эволюции звезд и галактик и всей Вселенной. Понятно, что возраст шаровых скоплений не может быть больше хаббловского времени, и поэтому он накладывает ограничения и на постоянную Хаббла, на масштабы Вселенной. Возраст определяется по светимости звезд, еще остающихся на главной последовательности. Поскольку мы находимся далеко от центра Галактики, к которому концентрируются шаровые скопления, и их вообще немного, то даже ближайšie скопления столь далеки, что приходится для определения возраста иметь дело со звездами  $21^m$ — $24^m$ . Ситуация значительно улучшилась в последние годы, когда широкое применение новых приемников излучения позволило дойти до  $25^m$ — $26^m$ , а в рекордных наблюдениях — до  $28^m$ . Тем не менее ошибка в модуле расстояний этих скоплений составляет не менее  $0,2m$  (см. гл. 7), и только из-за этого возможна ошибка в оценке возраста данного скопления на несколько миллиардов лет. Другой трудностью является зависимость характера эволюционных треков звезд на диаграмме температура — светимость от химического состава: с уменьшением содержания металлов треки сдвигаются влево, в сторону меньших температур и больших светимостей, имитируя более молодой возраст. Последнее обстоятельство затрудняет и надежное определение разрыва возрастов между различными составляющими Галактики.

Примерно четвертая часть шаровых скоплений относится к промежуточной составляющей, или, как сейчас все чаще говорят, толстому диску, для которого характерны Z-координаты в 300—1200 пк. Содержание тяжелых элементов в объектах толстого диска заключено в пределах от солнечного до меньшего на порядок, тогда как в крайних объектах гало оно меньше на два порядка. Большинство ученых считают, что именно в объектах толстого диска наблюдается уменьшение содержания металлов с удалением от галактической плоскости, так что образование этих объектов шло одновременно с быстрым обогащением окружающей среды тяжелыми элементами. Насколько быстрым, зависит как раз от оценок возрастов старейших скоплений; во всяком случае наибольший разрыв как в возрасте, так и в металличности соответствует скачку пространственно-кинематических характеристик между сферической составляющей (гало) и толстым диском. Соответствующий перерыв в звездобразовании по некоторым оценкам мог продолжаться 6 млрд. лет.

Надо, правда, сказать, что А. Сендидж считает вопрос открытым; он указывает, что для старейших «рассеянных» скоплений, относящихся к толстому диску, имеются оценки возраста в 10—12 млрд. лет почти такие же, как для шаровых скоплений с наибольшей металличностью, — возникает тот же вопрос о дисперсии возрастов шаровых скоплений и их связи с металличностью. Однако скачок металличности между гало и диском бесспорен.

#### Глава 4. ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ДИСК

Звезды плоской составляющей сосредоточены в тонком диске ( $Z$ -координаты не более 150 пк), имеют приблизительно солнечный химический состав и находятся примерно в круговом движении вокруг центра Галактики. Г. Джилмор и Р. Вайс, изучая распределение звезд по металличности на разных  $Z$ -координатах (до 2 кпк), нашли четыре максимума, каждому из которых соответствует разное пространственное распределение: молодой диск, старый диск (это части тонкого диска), толстый диск и сферическая составляющая; численности звезд каждой составляющей относятся как 200 : 1000 : 20 : 1. Эти результаты, полученные в начале 80-х годов, перекликаются с выводами А. А. Сучкова и В. А. Марсакова, полученными почти на десять лет раньше, и с заключениями 50-х годов о пяти звездных населенных. Главное, однако, состоит в том, что в работах А. А. Сучкова не только доказана дискретность характеристик этих населений, но и впервые дана его интерпретация как следствия дискретности эпох звездообразования во всегалактическом масштабе\*.

Наиболее типичные представители тонкого диска — рассеянные скопления; к толстому диску из приблизительно 1000 известных скоплений относятся лишь 5—6. Эти последние — наиболее богатые из рассеянных скоплений, некоторые из них по виду напоминают даже шаровые (как NGC 7789), и тут уместно обсудить классификацию звездных скоплений.

---

\* Подробнее см.: Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. — М.: Наука, 1984.

Шаровые скопления получили свое название от В. Гершеля, который, по-видимому, первым в конце XVIII в. разрешил видимые лишь в телескопы туманные пятнышки на звезды — десятки тысяч звезд, сильно концентрирующихся к центру скопления. Современные оценки дают для масс шаровых скоплений значения  $10^5$ — $10^6$  солнечных. Рассеянные скопления намного беднее, их массы обычно  $10^2$ — $10^3$  масс Солнца, соответственно и концентрация в них звезд, как и говорит само название, значительно меньше. Многие из них видны и простым глазом, некоторые известны с древности и имеют собственные имена — Гиады и Плеяды в созвездии Тельца, Ясли в созвездии Рака, Волосы Вероники. Для нашей Галактики назвать скопление шаровым — значит сказать, что это старое богатое скопление населения II, в тонком диске Галактики таких скоплений нет (за одним-двумя исключениями). С другой стороны, бедных (рассеянных) скоплений нет в промежуточной и сферической составляющих Галактики.

Такое положение казалось, так сказать, естественным, пока не обнаружилось, что скопления в Магеллановых Облаках (не отличающиеся на фотографиях от шаровых) столь же богатые, как и шаровые, но имеют в большинстве возраст не 10—15 млрд. лет, а несколько десятков и сотен миллионов лет, т. е. по возрасту должны классифицироваться как рассеянные. Это окончательно было доказано в 60-х годах, когда для ряда из этих скоплений были построены диаграммы цвет-светимость. Присутствие звезд А, В, а иногда и О приводит к тому, что интегральный показатель цвета  $B-V$  для этих скоплений меньше  $0,5^m$ , тогда как у обычных старых шаровых скоплений он составляет  $0,7^m$ — $0,9^m$ . Поэтому молодые шаровые скопления часто называют голубыми шаровыми, хотя некоторые предпочитают называть их просто молодыми богатыми скоплениями. Недавно П. Ходж предложил провести границу между рассеянными и шаровыми скоплениями через величину массы в  $10^4$  солнечных, не принимая во внимание никакие другие характеристики.

Дело, конечно, не в терминологии, а в том, что отсутствие богатых молодых скоплений в Галактике оказалось вовсе не тривиальным обстоятельством, связанным просто с различием плотности исходной газовой среды в гало и в диске Галактики. Автор заметил более 10 лет назад, что молодые скопления преобладают среди богатых скоплений не только Магеллановых Облаков — неправильных галактик (спутников Млечного Пути), а также и в М33 и NGC 2403 — небольших спиральных галактиках с фрагментарной, клочковатой спиральной структурой. В то же время молодые скопления составляют не более 10% численности шаровых скоплений М31 и еще меньше — нашей Галактики, гигантских спиральных систем с ярко выраженными рукавами. Мы предположили, что именно немногочисленность молодых шаровых скоплений в галактиках с развитой регулярной спиральной структурой дает ключ к решению проблемы. Такая структура объясняется спиральными волнами плотности звезд и газа, вращающимися вокруг центра галактики. Плотность звезд в этих волнах возрастает незначительно, а газа — в десятки раз, что приводит к интенсивному звездообразованию, и поэтому спиральные рукава «обрисовываются» прежде всего газовыми облаками и молодыми звездами высокой светимости. Подробнее мы расскажем об этом в гл. 9, а пока для нас важно, что в галактиках с регулярной спиральной структурой каж-

дые  $10^8$ — $10^9$  лет по диску прокатывается стимулирующая звездообразование волна плотности. Есть некоторые основания полагать, что в условиях быстрого повышения плотности исходного газового облака рождаются преимущественно звезды больших масс. Когда в процессе эволюции эти звезды становятся горячими (класса O) или взрываются как сверхновые, они разрушают породившее их газовое облако, которое составляло долю общей массы протоскопления. Остающиеся звезды не могут удержаться поблизости друг от друга взаимным тяготением, и получается не скопление, а разреженная гравитационно несвязанная ассоциация.

В неправильных галактиках волн плотности нет, и многие газовые облака спокойно сжимаются и рождают гравитационно связанные скопления, в том числе и массивные. Конечно, ассоциации появляются и в этих галактиках, например, при звездообразовании, стимулированном столкновением облаков. Важно, что в регулярных спиральных галактиках на большей части их диска условий для спонтанного эффективного звездообразования нет, обязательно приходит волна плотности, а в галактиках с фрагментарными рукавами она или отсутствует, или же слабая (как в M33 и NGC 2403).

Альтернативой нашему предположению о роли спиральной волны плотности является возможность влияния химического состава. Воздействие горячих звезд и сверхновых на окружающий газ сильнее, он легче «выметается» из протоскопления, если в нем больше содержание тяжелых элементов. Б. Элмегрин предположил, что гравитационная связанность новорожденной звездной группировки, содержащей O-звезды, обуславливается недостатком тяжелых элементов. Если этим объяснять существование в Магеллановых Облаках молодых шаровых скоплений при отсутствии их в Галактике, приходится заключить, что содержание металлов достаточно уменьшить вдвое. В Облаках действительно имеются признаки меньшего содержания металлов в скоплениях, чем в расположенных по соседству звездах, — очевидно, выходцах из быстро распавшихся ассоциаций (поскольку одиночное образование звезд невозможно). Речь идет о сверхгигантах — молодых звездах, которые и образовались неподалеку от своего нынешнего местоположения. Тогда это все должно означать, что содержание металлов в исходных газовых облаках может отличаться в несколько раз, даже если они находятся на расстоянии в сотню парсек друг от друга, что сомнительно.

Мы видим, что проблема отсутствия в Галактике молодых шаровых скоплений весьма важна; гипотезы, предложенные для ее решения, ведут к выводам, принципиальным для всей проблемы звездообразования. Но не может ли дело заключаться в том, что богатые молодые скопления в нашей Галактике мы просто не видим, поскольку они заведомо находятся среди газопылевых облаков и поглощение света в них может составлять и 10 и 30 звездных величин? Если исходить из данных о галактике Андромеды (в ней около 15 скоплений, которые можно назвать молодыми шаровыми, масса ее вдвое больше, но интенсивность современного звездообразования существенно меньше, чем в нашей Галактике), то у нас могут быть два-три десятка таких скоплений. Конечно, мы считаем при этом, что степень регулярности спиральной структуры M31 и нашей Галактики примерно одинакова (аргументы в пользу этого будут приведены в гл. 9). Известно же пока лишь

два скопления, которые достаточно богаты и молоды, — это NGC 3603 в рукаве Киля и ассоциация Лебедь OB2 в рукаве Лебедя. Последняя группировка названа была ассоциацией именно потому, что ее OB-звезды, видимые в синих лучах, были разбросаны на довольно большой площади. Однако же исследования в красных лучах показали, что пылевые облака скрывали богатую и компактную группировку.

Пылевые облака более прозрачны для инфракрасных лучей, и, чтобы решить вопрос, нужно иметь картины темной прогалины Млечного Пути, «обрисовываемой» газопылевыми облаками, полученные с высоким разрешением по крайней мере в двух участках инфракрасного диапазона. Тогда можно будет судить о виде диаграммы светимости — температура и установившись, старым или молодым является имеющее быть обнаруженным скопление. В ближнем ИК диапазоне в направлении на облака Млечного Пути в Стрельце действительно было обнаружено несколько шаровых скоплений, не видимых в оптическом диапазоне, но, судя по всему, старых. Панорамные наблюдения в дальней ИК области\* трудны, мешают к тому же водяные пары в земной атмосфере, и надо рассчитывать на спутниковые исследования. Современные данные об облаках молекулярного водорода, в которых и сконцентрированы пылевые частицы, позволяют, по-видимому, провести более точную оценку полного числа скрываемых в них (и за ними) скоплений. При этом для наиболее молодых скоплений (с O-звездами) следует иметь в виду, что непосредственно вокруг них пыль и газ уже «выметены» и надо учитывать лишь ситуацию на луче зрения. Верхнюю оценку численности таких скоплений можно получить и по радиоданным, фиксирующим и области ионизованного водорода (связанные с O-звездами), скрытые за пылью (верхнюю, потому что в большинстве это будут O-ассоциации, а не скопления).

Рассеянные скопления с возрастом до 100 млн. лет практически не встречаются дальше 200 пк от плоскости Галактики; это и означает, что они «рисуют» тонкий диск. Практически также ведут себя и цефеиды. Возраст этих желтых пульсирующих сверхгигантов заключен между 10 и 100 млн. лет (тем меньше, чем больше период изменения блеска, растущий с массой звезды), а расстояния благодаря известной нам зависимости период — светимость определяются не хуже, чем для скоплений. Эти два типа объектов служат основой наших данных о галактическом диске. К сожалению, далее 2—3 кпк данные о них становятся неполны, но отдельные цефеиды известны вплоть до расстояний 7 и более кпк. Сведения о далеких объектах особенно важны, потому что на расстояниях более 15 кпк от центра газовый слой — облака HI — начинает искривляться, отклоне-

---

\* Звезды в ней излучают мало, но легко обнаружить нагретую горячими молодыми звездами пыль.

ния его от формальной галактической плоскости нарастают и достигают 1—2 кпк (в противоположные стороны от линии, проходящей через центр Галактики). Именно цефеиды позволили окончательно доказать, что аналогичным образом искривляется и звездный диск. Это было сделано в работе Л. Н. Бердникова (1987 г.), в которой он использовал фотоэлектрическую фотометрию 363 звезд, 78 из них (слабых и далеких) он наблюдал впервые, и они были особенно полезны для решения весьма важной для понимания структуры и динамики Галактики проблемы. Похоже на то, что со стороны наша Галактика должна выглядеть, как две составленные друг с другом полями ковбойские шляпы, хотя яркость внешних, изогнутых частей диска, конечно, мала.

Наиболее сильно концентрируются к галактической плоскости облака молекулярного водорода; толщина занимаемого ими слоя составляет 100—150 пк. Наибольшая их плотность наблюдается в центральном ядре радиусом в килопарсек, далее следует провал и затем снова повышенная плотность в кольце, ограниченном окружностями радиусом 4 и 8 кпк. В этом же кольце наибольшая плотность и областей III (ионизованного водорода), что естественно, ведь звездообразование идет наиболее интенсивно там, где много плотных газовых облаков. Атомарный водород распределен более равномерно и в более толстом слое, он тянется гораздо дальше, далеко за Солнце.

Концентрация молекулярных облаков (неизменно связанных с пылью, только под защитой которой от разрушающего излучения горячих звезд и могут образоваться молекулы) в кольце, начинающемся где-то в 2—3 кпк от Солнца в сторону центра, и объясняет, очевидно, отсутствие и цефеид и скоплений в этих направлениях далее 3—4 кпк — их скрывают пылевые облака. Наиболее молодых скоплений и цефеид (с наибольшими периодами) ближе к центру, чем 0,4 расстояния Солнца, и вообще не должно быть, ибо там нет и молекулярных облаков. Более старые объекты должны быть распределены в диске равномернее, но увидеть их можно лишь в ИК диапазоне. Недавние результаты южноафриканских астрономов показывают, что в плоскости Галактики в направлении на центр поглощение света составляет от 5 до 30 звездных величин, в ядрах же



молекулярных облаков поглощение много больше. При этом на телескопе с зеркалом в 1,9 м на расстояниях вплоть до самого центра (по оценке Р. Качпола и его коллег) обнаруживаются красные гиганты, так что есть надежда, что с более мощными телескопами можно уже сейчас проверить вывод об отсутствии близ центра цефеид, у которых меньше энергия излучения в ИК диапазоне.

Несколько лет назад европейский спутник IRAS «построил» карты всего неба в далеком ИК диапазоне, и видимая на них картина Млечного Пути крайне напоминает таковую, построенную на длине волны 2,6 мм, на которой излучают молекулы CO, сигнализирующие о присутствии более многочисленных (на пять порядков) молекул H<sub>2</sub>. На картах IRAS видны те же теплые молекулярные облака, обнаруживаемые по свечению концентрирующейся в них пыли, — это те облака, в которых уже есть горячие звезды, так что по светимости этих облаков в далеком ИК диапазоне можно судить об интенсивности звездообразования в них. И хорошо видно, сколь тонок активный, звездопорождающий слой газа и пыли в галактическом диске; отношение его толщины к диаметру близко к 1 : 100.

Ближе к центру Галактики исчезают, по-видимому, и более старые объекты диска, их сменяют звезды балджа. Это следует, в частности, из работ А. В. Засова, который нашел, что предположение о «дыре» в диске вокруг центра необходимо для объяснения кривых вращения многих галактик. Исследования состава звездного населения вплоть до самого центра, становящиеся ныне возможными, позволят проверить и эту гипотезу; техника наблюдений в ИК диапазоне быстро совершенствуется.

Таковы сглаженные характеристики диска Галактики. Важнейшими деталями его являются спиральные рукава, к которым концентрируются газовые облака и наиболее молодые звезды. Им мы посвятим отдельную главу, а сначала расскажем о молодых звездных группировках и проблеме звездообразования.

## **Глава 5. ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И АССОЦИАЦИИ**

Молодые звездные группировки — это молодые скопления, ассоциации, агрегаты, сверхассоциации и комплексы. Целый набор терминов, но только под скопле-

нием все понимают одно и то же: это выделяющаяся на прямых снимках компактная группировка гравитационно связанных звезд (правда, в вопросе, где проходит граница между бедным скоплением и кратной звездой, ясности, конечно, нет). Понятие звездной ассоциации в его современном значении ввел в 1947—1949 гг. В. А. Амбарцумян. Это разреженные группировки звезд определенного типа, на фотографиях не всегда выделяющиеся из фона; повышена плотность либо звезд О и В (ОВ-ассоциации), либо переменных типа Т Тельца (Т-ассоциации); размеры ассоциаций, по Амбарцумяну, 30—200 пк, а плотность недостаточна для гравитационной связанности. Под действием приливных сил от балджа Галактики, или, что то же самое, дифференциальности галактического вращения, которое является следствием концентрации массы к центру Галактики, звезды ассоциаций должны «растягиваться» вдоль своих галактических орбит, так что ассоциации не могут существовать дольше немногих десятков миллионов лет. В дальнейшем, в основном в работах П. Н. Холопова, выяснилось, что вблизи каждой из известных в 40-х годах звезд типа Т Тельца находятся и другие быстрые неправильные переменные звезды и газопылевые облака; две большие разреженные группировки превратились в несколько довольно компактных. Последующие работы показали, что и дисперсия скоростей звезд в Т-ассоциациях не больше, чем в скоплениях, и вполне согласуется с гравитационной связанностью. Ныне вполне ясно, что Т-ассоциация — это просто предельно молодое скопление, звездообразование в которых еще продолжается, так что ОВ-звезды в них еще не успели сформироваться. Ряд данных указывает, что звездообразование в эволюционирующем без внешних воздействий молекулярном облаке начинается с меньших масс, а более массивные появляются потом, и когда, придя на главную последовательность, они становятся О-звездами, звездообразование прекращается. Звездный ветер от этих горячих звезд и расширяющаяся от них зона ионизованного водорода разрушают родительское облако и прекращают звездообразование. Если же массивные звезды появляются слишком быстро, когда большая часть газа еще не переработана в звезды, уход его из протоскопления приводит к тому, что гравитационное взаимодействие уже родившихся звезд недостаточно, чтобы удерживать их вместе.

жать их вместе. Вполне возможно, конечно, что в ряде группировок О-звезды не появятся никогда; это естественно для маломассивных облаков. К этой проблеме распределения рождающихся звезд по массам мы обратимся в следующей главе, а сейчас отметим, что в О-ассоциациях дисперсия скоростей звезд доходит до 5—7 км/с и на порядок больше, чем в скоплениях и в Т-ассоциациях. Имеются и признаки вытянутости О-ассоциаций вдоль своих орбит (особенно в БМО), так что О-ассоциации действительно гравитационно не связаны из-за низкой эффективности звездообразования и быстрого ухода газа из породивших эти ассоциации молекулярных облаков.

Таким образом, группировки, содержащие О-звезды, можно разбить на скопления и гравитационно несвязанные ассоциации. Однако на практике выявить динамический статус конкретной группировки нелегко, необходимые наблюдательные данные почти всегда отсутствуют. Ряд скоплений с О-звездами в нашей Галактике был бы квалифицирован как ассоциации, если бы они были поближе, — угловые размеры их стали бы больше и выглядели бы они более разреженными. И действительно, в некоторых из них (например, NGC 2264) обнаружена большая дисперсия скоростей. На практике ассоциации приходится различать по большему диаметру и меньшей концентрации звезд к центру, чем у О-скоплений. Это различие хорошо видно в ближайших галактиках: в БМО почти все группировки с ОВ-звездами, диаметр которых превышает 25 пк, оказываются либо молодыми шаровыми скоплениями, либо ОВ-ассоциациями, и средний диаметр последних составляет 80 пк. В нашей Галактике диаметр скоплений с возрастом, превышающим 30 млн. лет, по данным Г. Линга, не превосходит (за двумя исключениями) 15 пк; в то же время у 6 скоплений с возрастными 10 млн. лет диаметры составляют 20—35 пк — у них наверняка обнаружится и большая дисперсия скоростей.

Американские астрономы П. Ходж и П. Люкке выделили в БМО 122 ОВ-ассоциации и 15 «звездных облаков» со средним диаметром 225 пк; некоторые из них являются объединением нескольких ассоциаций. Еще раньше, в 1964 г., С. Ван ден Берг нашел в галактике Андромеды 188 группировок голубых звезд высокой светимости со средним диаметром 480 пк и дал им привыч-

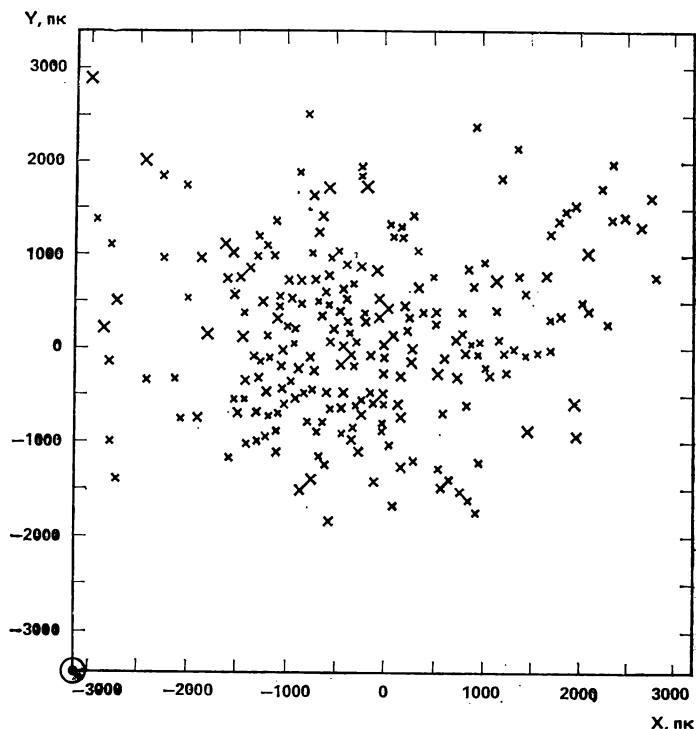


Рис. 1. Распределение скоплений с возрастом более 20 млн. лет в галактической плоскости (по данным Г. Линга). Солнце находится в начале координат

ное название «ОВ-ассоциации». Он, однако, обратил внимание на то, что диаметр этих ассоциаций на порядок больше, чем в Галактике, и объяснил это тем, что в Галактике мы выделяем из звездного фона лишь наиболее плотные части ассоциаций. Нам, однако, ясно сейчас, что большие размеры группировок Ван ден Берга объясняются тем, что они являются звездными комплексами — объединениями ассоциаций, молодых скоплений, отдельных звезд высокой светимости и газовых облаков.

О том, что ОВ-звезды, помимо ассоциаций, образуют и группировки размером 500—1000 пк, известно с середины 50-х годов. Шепли выделял их в БМО под названием созвездий, а позднее В. Бааде и В. А. Амбарцумян стали называть такие группировки сверхассоциаци-

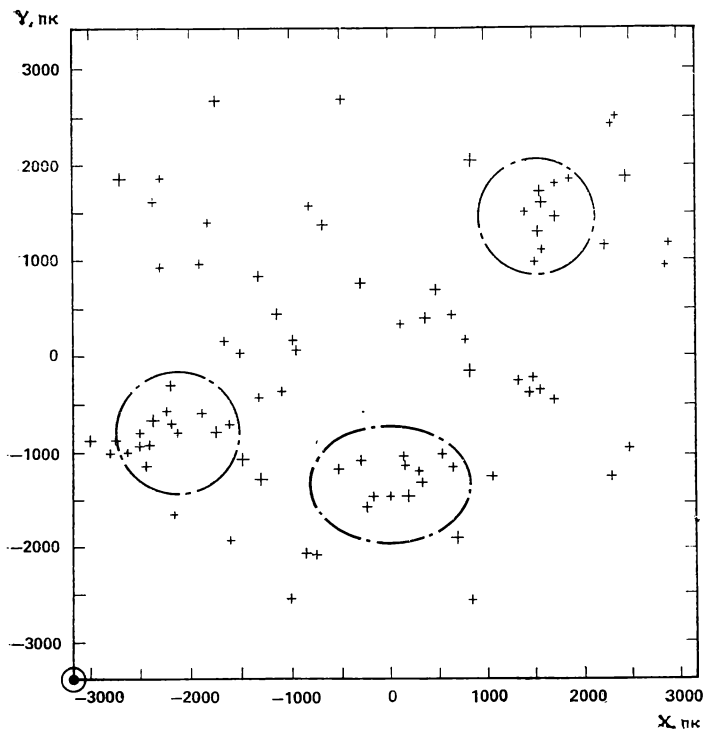


Рис 2. Распределение молодых скоплений в плоскости Галактики (по данным Г. Линга). Показаны выделенные им комплексы

ями; как правило, они связаны с облаками ионизованного водорода и сейчас часто называются гигантскими областями HII. Однако лишь одна из группировок Ванден Берга в M31 отдаленно напоминает сверхассоциацию, все остальные намного слабее по интегральной светимости и ни одна не содержит ярких облаков HII. Зато они содержат цефеиды, возраст которых доходит до  $10^8$  лет.

Звездные комплексы были выделены первоначально в 1975—1978 гг. именно по данным о цефеидах нашей Галактики; разбиение их на огромные группировки со средним диаметром около 600 пк подтверждается и современными данными. Тогда же было предположено, что комплексы можно выделять и по звездным скоплениям достаточно молодого возраста. Это также нашло под-

тверждение (рис. 1, 2) — более старые скопления распределены равномерно в плоскости Галактики, а скопления моложе 20 млн. лет сконцентрированы в гигантских комплексах. В некоторых из этих комплексов концентрируются и цефеиды — в них, очевидно, больше дисперсия возрастов; имеются данные и о существовании комплексов, объединяющих более старые скопления и цефеиды.

Типичным звездным комплексом является так называемая Местная система, признаки существования которой известны более 150 лет. Она включает звезды и скопления с возрастом до 50 млн. лет до расстояния в 300—500 пк от Солнца. Наше светило, однако, к ней не принадлежит, как и подавляющее большинство звезд в том же объеме. Наиболее яркие звезды неба, как окончательно установил Гулд в 1874 г., концентрируются не к Млечному Пути, а к большому кругу, наклоненному на  $18^\circ$  к плоскости Галактики. Шепли объяснил это тем, что близкие звезды образуют уплощенную систему, плоскость которой наклонена к галактической; в сущности, об этом же говорил и Дж. Гершель в 30-х годах XIX в. По современным данным, Местная система включает 4 ВО-ассоциации и ряд скоплений, в том числе Плеяды и  $\alpha$  Персея, близ которого находится ее центр. На краю Местной системы, «опущенном» под галактическую плоскость, расположена ближайшая к нам область образования массивных звезд (ассоциация Орион I, охватывающая все созвездие и включающая гигантское молекулярное облако массой около  $10^5$  солнечных); здесь же и ближайшая к нам звезда — родственник той, что вспыхнула 23 февраля 1987 г. как Сверхновая в БМО, — голубой сверхгигант Ригель. Если «вспыхнет» Ригель, он несколько месяцев будет сиять как звезда такой же яркости, что и полная Луна, но будущим наблюдателям не стоит им любоваться, поток жесткого излучения от близкой Сверхновой небезопасен...

Всего в окрестностях Солнца (т. е. в круге радиусом 3—4 кпк, в пределах которого мы знаем большинство объектов высокой светимости) можно выделить 30—40 комплексов по данным о пространственном распределении цефеид, полученным в работе Л. Н. Бердникова, о которой мы уже упоминали; они объединяют около 85% всех цефеид. Многие из комплексов содержат также и более молодые скопления; наилучшим примером

является комплекс диаметром около 600 пк вокруг двойного скопления  $h$  и  $\chi$  Персея. Наряду с двойным скоплением и окружающими его 60 сверхгигантами постоянного блеска в той же области и в том же интервале лучевых скоростей имеются по крайней мере 5—7 цефеид, рядом — область продолжающегося звездообразования с гигантским молекулярным облаком, а чуть поодаль — компактная группа из 8 скоплений. Пространственная «сегрегация» по возрастам в пределах комплекса и тенденция индивидуальных и коллективных членов комплекса «сидеть» в разных его углах являются характерными их чертами — и, несмотря на такие различия, вхождение компонентов комплекса в единую обширную группировку определяется достаточно уверенно, особенно когда речь идет о близких галактиках.

Так, вполне уверенно выделяются звездные комплексы в галактике Андромеды. Совместно с болгарскими астрономами Г. Р. Ивановым и Н. С. Николовым мы повторили работу Ван ден Берга (не заглядывая в ответ) по выделению группировок голубых звезд высокой светимости, используя пластинки 2-метрового телескопа обсерватории Рожен, масштаб которых в 4 раза больше, чем у использованных Ван ден Бергом. Мы выделили практически все его группировки, хотя часто несколько в других границах, и добавили десяток новых. Но наряду с обширными комплексами диаметром в 650 пк мы выделили и 210 группировок наиболее голубых звезд; 95% из них находятся внутри комплексов, они более компактны (их средний диаметр около 80 пк). Они-то и есть подлинные О-ассоциации галактики Андромеды, не даром их диаметр такой же, как у ОВ-ассоциаций Галактики и БМО. Значит, дело не в том, что мы выделяем в Галактике лишь наиболее плотные части ОВ-ассоциаций, а в том, что ассоциации, как правило, находятся внутри комплексов, это их наиболее яркие участки. Можно сказать, что ассоциации — это индикаторы звездных комплексов. Выделить же комплексы в Галактике намного труднее, чем в соседних звездных системах. Тем не менее мнение о том, что ОВ-ассоциации в нашей Галактике образуют обширные группировки, высказывалось еще в 1958 г. И. М. Копыловым. Недавно совместно с Т. Г. Ситник мы показали, что около 90% ОВ-ассоциаций Галактики можно объединить в обширные комплексы, в которые, как правило,

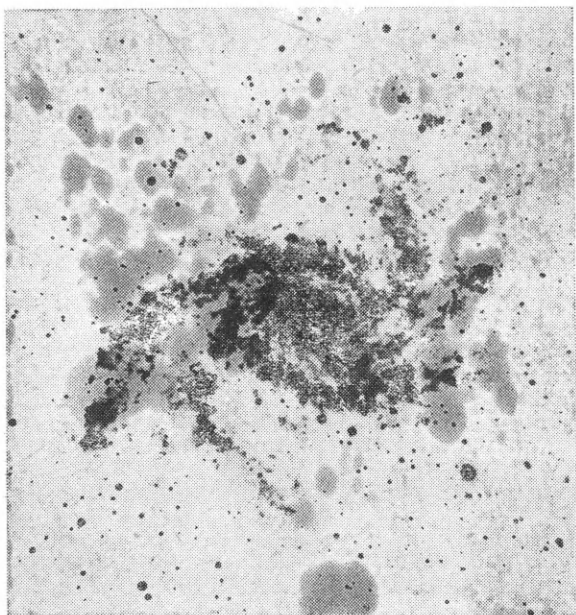


Рис. 3. Спиральная галактика NGC 6946, в которой зарегистрировано рекордное (5) количество сверхновых. Это говорит о высоком темпе звездообразования, что может быть связано с клочковатостью ее рукавов, состоящих из множества звездно-газовых комплексов

входят и гигантские молекулярные облака. Некоторые из комплексов содержат и цефеиды, и более старые скопления (как  $h$  и  $\chi$  Персея), в наиболее молодых комплексах их нет. Различается, очевидно, не только возраст, но и дисперсия возрастов в разных комплексах. Звездообразование — по крайней мере насколько это касается массивных звезд — сосредоточено в гигантских комплексах; молодой комплекс, богатый  $O$ -звездами и газом (областями ионизованного водорода), — это и есть сверхассоциация.

Вдоль спиральных рукавов галактик с активным звездообразованием распределены звездные комплексы, тем более заметные и яркие, чем выше темп современного звездообразования. Роль комплексов как очагов звездообразования подтверждается тем, что сверхновые II типа, возникающие из массивных, недолго живу-



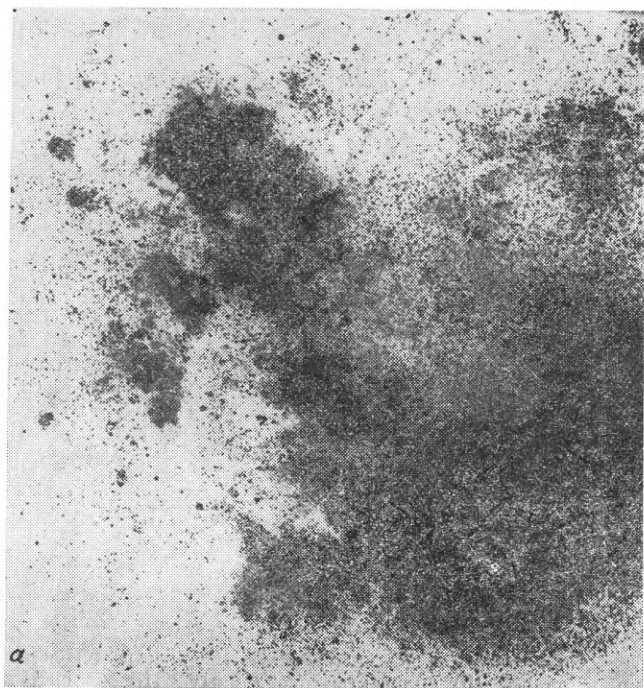
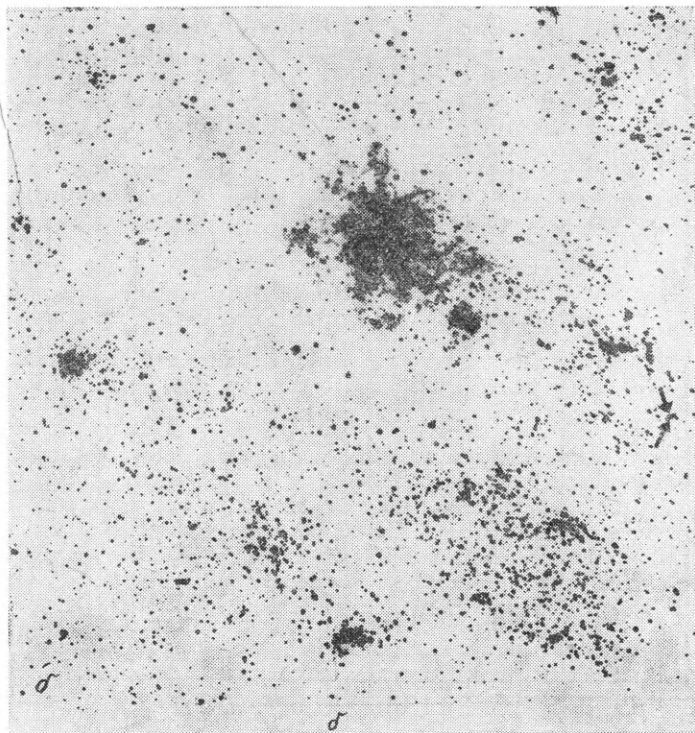


Рис 4: *a* — участок БМО, включающий сверхассоциацию 30 Золотой Рыбы (слева) и западную оконечность бара (справа); *б* — деталь предыдущей фотографии: слева — молодое шаровое скопление NGC 2100, внизу и в правом углу — ассоциации, над центром — газовая туманность (область III) Тарантул (собственно 30 Dog), справа стрелками показан голубой сверхгигант, взорвавшийся как Сверхновая в феврале 1987 г.

ших звезд в конце их эволюции, вспыхивают, как правило, в сверхассоциациях; многочисленные звездно-газовые комплексы видны, в частности, в рукавах галактики NGC 6946, в которой вспыхнуло рекордное количество сверхновых (рис. 3).

На окраине сверхассоциации 30 Золотой Рыбы вспыхнула и знаменитая Сверхновая 1987А (рис. 4). Столь же высокую, как сверхновые II типа, концентрацию к сверхассоциациям показывают звезды лишь еще одного типа — Вольфа—Райе (WR). Это массивные, очень горячие звезды, наружные слои которых обогащены тяжелыми элементами, вырабатываемыми в недрах звезд в процессе их эволюции; звезды WR показывают ряд признаков неустой-



чивости, истечение вещества и явно находятся на краю гибели. По всем этим признакам именно звезды Вольфа—Райе естественно рассматривать как непосредственных предшественников сверхновых II типа, однако же у SN 1987A им был, как мы знаем, голубой сверхгигант, чем (а также малым содержанием тяжелых элементов в звездах БМО) обычно и объясняются аномалии этой Сверхновой.

Сверхассоциация 30 Золотой Рыбы бросается в глаза на снимках БМО (рис. 4); она состоит из 19 молодых скоплений и ассоциаций, большинство из которых образуют группы из 2—5 членов. В этой области (как видно на рис. 5,а) много и свободных звезд высокой светимости с возрастом меньше 10 млн. лет, а вот по звездам с возрастом в 10—20 млн. лет этот комплекс уже не выделяется, но зато выделяется ряд других (рис. 5,б), практически незаметных на прямых фотографиях. Имеется в БМО и несколько еще более старых комплексов размером около 1 кпк, в двух из них плотность цефеид на порядок больше, чем в среднем в БМО. И опять-таки 95% ОВ-ассоциаций в БМО находятся в пределах этих обширных комплексов, они собраны в группы, большинство из которых расположены в областях с высокой концентрацией сверхгиган-

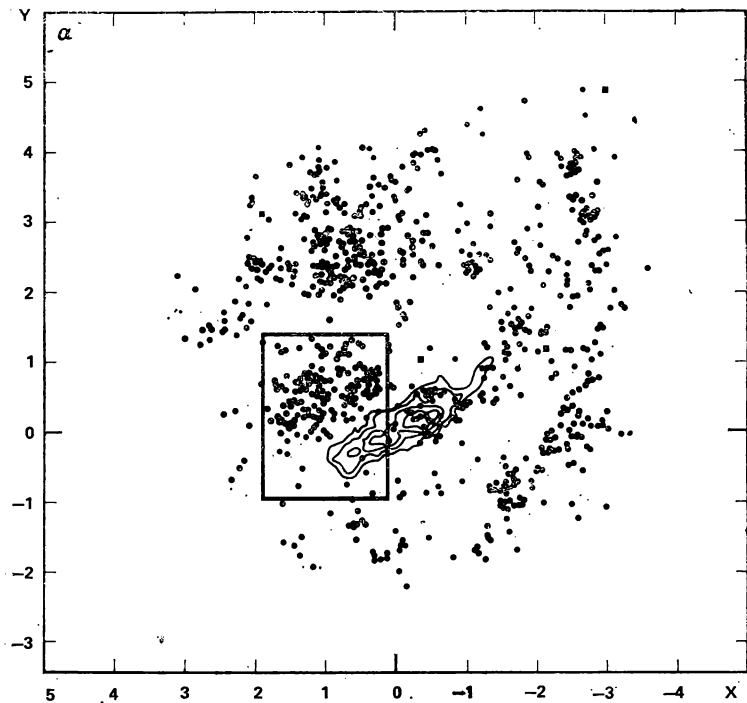
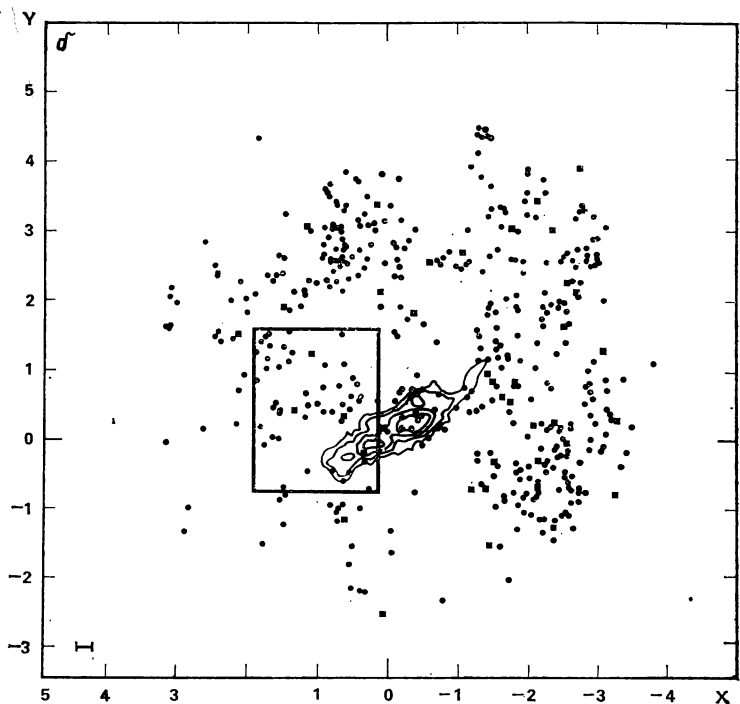


Рис. 5. Распределение молодых звезд высокой светимости в БМО, по данным И. Иссерштедта. Прямоугольником обведена область, изображенная на рис. 4,а. Координаты отсчитываются в градусах от центра Облака: а — звезды с возрастaми меньше 10 млн. лет; б — звезды в интервале возрастaв от 10 до 20 млн. лет ( $1^\circ \approx \approx 900$  пк)

тов. Сверхассоциация 30 Золотой Рыбы выделяется среди них обилием О-звезд и газа (и значит, областей HII), но ни по плотности сверхгигантов, ни по размерам.

Аналогичная ситуация имеет место и в галактике Треугольника (M33). Г. Р. Иванов показал недавно, что и там группировки наиболее голубых звезд имеют поперечник около 80 пк, они обычно находятся в пределах группировок размером около 200 пк (которые ранее и выделялись под названием ОВ-ассоциаций), а эти последние в большинстве входят в весьма обширные комплексы.

Везде, где возможно достаточно детальное исследование, мы видим одну и ту же картину — подавляющее большинство ОВ-звезд образуют вложенные друг в дру-



га группировки с характерным диаметром около 80, 250 и 700 пк: ассоциации, агрегаты и комплексы, причем комплексы объединяют уже и большинство более старых звезд высокой светимости, до возраста в 100 млн. лет. О наличии в этих группировках звезд класса А и более поздних (старых) трудно что-либо сказать. Судя по данным о Местной системе, их мало или нет совсем; вполне возможно, что они рождаются и остаются в гравитационно связанных группировках — в скоплениях. Ассоциации явно гравитационно не связаны, а комплексы если и связаны, то слабо (впрочем, надежных данных нет). Местная система показывает и вращение и расширение, указывающее на возраст около 50 млн. лет, близкий к возрасту наиболее старых из входящих в нее скоплений. Показывает признаки вращения (по данным Е. Д. Павловской) комплекс цефеид и скоплений в созвездиях Наугольника и Южного треугольника на расстоянии около 1,5 кпк от Солнца; если этот комплекс

гравитационно связан, то масса его тогда около 10 млн. солнечных, что, конечно, больше суммарной массы скоплений и цефеид. Размер плотных группировок цефеид в БМО меньше, чем расстояние, на которое могли бы уйти цефеиды, учитывая их возраст и наблюдаемую дисперсию скоростей, — это признак гравитационной связанности этих плотных комплексов.

Таким образом, старый вывод о групповом образовании звезд необходимо дополнить заключением и о совместном образовании звездных скоплений и ассоциаций в составе обширных комплексов — по крайней мере массивные звезды редко образуют одиночное скопление. Этот новый фундаментальный факт имеет, конечно, большое значение для понимания процесса звездообразования; требует объяснения и явное наличие предпочтительных размеров у очагов звездообразования\*.

## **Глава 6. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ**

Много лет молодые звезды наблюдаются по соседству с газопылевыми облаками или (в инфракрасном диапазоне) внутри них. Но только к середине 70-х годов стало ясно, что эти облака состоят в основном из молекулярного водорода. Непосредственно молекулы можно обнаружить лишь по линиям поглощения в далекой ультрафиолетовой части спектра горячих звезд, и на практике изучение молекулярных облаков ведется на длине волны 2,6 мм, на которой излучают молекулы CO, образующиеся при тех же условиях, что и молекулы H<sub>2</sub>, на 5 порядков более многочисленные. Эти условия — большая плотность межзвездного газа, достаточная для экранизации от разрушающего молекулы коротковолнового излучения горячих звезд. При суммарной плотности атомов и молекул водорода, превышающей 100 частиц на 1 см<sup>3</sup>, весь газ становится молекулярным. Частицы пыли способствуют и образованию молекул, и экранизации диссоциирующего их излучения, так что темные облака, поглощающие свет звезд, — это молекулярные облака.

---

\* Подробнее см.: Ефремов Ю. Н. Очаги звездообразования в галактиках. — М.: Наука, 1989.

Облака  $\text{CO} + \text{H}_2$  можно наблюдать во всей Галактике, даже если они находятся на одном луче зрения. В этом случае помогает различие лучевых скоростей — молекулярные облака как крайние представители населения I вращаются по практически круговым орбитам и, зная кривую вращения Галактики, по долготе и лучевой скорости можно определить и расстояние до облака. Правда, для облаков, лежащих внутри орбиты Солнца, зависимость лучевой скорости от расстояния при данной долготе дает два решения, из которых обычно можно выбрать более вероятное, особенно если виды связанные с облаком молодые звезды.

Первые результаты наблюдений на длине волны 2,6 мм, охватывающих всю Галактику, были опубликованы в 1975 г. Сквиллом и Соломоном, а также Бертоном и его сотрудниками. При этом выяснилось, что молекулярный водород сосредоточен в кольцеобразной зоне на расстояниях 0,4—0,8 (в долях расстояния Солнца) от центра Галактики — и в нем самом. Соломон и Сквилл нашли, что общая масса  $\text{H}_2$  в Галактике составляет  $(1 \div 3) \cdot 10^9$  масс Солнца и что излучение приходит от облаков массой около  $10^4$  солнечных. Оценки полной массы не вполне точны, поскольку приходится опираться на соотношение численностей молекул  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , зависящее от содержания тяжелых элементов, доля которых нарастает к центру Галактики. Но сегодня нет сомнений в том, что львиная доля массы  $\text{H}_2$  заключена в области гигантских облаках: 90% массы заключено в облаках с массами, превышающими  $8 \cdot 10^4$ , а 50% —  $10^6$  масс Солнца (рис. 6).

Последующие работы показали, что облака, связанные с формирующимися в них массивными звездами и тесно коррелирующие с областями III, образуют, как правило, гравитационно связанные скопления массами  $(2 \div 6) \cdot 10^6$  солнечных и размерами 50—150 пк. Таково, например, скопление гигантских молекулярных облаков (ГМО), в котором находится радиоисточник W44: в нем 8 ГМО и диаметр каждого не менее 20 пк. Мы видим, что массы молекулярных облаков намного больше, чем массы скоплений и ассоциаций, которые они порождают; лишь наименьшие ГМО близки по массам к наиболее массивным шаровым скоплениям. Оказалось, что ГМО составляют наибольшее по численности население наиболее массивных объектов Галактики — и всего каких-то

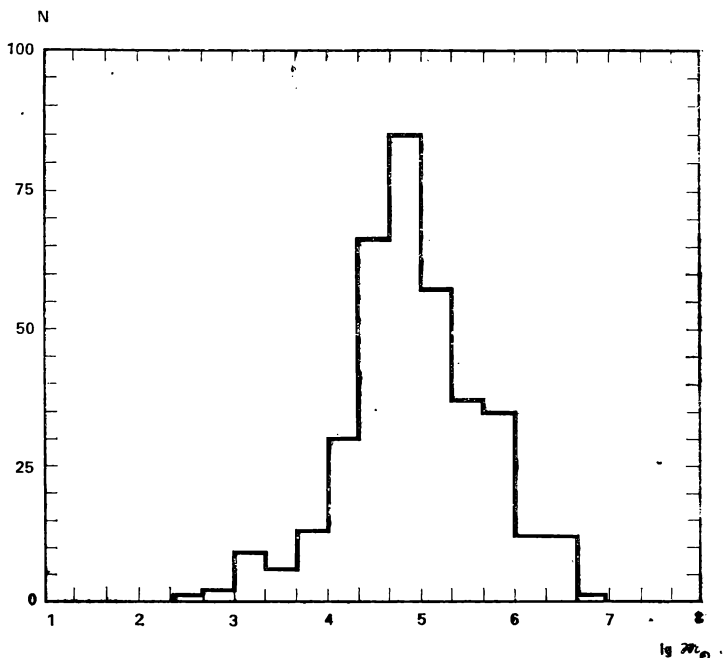


Рис. 6. Распределение по массам молекулярных облаков в I галактическом квадранте (долготы от 8 до 90°) по работе П. Соломона и др.

14 лет назад мы и понятия не имели об их существовании!

Распределение атомарного водорода в Галактике более равномерно; доля его нарастает по отношению к  $H_2$  с удалением от молекулярного кольца. С 60-х годов известны сверхгигантские облака HI (и в нашей, и в других галактиках) с массами  $10^6$ — $10^8$  солнечных и размером порядка 1 кпк. Именно с такими облаками мы связывали в 1975—1978 гг. происхождение звездных комплексов; данные о существовании ГМО только-только начинали появляться. Последующие исследования и в особенности появившаяся в 1983 г. статья американских астрономов Брюса и Деборы Элмегрин показали, что сверхгигантские облака, часто включающие области HI и, следовательно, звездные группировки с O-звездами, встречаются достаточно часто и должны быть гравитационно связанными. При этом в спиральных

галактиках они часто распределены вдоль рукавов через примерно одинаковые расстояния — порядка 1—4 кпк. Такую регулярность Элмегрины сочли аргументом за то, что эти облака появляются в результате развития гравитационной неустойчивости в газовом диске галактики при участии магнитного поля. Характерное расстояние между возникающими под действием этой неустойчивости уплотнениями среды (джинсовская длина волны) зависит от ее плотности.

Постепенно накапливалось все больше признаков того, что ГМО и их скопления расположены внутри сверхоблаков HI. Этого и следовало ожидать, если вспомнить, что образование молекул  $H_2$  возможно лишь при достаточной плотности HI. В 1985—1987 гг. концентрацию молекулярного водорода в областях наибольшей плотности пыли и HI выявили японские астрономы в южном спиральном рукаве (S4) галактики Андромеды; наблюдения велись на крупнейшем из пригодных для работы на длине волны 2,6 мм радиотелескопе диаметром зеркала в 45 м в Нобеяма, близ Токио. (Любопытно отметить, что близость огромного города несколько не мешает наблюдениям в этом диапазоне; американцы вообще вели изучение распределения CO в Галактике с антенной диаметром 1 м, работавшей на крыше одного из небоскребов в Нью-Йорке, который столь же «тих» на волне 2,6 мм, как и во времена Гудзона, как высказался один из участников наблюдений.) Было достигнуто разрешение в  $17''$ , что и позволило сделать столь уверенные выводы.

В совместной работе американские и японские астрономы (Ш. Лада, Н. Накаи и др.) получили весьма важные данные о соотношении атомарного и молекулярного водорода в пылевой полосе внутри слабо выраженного рукава S3 в той же галактике M31. Они нашли, что 20% водорода в этом рукаве находится в молекулярном состоянии, причем (как и в рукаве S4), начиная с некоторой (пороговой) плотности атомарного водорода, избыточная над ней плотность создается именно молекулами водорода. Превышение плотности газа в рукаве над наблюдаемой в межрукавном пространстве составляет более 25 раз для CO (т. е.  $H_2$ ) и 2—6 раз для HI. Наличие пороговой плотности и этот резкий контраст скачка плотностей молекулярного и атомарного водорода в рукаве можно совместить, только предположив, что  $H_2$  и образуется в рукаве после того, как плотность HI превысит пороговую вследствие образования в рукаве гигантских облаков HI. Результаты Лада, Накаи и др., таким образом, противоречат высказываемому часто предположению о том, что ГМО образуются в рукавах след-



ствии сближения орбит мелких облаков и их слияния в ГМО в рукавах. В межрукавном пространстве почти нет ГМО, они «созревают» внутри достаточно больших облаков HI — сверхоблаков, как их назвали Элмегрины. Образоваться же сверхоблакам легче в рукавах, поскольку там больше плотность HI, больше магнитное поле и меньше дифференциальность вращения. Последнее, впрочем, справедливо лишь для регулярных рукавов, связанных со всегалактической спиральной волной плотности (см. гл. 9).

В 1987 г. данные о концентрации ГМО внутри сверхоблаков HI были получены и для нашей Галактики. В I квадранте галактических долгот Элмегрины нашли 38 сверхоблаков HI с массами  $10^6$ — $10^7$  солнечных, причем доля  $H_2$  в них убывает с расстоянием от центра с 70 до 5%. В том же году распределение  $H_2$  и HI изучили в спиральном рукаве Киля американские астрономы (Д. Грабелски и др.). По их данным, плотность молекулярного водорода в рукаве оказалась в 13 раз больше, чем в межрукавном пространстве, и каждый пик HI в рукаве Киля сопровождается пиками плотности  $H_2$  — рукав состоит из дискретных сверхоблаков HI, внутри которых, как косточки в вишне, расположены ГМО. При этом вблизи достаточно близких молекулярных облаков всегда находятся молодые скопления (а дальше они труднообнаружимы). Особенно отчетливо связь ГМО и скоплений видна в области  $\eta$  Киля, где рядом с молекулярным облаком и областью III находятся три очень молодых скопления с O-звездами и поодаль — три более старых, вокруг имеются и цефеиды. Вся область в целом является прекрасным примером звездного комплекса с продолжающимся — но начавшимся давно — звездообразованием. Было бы очень важно понять, от чего зависит дисперсия возрастов в комплексе.

По данным Грабелски и его соавторов, ветвь Киля прослеживается по конденсациям HI— $H_2$  на протяжении 23 кпк, и эти конденсации расположены через каждые 0,7 кпк. Примерно таково и расстояние между сверхоблаками в рукаве Стрельца, который, соединяясь с рукавом Киля, тянется уже не менее чем на 40 кпк, охватывая угол в  $200^\circ$  при центре Галактики. Такая же регулярность прослеживается и в распределении вдоль рукавов звездных комплексов в галактике Андромеды, по крайней мере в ее северо-западной части, где рукава не накладываются друг на друга в проекции (из-за искривления плоскости M31). Надо сказать, что эти

комплексы в подавляющем большинстве не были бы обнаружены, находись они в более далекой галактике. Концентрация относительно молодых звезд в гигантских комплексах вполне может быть общим правилом, как и регулярность расположения их вдоль рукавов.

Таким образом, существование звездных комплексов действительно связано с аналогичной крупномасштабной неоднородностью в пространственном распределении звездообразующих облаков. Изолированные, не входящие в состав комплекса (который может быть обнаружен и как группа молодых скоплений) молодые скопления с массивными звездами редки, поскольку порождающие их ГМО возникают только в недрах сверхоблаков II группами и в течение довольно длительного времени; на смену облакам, разрушенным горячими звездами и сверхновыми, приходят новые, сконденсировавшиеся поблизости в пределах того же комплекса, и они вновь рождают скопления.

Но эта точка зрения не является общепризнанной. Мы уже говорили о том, что слияние мелких облаков в гигантские рукава не может быть единственным механизмом происхождения ГМО. Регулярность распределения комплексов (и ГМО внутри них) в рукавах и наличие их в неправильных галактиках свидетельствуют об этом. Более серьезной альтернативой предположению о том, что исходная причина концентрации звездообразования в гигантских комплексах связана с существованием сверхоблаков II, рождающихся в результате крупномасштабной гравитационной неустойчивости, является привлечение процесса самораспространяющегося звездообразования. Звездный ветер от горячих звезд, расширяющиеся от них зоны III, взрывная волна от сверхновых могут уплотнить облака окружающего газа до плотности, достаточной для их коллапса и начала звездообразования; процесс повторяется и распространяется все дальше и дальше (подобно эпидемии, как заметил когда-то все тот же Вальтер Бааде\*). Имеются указания, что характерный масштаб, охватываемый таким «эпидемическим» звездообразованием, составляет около 1 кпк, но детальных работ на эту тему нет. Воздействие внешних факторов может, очевидно, повысить плотность облака до величины, достаточной для начала звездообразования лишь в том случае, если она уже достаточно велика или если это воздействие весьма сильно. В ударной волне, связанной с галактической спиральной волной плотности, скачок плотности может достигать десятков раз, но воздействие звезд вряд ли может быть столь же мощным. Во всяком случае непонятно, как звезды могут передать эстафету звездообразования по пространству между облаками, где плотность газа невелика. Известно также, что внешнее воздействие во всяком случае не является необходимым условием для начала образования массивных звезд;

---

\* См.: Эволюция звезд и галактик. — М.: Мир, 1966.

они зарождаются и там, где нет никаких признаков наличия внешнего «триггерного» механизма (просто при достаточной плотности газа).

Высокая плотность и низкая температура — два необходимых и достаточных условия для того, чтобы первоначально однородная газовая среда, согласно критерию Джинса, распалась на облака. При достаточном размере случайного возмущения плотности в газе силы гравитации преодолевают силы газового давления и такое возмущение сохранится; размеры и масса этих возмущений должны быть больше при повышении температуры газа и меньше с ростом его плотности. Температура и плотность конденсаций (ядер) в молекулярных облаках таковы, что они действительно могут фрагментировать на массы, близкие к звездным, а некоторые авторы считают, что молекулярные облака состоят из «капелек», являющихся уже готовыми протозвездами.

Физика процесса звездообразования прекрасно описана в недавней брошюре С. А. Ламзина и В. Г. Сурдина\*, и нет необходимости здесь возвращаться к этому вопросу. Мы затронем лишь один, но принципиальный аспект проблемы. Дело в том, что академик В. А. Амбарцумян и его многочисленные единомышленники и до сих пор полагают, что рождение звезд находится вне пределов понимания современной науки, что они рождаются из сверхплотных тел неизвестной природы (именно их они и называют протозвездами) и эти же тела порождают и молекулярные облака. Такую точку зрения среди специалистов разделяют лишь некоторые сотрудники возглавляемой В. А. Амбарцумяном Бюраканской обсерватории и покойный мексиканский астроном Г. Аро. Авторитет В. А. Амбарцумяна и его роль в обосновании представлений о продолжающемся в наше время групповом звездообразовании общеизвестны, но его взгляды на природу протозвезд столь необычны, что иногда их просто не воспринимают; автору пришлось, например, редактируя перевод книги известного американского астронома Б. Бока «Млечный путь», отметить в примечании, что Бок ошибается, приписывая Амбарцумяну вывод о рождении звезд из газовых облаков. Расширение О-ассоциаций было когда-то главным доводом В. А. Амбарцумяна: конденсация диффузной среды может породить только гравитационно связанную систему. Однако давно уже ясно, что энергия, вырабатываемая в недрах звезд при ядерных реакциях (и освобождаемая горячими звездами или при взрывах сверхновых), и служит первопричиной распада О-ассоциаций, звездообразование в которых неэффективно; эти звезды появляются, когда большая часть вещества в протоскоплении остается еще в форме газа, и после его (быстрого) «изгнания» группировка становится гравитационно несвязанной.

О бюраканской концепции можно было бы ныне и не вспоми-

---

\* См.: Что такое протозвезды. — М.: Знание, 1988.

нать, если бы некоторые философы не полагали, что по-прежнему существуют две равноправные гипотезы о происхождении звезд, и если бы не высказывание самого В. А. Амбарцумяна, сделанное в 1982 г., но опубликованное на русском языке недавно\*. «Обобщенная картина происхождения всех туманностей в Галактике из масс, выброшенных плотными телами, в настоящее время кажется более привлекательной, чем когда-либо». И далее: «Хотя идея коллапса произвела в свет большое число диссертаций, она оказалась почти бесплодной в объяснении того, как образуются звезды».

Отсутствие наблюдательных свидетельств существования объектов, находящихся в стадии гравитационного сжатия (коллапса), переходных между наиболее плотными облаками газа и собственно звездами, служило пищей не только для таких высказываний; оно отмечалось еще в 1985 г. на симпозиуме Международного астрономического союза по теме «Области звездообразования» как серьезная проблема, для решения которой предлагалось искать протозвезды в ядрах молекулярных облаков — в областях с очень большим поглощением света и очень большой плотностью газа. И всего лишь через год после этого симпозиума начали появляться данные о том, что среди инфракрасных источников, из ближайших окрестностей которых принимается излучение молекулы CS, рождающееся в наиболее плотных областях, действительно имеются настоящие протозвезды — сжимающиеся объекты с плотностью, промежуточной между плотностью звезд и туманностей. Таков, например, ИК-источник IRAS 16293—2422, находящийся в темном облаке в Змееносце на расстоянии около 500 св. лет. Температура его  $\sim 40$  К, масса 0,24 солнечных, а плотность  $10^6$  см<sup>-3</sup>. Форма профиля линии излучения молекулы CS на длине волны 1 мм, наблюдавшаяся Уокером, Ладой и их коллегами на 12-метровом радиотелескопе, свидетельствует о том, что ближайшая к нам часть области, в которой возникает излучение, удаляется от нас, а более далекая приближается: коллапс наблюдается (рис. 7).

Аналогичные данные имеются сейчас уже для десятка объектов, найдены и коллапсирующие протоскопления\*\*. Эти наблюдения очень трудны (и заметим, что с отечественными техническими средствами они абсолютно неосуществимы), да и самих протозвезд в доступных изучению окрестностях Солнца должно быть немного, поскольку это быстрая стадия эволюции. Инфракрасное излучение возникает в диске, на который продолжается «оседание» окружающего протозвезду холодного газа, а вдоль оси вращения протозвезды и диска часто наблюдается биполярное — направленное в противоположные стороны — истечение молекулярного вещества, разлет облачков газа, часто с довольно высокими скоростями.

Эти биполярные истечения были обнаружены к 1980 г. и послужили главной причиной реанимации представлений о рождении звезд при распаде, разлете неких протозвездных тел. Сейчас ясно, что массы этих разлетающихся облачков (мазерных источников излучения H<sub>2</sub>O, объектов Хербига—Аро) ничтожны; ориентация направлений разлета вдоль оси вращения и вдоль магнитного поля показывает, что мы наблюдаем протозвезду в процессе рождения

\* См.: Амбарцумян В. А. Избранные статьи. — М.: Знание, 1988.

\*\* Подробнее см.: Ефремов Ю. Н. Очаги звездообразования в галактиках. — М.: Наука, 1989.

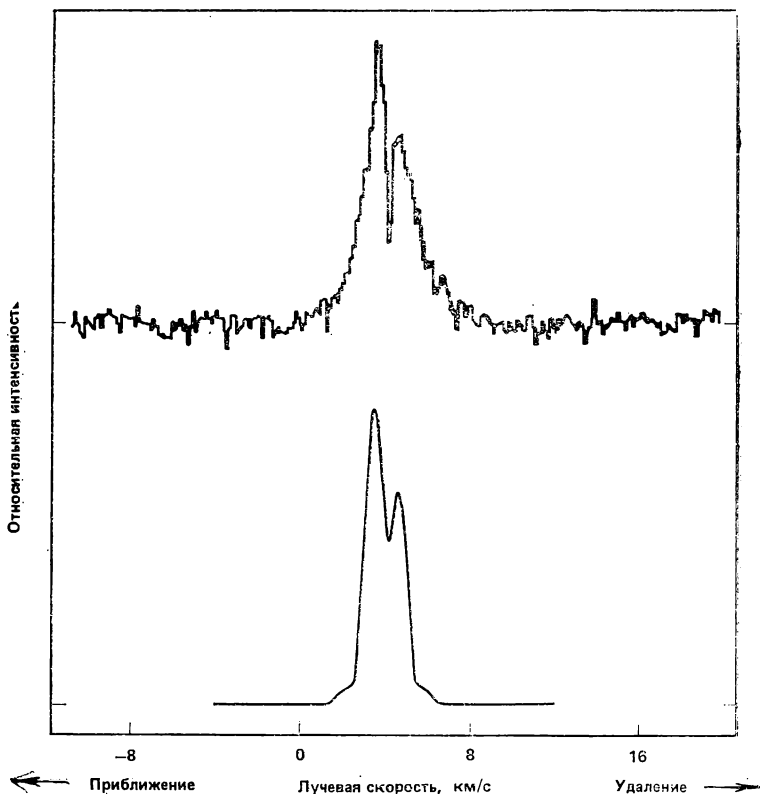


Рис. 7. Наблюдаемый (наверху) профиль линии молекулы CS и теоретический (внизу) профиль линии излучения, который должен наблюдаться у коллапсирующего молекулярного облака (данные Ш. Лада для ИК-источника в Змееносце)

или крайне молодую звезду — на диск еще продолжается аккреция окружающего вещества, а по оси вращения выбрасываются, вероятно, под влиянием звездного ветра излишки вещества; возможно, разбегаются и облачка, генетически не связанные с протозвездой. Тут есть еще трудности, формирование звезды сопровождается и довольно бурными процессами, но мы знаем теперь с уверенностью, из чего образуются звезды... В косвенной форме и В. А. Амбарцумян признает возможность звездообразования из диффузного вещества: «Возможно также, что сначала было выброшено туманное вещество, а затем образовались звезды». Но молекулярные облака нет необходимости откуда-то выбрасывать. Единственным основанием для такого предположения представляются слова

Франсуа Ларошфуко: «Люди упрямо не соглашаются с самыми здравыми суждениями не по недостатку проницательности, а из-за избытка гордости: они видят, что первые ряды в правом деле разобраны, а последние им не хочется занимать»...

## Глава 7. СОСЕДНИЕ ГАЛАКТИКИ

Невозможно понять природу какого бы то ни было объекта, не поняв его места в ряду других подобных ему. Это относится и к нашей звездной системе, сколь уникальной она нам бы ни казалась. Мир галактик исключительно разнообразен, не похожи друг на друга и галактики, относимые к одному и тому же морфологическому типу. Эллиптические галактики (E) — эллипсоиды вращения, или трехосные эллипсоиды, состоящие из звезд населения II и почти не содержащие газа и, следовательно, молодых звезд; сплюснутость их объясняется не вращением всей системы в одном направлении, а соответствующей анизотропией в ориентации плоскостей орбит вращающихся в разном направлении звезд. Спиральные галактики (S), как мы уже говорили, состоят из концентрирующихся к центру объектов населения II и лежащих во вращающемся диске объектов населения I; в диске имеется газ, и в спиральных рукавах продолжается звездообразование. В неправильных галактиках (Irr) доля газа еще больше, но области звездообразования хаотически разбросаны по системе, доля населения II невелика; массы их обычно меньше, чем у галактик S, и соответственно меньше и максимальная скорость вращения, а кривая вращения указывает на его твердотельный характер. У галактик типа S0 (нуль, а не «O», как часто пишут\*) имеется диск и балдж, но они состоят, очевидно, из звезд одного и того же типа, газа и звездообразования (и рукавов) практически нет. Есть еще редкий тип аморфных галактик (называвшихся ранее Irr II), несколько напоминающих галактики S0, с разбросанными в них очагами звездообразования.

Все эти галактики бывают самых разных размеров и масс, но за важным исключением спиральные галактики карликовыми не бывают. Со всей определенностью

---

\* Хаббл Э., который ввел этот тип лет через десять после других, явно имел в виду, что у галактик S0 рукава есть, но они равны ...нулю.

это заключение сделал еще Бааде, и здесь и надо искать ключ к природе спиральной структуры. Степень регулярности этой структуры также зависит от массы галактики: в наиболее массивных галактиках имеются два длинных, симметричных относительно центра спиральных рукава (они совмещаются друг с другом при повороте вокруг оси вращения на  $180^\circ$ , так что регулярные спиральные галактики обладают осью симметрии второго порядка), в наименее массивных имеются как бы обрывки, клочки, фрагменты рукавов, а регулярной спиральной структуры нет.

Эта зависимость степени регулярности спиральной структуры от массы у наиболее регулярных спиральных галактик, а также отсутствие карликовых галактик со спиральными рукавами — путеводная нить к пониманию происхождения спиральных ветвей, которой теоретики почти пренебрегают.

Для понимания нашей собственной системы наибольший интерес представляют исследования ближайших галактик. По поводу нашей собственной мы можем сказать, что изучаем лес, находясь внутри его (и даже не на поляне), в бесчисленных далеких галактиках мы можем исследовать лишь суммарные характеристики составляющих их объектов; наиболее полезны для нашей цели галактики, где мы можем различить индивидуальные звезды хотя бы большой светимости. В этом случае мы как бы пролетаем невысоко над лесом, мы можем различить и породы деревьев, и связь их с особенностями рельефа и друг с другом; в близких галактиках нам доступны важнейшие составляющие «астрогазоценоза» (по аналогии с земными биогеоценозами), мы можем установить связь различных объектов и друг с другом, и с положением в галактике.

На расстоянии 50—150 кпк от центра нашей Галактики находится десяток карликовых неправильных и эллиптических (сфероидальных) систем и две нормальные неправильные галактики — Магеллановы Облака. Большое Магелланово Облако (БМО) имеет массу около  $6 \cdot 10^9$  солнечных, не менее 10% приходится на газ, намного больше, чем в Галактике и в М31; десяток областей III в БМО ярче, чем самые яркие в М31. Соответственно и активность современного звездообразования там намного выше, с чем может быть связано и присутствие двух десятков молодых шаровых скоплений. По настоящему старых шаровых скоплений там не более 10, лишь 6 из них содержат переменные звезды типа RR Лиры. Даже и эти скопления находятся в диске БМО (с полутолщиной около

0,5 кпк) — старые объекты, в том числе и красные гиганты, многочисленны и сферической составляющей не образуют. С отсутствием гало, вероятно, связано и отсутствие перерыва в звездообразовании — имеются многочисленные богатые скопления промежуточного возраста, причем более молодые скопления имеют большее содержание тяжелых элементов (хотя и не достигающее солнечного).

На снимках БМО бросается в глаза (помимо бара, состоящего в основном из довольно старых звезд) обширная группа ассоциаций и эмиссионных туманностей над восточным концом бара (рис. 4) — сверхассоциация 30 Золотой Рыбы (30 Dor), самым ярким объектом в которой является собственно 30 Dor — газовая туманность (область III), свечение которой возбуждается «тонущим» в нем на обычных снимках очень молодым шаровым скоплением NGC 2070, точнее говоря, очень яркими и горячими звездами этого скопления. Одна из них (R 136) на 2<sup>м</sup> ярче остальных, и одно время обсуждался вопрос о том, не является ли она сверхмассивной звездой. Оказалось, что за слегка диффузным изображением R 136 скрывается весьма компактная группа из десятка или более звезд O и WR, массивных, очень горячих звезд, теряющих вещество. Эти последние показывают наиболее тесную связь с газом и концентрируются именно в сверхассоциациях — гигантских областях III; из 101 звезды этого типа в БМО в пределах сверхассоциации 30 Dor находится 40, к NGC 2070 они концентрируются еще сильнее.

Аналогичную тесную связь с гигантскими областями III, т. е. очагами современного образования наиболее массивных звезд, показывают остатки сверхновых и сами вспышки сверхновых II типа, отмечающие конец эволюции массивных звезд. Это обстоятельство согласуется с выводом теории о том, что непосредственным предшественником (прогенитором) этих сверхновых являются именно звезды WR. Допускались также красные сверхгиганты, но, скажем, к NGC 2070 они не концентрируются и вообще по многим данным имеют возраст порядка  $10^7$ , а не  $10^6$ , как звезды WR и ярчайшие O-звезды. Отождествление прогенитора Сверхновой 1987 А с голубым сверхгигантом (В31) было поэтому встречено с недоверием, оно сразу снимало возможность вспышки красного сверхгиганта, поскольку даже слабых признаков его наличия не допускали существовавшие данные трехцветной фотометрии этой звезды. Вскоре исчезновение признаков голубого сверхгиганта было зафиксировано и непосредственно; остается только та — хотя и не очень вероятная — возможность, что существовала — и взорвалась — заметно более слабая, чем В-сверхгигант, звезда WR, его тесный компонент, погубивший и соседа при своем взрыве. Впрочем, теория уже вполне смирилась со вспышкой голубого сверхгиганта и его относительной компактностью. Так или иначе эта вспышка — решающее, принципиальное подтверждение основных выводов теории звездной эволюции, утверждающей, что массивная звезда кончает свою активную стадию эволюции вспышкой сверхновой, превращаясь в весьма компактный объект. И действительно, в феврале 1989 г. обнаружены первые признаки появления на месте Сверхновой очень короткопериодического пульсара — сверхплотной нейтронной звезды.

Заметим, что, описывая окрестности Сверхновой, мы отмечали,



что она находится вблизи двух очень бедных скоплений\* (точнее, двойного скопления), а недавно греческие астрономы (Е. Контизас и др.) среди выделенных ими и необозначенных ранее бедных скоплений под № 80 обозначили и это мини-скопление (чего автор сделать не догадался, но греческие коллеги зато не заметили Сверхновой рядышком, глядя только на старые снимки). Сверхновая вспыхнула в короне бедного двойного скопления, и это лишнее доказательство молодости прогенитора.

Недавно в БМО выявлены и гигантские молекулярные облака; в пределах сверхассоциации 30 Дог находится 10 ГМО общей массой  $6 \cdot 10^7$  солнечных; это на два порядка больше, чем масса ионизованного водорода в туманности вокруг самой 30 Дог, насыщаемой часто Тарантулом за паукообразную форму. Ни в нашей Галактике, ни в МЗ1 нет столь гигантских областей НII. Если бы Тарантул был на расстоянии туманности Ориона (450 пк), которая видна невооруженным глазом как туманная звездочка в мече Ориона, она заняла бы все созвездие и светила бы как Луна в полнолуние...

В соответствии с небольшой массой максимальная скорость вращения БМО не превосходит 100 км/с, и почти на всем протяжении вращения Облака твердотельное; концентрация массы к центру практически отсутствует, и сам центр ничем не выделен. Поперечник непосредственно наблюдаемой части БМО около 9 кпк, но связанные с ним звезды и скопления встречаются и гораздо дальше, они соединяют БМО и с Малым Магеллановым Облаком и, по-видимому, с нашей Галактикой. Оба Облака соединены также водородными облаками, простирающимися и дальше по тому же большому кругу (с центром в центре нашей Галактики), на нем же лежит ряд карликовых неправильных галактик. Этот Магелланов поток является, очевидно, результатом приливного воздействия Млечного Пути на Магеллановы Облака, но не исключено, что вообще все его население — результат встречи с Галактикой более невезучей системы. Подобные полярные круги известны сейчас вокруг ряда галактик.

Малое Магелланово Облако вообще нельзя рассматривать как самостоятельную галактику; это два куска Магелланова потока, процирующихся друг на друга и разделенных примерно 20 кпк. Отличаются не только расстояния относящихся к разным частям ММО объектов, но и их лучевые скорости, как и скорости соответствующих облаков водорода. Весьма большая глубина ММО по лучу зрения подозревалась нами давно — просто потому, что поверхностная плотность цефеид в нем намного больше, чем в БМО (соответственно 116 и 28 звезд на кпк<sup>2</sup>), но дело оказалось еще хуже...

Система Млечного Пути, Магеллановы Облака и десяток окружающих карликов образуют единое семейство, явно связанное взаимной гравитацией. Вместе с семейством галактики Андромеды и пятком других карликовых галактик они входят в Местную группу галактик, состоящую примерно из трех десятков членов в объеме поперечником около 2 Мпк. Подгруппа Андро-

---

\* См.: Ефремов Ю. Н. // Природа. — 1987. — № 5.

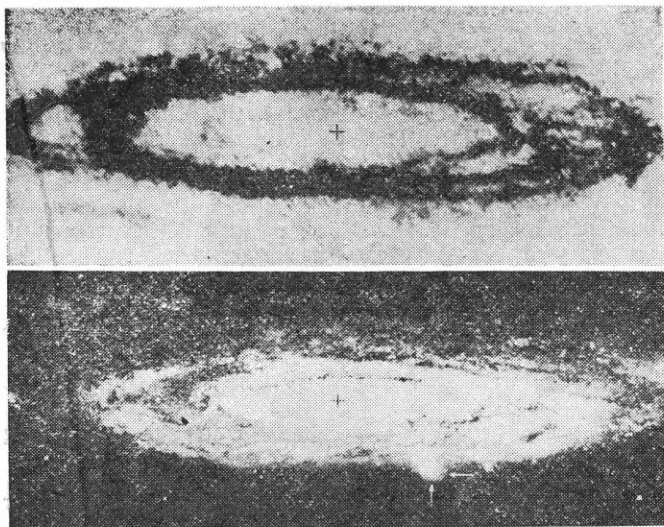


Рис. 8. Галактика Андромеды в линии  $H\alpha$  (наверху) и в синих лучах. Стрелки указывают ее спутник — M32

меды, помимо самой этой гигантской спиральной галактики, включает ее четыре эллиптических спутника (два из них совсем рядом, и M32 даже проецируется на спиральный рукав, рис. 8) и три карликовые сфероидальные галактики; к этой же подгруппе можно отнести и спиральную галактику M33, находящуюся примерно в 200 кпк от M31.

В состав Местной группы входят еще три неправильные галактики, намного меньшие, чем БМО, но похожие на него: NGC 6822, IC 1613 и так называемая система Вольфа—Лундмарка—Мелотта. Огромный комплекс голубых звезд на окраине IC 1613 навел в свое время Бааде на мысль о распространяющемся, подобно болезни, звездообразовании: «Я просто не мог понять, — писал он, — как господе ухитрился загнать эти звезды в один угол».

Наибольшим по массе и размерам членом Местной группы является туманность Андромеды — спиральная галактика M31, единственная на северном небе, видимая невооруженным глазом. Ее спиральные рукава, как и у подавляющего большинства галактик, имеют сравнительно низкую поверхностную яркость и не видны даже в большой телескоп — заметны только два туманных пятна: центральная область M31 и компактная эллиптическая галактика M32, ее спутник. Но эти рукава сразу же бросились в глаза на первых же достаточно крупномасштабных снимках M31, полученных более 100 лет назад. К сожалению, угол между плоскостью

М31 и лучом зрения невелик (около  $12^\circ$ ), и спиральные рукава предстают как вытянутые эллипсы, заставляющие подозревать наличие широкого кольца, от которого отходят внешние слабые рукава. Расшифровка спиральной структуры М31 затрудняется еще и тем, что подалеже от центра плоскость ее искривлена, как и в нашей Галактике, так что в восточной (от большей оси, нижней на рис. 10) половине М31 (дальше  $\sim 10'$  от центра) луч зрения дважды пересекает ее плоскость. Облака атомарного водорода, изображенные на верхней половине рис. 10, повторяют очертания спиральных рукавов, обрисовываемых звездами большой светимости, а наибольшая плотность  $\text{H I}$  достигается в пылевых полосах, наиболее интенсивные из которых располагаются перед внутренним краем звездных рукавов. Пылевые облака, как мы знаем, — индикаторы молекулярных. И действительно, гигантские молекулярные облака были обнаружены во всех исследованных на СО (немногих пока в М31) участках плотных пылевых облаков (см. гл. 6). Однако средняя интенсивность излучения СО в М31 в 5 раз меньше, чем в Галактике, и соответственно меньше и темп современного звездообразования. Это сказывается и на количестве ОВ-ассоциаций, и на количестве и размерах областей  $\text{H II}$ , которые в М31 на обычных снимках вообще не видны.

Как и в нашей Галактике, все более или менее молодые объекты — от газовых облаков до цефеид и рассеянных скоплений — сосредоточены в М31 в пределах широкого кольца, но оно лежит подалеже от центра, чем у нас (от 8 до 12 — 15 кпк). Ближе к центру нарастает плотность старых звезд населения  $\text{II}$ , шаровых скоплений и Новых звезд, а в пределах 3—4 кпк от центра звезд высокой светимости нет совсем. Отдельные их группировки встречаются вплоть до расстояний 25 кпк от центра этой галактики — в 1,5 раза дальше, чем у нас. На большие размеры и массу М31 указывает и максимальная скорость ее вращения — 300 км/с сравнительно с 250 в нашей Галактике.

Бааде первым установил, что именно области  $\text{H II}$  тянутся вдоль спиральных рукавов М31 и обрисовывают их даже там, где нет ярких звезд. Каждое пересечение большой оси галактики и отрезка спирального рукава (видимого как пылевые облака, звезды высокой светимости или области  $\text{H II}$ ) он обозначил номером с индексом  $N$  к северу от ядра и индексом  $S$  к югу. Таких «рукавов» он насчитал по 7 с каждой стороны — вплоть до расстояния  $115'$  от центра (около 24 кпк). Однако Бааде вовсе не говорил, что в М31 семь рукавов, как это иногда ему приписывают; некоторые из них могут быть последовательными пересечениями с большой осью одного и того же длинного рукава. Скорее всего, у М31 два длинных рукава с небольшим углом закручивания (т. е. почти кольцеобразных) и отходящие от них наружу длинные отроги (шпурь), но кольцеобразную структуру со шпурями нельзя исключить.

В спиральных рукавах галактики Андромеды концентрируются цефеиды всех периодов и все рассеянные скопления (а не только самые молодые, как у нас), но обрисовываемые ими рукава весьма широки, до 2—3 кпк. Наиболее молодые объекты сосредоточены у внутреннего края рукава — по крайней мере в рукаве  $S_4$ , где находится наиболее яркий звездный комплекс в М31, который Ван ден Берг обозначил как ОВ 78 (рис. 9). Он замечен в телескоп и внесен в Новый Генеральный Каталог туманностей и скоплений, составленный Дж. Дрейером сто лет назад и именующийся NGC 206.

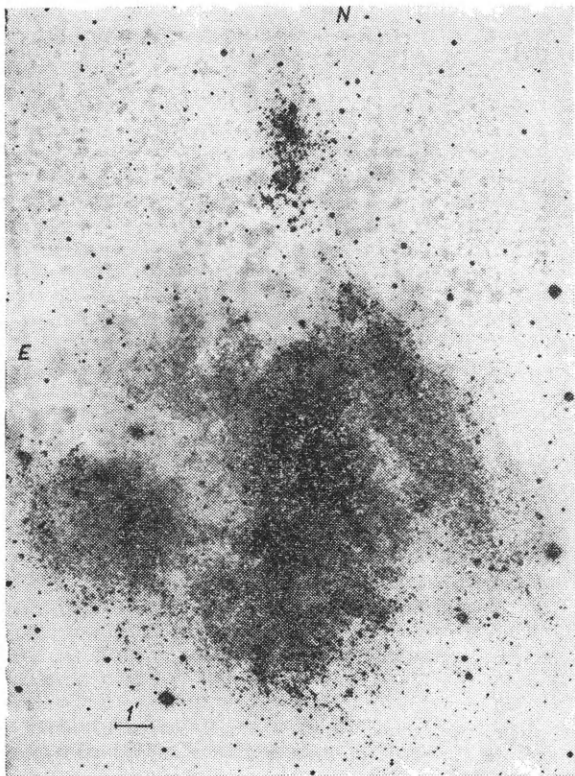
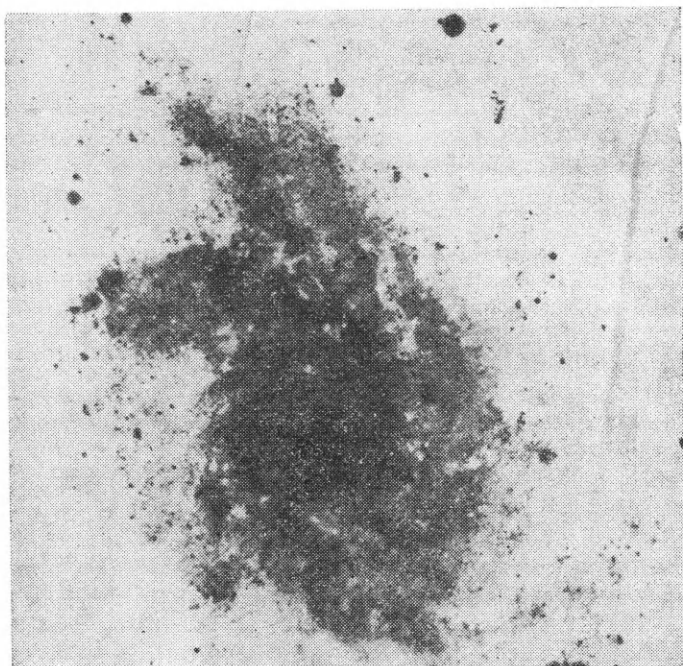


Рис. 9. Участок рукава S4 (юго-запад) галактики Андромеды. Наверху — гигантский звездный комплекс OB78 (NGC 206)

Сама M31 носит в этом каталоге имя NGC 224, а M32 — NGC 221.

Галактика Треугольника (M33=NGC 598) — третий по размерам и массе член Местной группы, она примерно впятеро меньше, чем M31. Это тоже спиральная галактика, но совсем другая (рис. 10). Два широких клочковатых рукава, из которых южный выражен гораздо лучше, доходят до самого центра; имеется и вне их ряд звездных облаков, вытянутых по отрезкам спирали. При желании можно насчитать до десятка таких рукавов. Звезды высокой светимости и молодые скопления встречаются вплоть до самого центра, а балджа из старых звезд практически нет. В самом центре находится не компактное сверхгигантское скопление старых звезд, как в M31, а одно из многочисленных молодых скоплений, края которого, как видно на снимках с высоким разрешением, состоят из звезд высокой светимости. Находится оно к тому же в стороне от динамического центра системы, и не исключено, что в M33 этот центр ничем не отмечен, как и в БМО. В этих обеих галактиках



Р и с. 10. Галактика Треугольника — М33. Слева на конце спирального рукава — гигантская область НII NGC 604, похожая на сверхассоциацию 30 Dog в БМО

население II развито весьма слабо. С этим и может быть связано отсутствие в центре ядра, звезды которого, согласно идее, много лет назад высказанной И. С. Шкловским, образуются из газа, «освободившегося» в конце эволюции звезд сферической составляющей, вытянутые орбиты которых могут подходить близко к центру; разрушение приливными силами шаровых скоплений близ центра — также важный источник вещества для формирования ядра.

Старых богатых (истинно шаровых) скоплений в М33 не более десятка, тогда как в М31 их около 400, зато по интенсивности звездообразования М33 далеко впереди. Там имеются три гигантские области НII, яркие и в оптическом диапазоне, — NGC 588, 595, 604. Последняя из них — настоящая сверхассоциация; масса ионизованного водорода в ней превышает  $10^6$  масс Солнца, не меньше масса молекулярных облаков и атомарного водорода. Внутри NGC 604 имеется и десяток скоплений со звездами O и WR. Сходство с 30 Dog весьма велико, хотя по размерам NGC 604 ближе к Тарантулу, чем ко всей сверхассоциации БМО. В нашей Галактике столь больших областей НII нет.

Две ближайшие к нам спиральные галактики, таким образом, очень не похожи друг на друга\*. На какую же из них похожа наша Галактика?

## Глава 8. СПИРАЛЬНЫЕ РУКАВА

Прежде попробуем ответить на вопрос: почему же мы так уверены, что наша Галактика вообще относится к спиральным. Справедливо отмечая противоречия в локализации ее спиральных рукавов, некоторые физики-теоретики экстраполируют ситуацию и приходят к выводу, что должны быть и астрономы, отрицающие вообще их наличие. Таковых, однако, нет по той простой причине, что наблюдающееся в нашей системе сочетание характеристик бывает только у спиральных галактик. Прежде всего мы видим Млечный Путь, мы видим обилие газа и звезд высокой светимости. Это означает, что мы находимся в дисковой системе с активным звездообразованием. Но это не может быть неправильная галактика, потому что мы видим обилие объектов населения II, видим балдж, а кривая вращения указывает на большую массу и сильную ее концентрацию к центру. Этого не бывает у неправильных галактик, в том числе и у Iгг II (аморфных). В окрестностях Солнца мы непосредственно видим фрагменты спиральных рукавов, а во всей Галактике мы ныне наблюдаем концентрацию звездообразующих молекулярных облаков в длинные дуги. Как связать их в единую картину спирального узора — это другой вопрос, но узор существует!

Прежде чем говорить о расшифровке спиральной структуры Галактики, необходимо понять, какого она типа — регулярного или фрагментарного. В свое время Хаббл ввел подтипы спиральных галактик — от Sa до Sd; при переходе от ранних (Sa) к поздним подклассам балдж становится все менее заметным, а рукава — более клочковатыми и слабее закрученными. Кроме того, спиральные галактики делятся на обычные (SA) и галактики с перемычкой, баром (SB), причем последние составляют большинство. В последние годы растет, однако, убеждение, что степень регулярности спиральной структуры не менее важна и может отражать генезис спиральных рукавов. Б. Элмегрин и Д. Элмегрин ввели

---

\* См.: Шаров А. С. Туманность Андромеды. — М.: Наука, 1982; он же. Спиральная галактика M33. — М.: Наука, 1988.

недавно классификацию галактик, разделив их на 12 классов по степени регулярности спиральной структуры — от хаотически разбросанных фрагментов рукавов (1-й класс) до длинных, симметричных относительно поворота на  $180^\circ$  вокруг центра рукавов (12-й класс). Эта классификация, впрочем, так же как и хаббловская, пока не является количественной. Построение единой объективной классификации — дело будущего, однако уже сейчас ясно, что не имеет смысла использовать те или иные особенности данной галактики как аргумент в спорах о природе спиральной структуры, не указывая класса ее рукавов.

Фрагментарная спиральная структура явно связана с дифференциальностью вращения галактик, благодаря которой любая несвязанная гравитационно группировка звезд вытягивается в обрывок рукава, — звезды, более близкие к центру галактики, движутся быстрее. Чтобы породить структуру, похожую на наблюдаемую, группировки должны быть достаточно большими (в сотни парсек) и звездообразование должно в них длиться достаточно долго (десятки миллионов лет). Иными словами, это должны быть звездные комплексы, описанные в гл. 5. Такие растянутые комплексы — обрывки рукавов — возникают и исчезают, существуя не более сотни-другой миллионов лет, но в целом их совокупность, фрагментарная спиральная структура галактики сохраняется долго. Исходные очаги звездообразования могут быть и гораздо меньшими, и короткоживущими, но тогда звездообразование должно само себя поддерживать и распространяться на соседние газовые облака, «оставляемые» к очагу дифференциальным вращением. Именно такую картину развивают Г. Герола и П. Сейден, но возбуждение звездообразования звездами же и особенно передача его через межоблачное пространство нуждаются еще в обосновании. Картина фрагментарной спиральной структуры как совокупности растянутых дифференциальным вращением звездных комплексов представляется автору более естественной\*.

Такой структурой обладают три четверти спиральных галактик. Проблему составляют не они, а регулярные галактики. Длинные рукава иногда возникают и при моделировании по рецептам Геролы и Сейдена, но симметричность рукавов и наличие в них старых звезд воспроизвести нельзя. Регулярные рукава считаются волновыми: существует твердоотельно вращающийся спиральный узор добавочного к осесимметричному гравитационного потенциала, в котором звезды и газовые облака, двигающиеся с другой скоростью, как бы «застревают». На газовые облака, дисперсия скоростей которых невелика, потенциальная яма рукава влияет сильнее, плотность газа в рукаве повышается намного больше, чем у звезд. При большой разности скоростей вращения вокруг центра спирального узора с застрявшими в нем облаками и вновь набегающих

\* См.: Ефремов Ю. Н. Очаги звездообразования в галактиках. — М.: Наука, 1989.

на него облаков может возникнуть ударная волна. В этой галактической спиральной ударной волне плотность газа возрастает в десятки раз, что во многих облаках стимулирует их коллапс и быстрое звездообразование. В таких случаях наиболее молодые звезды концентрируются у соответствующего края рукава; наиболее горячие и массивные из них — О-звезды — ионизируют окружающий газ, и возникают видимые и на десятках мегапарсек области III.

Эти области, как правило, видны на стыке пылевой полосы у внутреннего края звездного рукава (пыль, как мы знаем, является индикатором молекул) и собственно рукава. Такая последовательность рассматривается как важнейший аргумент в пользу волновой теории спиральной структуры. Положение более молодых объектов у внутреннего края рукава означает, что газ вращается быстрее, чем спиральный узор, и область коротации (расстояние, на котором скорость твердотельного вращения спиральной волны плотности равна скорости дифференциального вращения галактики) лежит дальше от центра галактики, чем данный отрезок рукава; возможно, что у коротации спиральный узор вообще исчезает.

Реальная картина, конечно, много сложнее; области III встречаются и внутри рукава и между рукавами, а градиент возрастов звезд в рукаве наблюдается редко. Для его возникновения, очевидно, нужно, чтобы доля звезд, рожденная уже внутри рукава, в процессе спонтанного, не стимулированного волной плотности звездообразования была невелика, а стимулирующий звездообразование скачок плотности у края рукава был бы значителен. В свою очередь, этот скачок зависит от разности скоростей узора и вещества (звезд и газа) и от угла закручивания рукава в данном месте (чем дальше рукав от окружности, тем больше скачок). Очевидно, именно этим объясняется наличие градиента возрастов звезд в отрезке рукава S4 галактики Андромеды, найденное автором и Г. Р. Ивановым. Наиболее яркие и, значит, молодые звезды высокой светимости, а также цефеиды наибольших периодов и наименьших возрастов концентрируются у внутреннего края этого рукава; по градиенту возрастов можно найти разность скоростей вращения спирального узора и вещества, а затем и положение коротации. Оно оказывается вблизи рукава S6, в котором действительно не наблюдается асимметрии в поперечном распределении наиболее ярких звезд.

Волновая природа регулярных рукавов не вызывает сомнений, но о механизме их генерации продолжают споры. Нам представляется, что ключевым фактором является резкое преобладание именно двурукавной спиральной структуры и наличие бара или его зачатков (близ центра) у абсолютного большинства таких галактик. Никто не сомневается, что два рукава, отходящих от концов бара, генетически с ним связаны: к мини-бару, обнаруживаемому в центре многих достаточно близких галактик, точно так же подходят спиральные рукава, видимые как полосы пыли. Если же отклонения от круговой симметрии не видны на обычных снимках, то



они обнаруживаются в ближнем ИК диапазоне, наибольший вклад в который (и в распределение масс) вносят старые звезды. Изучив центральные области 11 спиральных галактик на длине волны 0,8 мкм, американские астрономы Зарицки и Ло обнаружили недавно, что все они обладают эллиптическими ядерными балджами, и пришли к выводу, что соответствующее отклонение гравитационного потенциала от осесимметричного может возбудить спиральные волны плотности и вызвать некруговые движения газа близ центра.

Таким образом, можно считать, что в галактиках с регулярной спиральной структурой обнаруживаются либо фотометрические, либо кинематические признаки бисимметричного отклонения распределения масс близ центра от осевой симметрии. Это отклонение вполне способно вызвать появление двух симметричных спиральных рукавов. Особенности движения газа в центральных областях, которые можно объяснить наличием мини-бара или овального ядерного балджа, наблюдаются и в М81, и в М31, и в нашей Галактике.

Последнее обстоятельство является косвенным указанием на регулярность спиральной структуры Млечного Пути, но есть и более определенные данные. Они состоят прежде всего в том, что прослеживаемые по всей Галактике гигантские молекулярные облака и окружающие их сверхоблака Н1 (см. гл. 6), бесспорно, протягиваются в длинные цепочки, простирающиеся на десятки килопарсек. Отсутствие молодых объектов ближе к центру (подобно М81 и М31, но не М33) также типично для регулярных галактик; имеются, кроме того, и признаки градиента возрастов поперек рукава и скачков скоростей вращения. Но ясно также, особенно из данных о распределении молодых объектов вблизи Солнца, что структура не очень-то регулярная; в целом можно согласиться с оценкой Д. Элмегрин, которая приписывает Галактике 6—7-й класс рукавов. Поскольку 10-й и 11-й классы в этой классификации отсутствуют, это гораздо ближе к регулярности, чем к фрагментарности; посередине находится М33 (5-й класс), а изображенная на рис. 3 галактика NGC 6946 имеет рукава 9-го класса.

Оценки хаббловского подтипа нашей Галактики обычно колеблются между Sb и Sc. В целом мы заключаем, что Галактика гораздо больше похожа на М31, чем на М33; ближе она к туманности Андромеды и по

массе, что вряд ли случайно, — регулярные галактики, как правило, массивнее фрагментарных. В М33 признаки волны плотности слабы и проявляются лишь в южном спиральном рукаве. Можно лишь еще и еще раз пожалеть о неудачном угле наклона Андромеды, столь затрудняющем ее классификацию, но заставляющем полагаться на интуицию...

Исследования М31 дали ключ к локализации элементов спиральной структуры Галактики в окрестностях Солнца. Это было проведенное Бааде в 1945—1949 гг. фотографирование М31 на 100-дюймовом телескопе в синих лучах и в лучах водородной линии Н, позволившее выявить в этой галактике около 700 областей НII. Оказалось, что они тянутся вереницами вдоль звездных спиральных рукавов, а иногда продолжают рукав и в том месте, где вместо звезд появляются пылевые облака. В этой работе Бааде впервые показал, что пыль (а значит, и газ) также концентрируется в рукавах, как и звезды высокой светимости: найденные им (или еще раньше Хабблом) шаровые скопления только в тех случаях были заметно ослаблены поглощением света, когда просцировались на спиральные рукава, т. е. просвечивали сквозь них. Сосредоточение областей НII в рукавах также говорило о наличии газа (и конечно, О-звезд) в рукавах, но отсутствие пыли вне рукавов указывало и на отсутствие вне их газа.

Зная об этой работе Бааде, в 1951 г. В. Морган стал искать области НII на северном небе и в конце года доложил о своих поисках на собрании Американского астрономического общества (ему помогали Д. Остерброк и С. Шарплесс). Детали работы остались неопубликованными, и в апреле 1952 г. появилась только краткая статья с чертежом трех отрезков спиральных рукавов, выявляемых по областям НII и расстояниям возбуждающих их О-звезд. Вскоре примерно такое же распределение областей НII было найдено В. Ф. Газе, которая использовала результаты многолетних исследований эмиссионных туманностей, проводившихся ею и Г. А. Шайном в Симензской обсерватории, а в 1958 г. близкие результаты были получены И. М. Копыловым, определившим расстояния О-ассоциацией.

Выводы, полученные по О-звездам и областям НII, вскоре были подтверждены исследованиями звездных скоплений. В 1959 г. Б. Е. Маркарян нашел, что наибо-

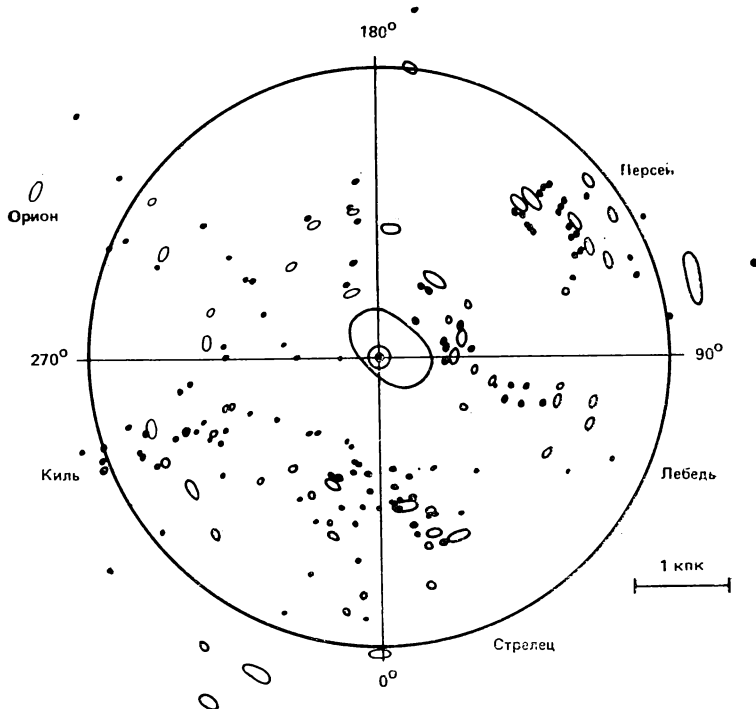


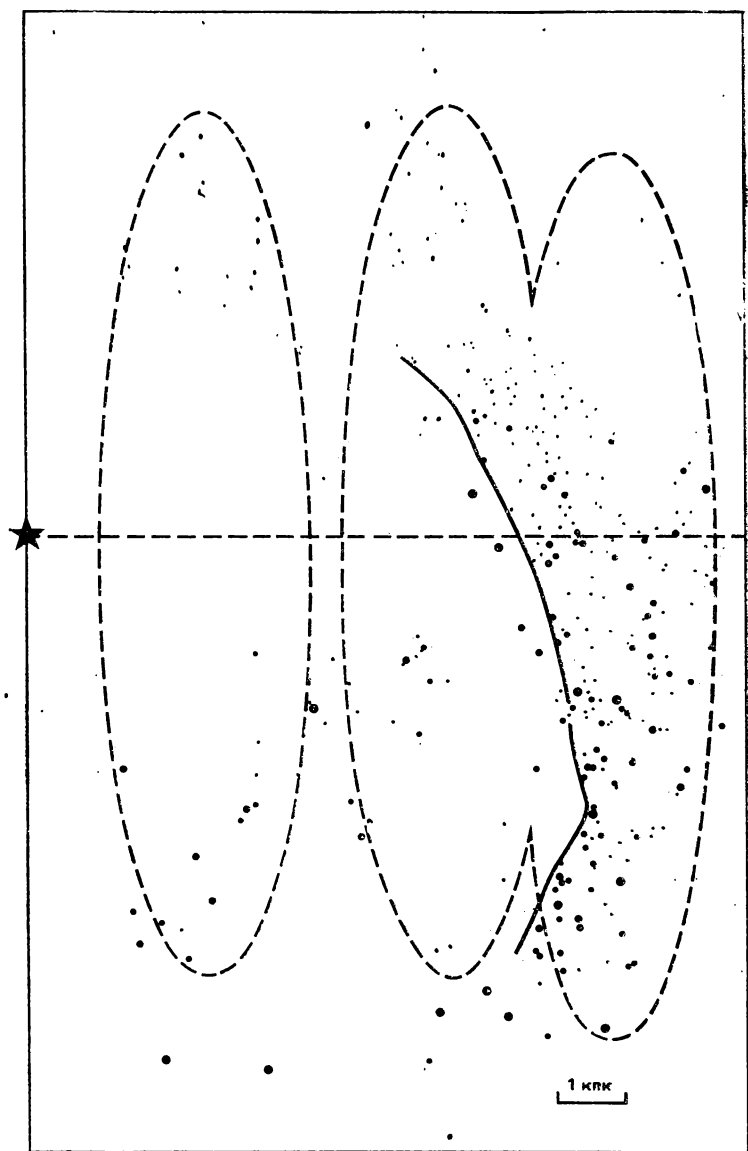
Рис. 11. Распределение молодых скоплений (точки) и ОВ-ассоциаций (овалы) в окрестностях Солнца. Большой овал близ центра — Местная система. За окружностью радиусом 3 кпк данные неполны

более молодые скопления концентрируются в трех отрезках спиральных ветвей, а старые скопления распределены в плоскости Галактики равномерно (см. рис. 1 и 2). На большем материале аналогичный вывод получил в 1963 г. В. Беккер — лишь скопления, содержащие звезды O—B2, концентрируются в этих трех кусках спиральной структуры. Последующие исследования неизменно подтверждают эти заключения: молодые звезды и скопления с возрастом менее  $3 \cdot 10^7$  лет концентрируются в трех вытянутых образованиях, которые можно считать элементами всегалактической спиральной структуры. На рис. 11 приведена современная схема расположения этих трех отрезков рукавов, получивших названия по созвездиям, в направлении которых видны их наиболее выраженные участки (Киль—Стрелец, Орион—Лебедь и Персей).

Но насколько далеко можно экстраполировать эти отрезки? Мы даже не можем сказать, являются ли они деталями независимых рукавов или же отрогами одного-двух. Лишь по косвенным данным делается вывод о том, что рукав Киля—Стрельца и, по-видимому, Персея является частью регулярной спиральной структуры, а рукав Лебеда—Ориона (Местный рукав) — это отрог одного из них, скорее внутреннего.

Данные радиоастрономии, на которые возлагалось столько надежд, пока также не могут обрисовать всегалактическую спиральную структуру. В 1954 г. Я. Оорт, Ван ден Хулст и Мюллер впервые построили картину распределения HI в Галактике, на которой действительно были видны длинные сегменты окружностей, хотя регулярного узора не просматривалось. Однако в определении расстояния облаков HI много неопределенностей, главнейшая из которых состоит в том, что их движения в Галактике считаются круговыми и строго подчиняющимися кривой галактического вращения. В 1974 г. было показано, что отклонений всего лишь в 5—10 км/с от этой кривой достаточно для того, чтобы воспроизвести наблюдаемую картину зависимости лучевых скоростей HI от долготы даже при полностью однородном его распределении в Галактике. Такие отклонения, бесспорно, существуют, и этот вывод В. Бертона, подкрепивший давно существовавшие подозрения, сильно поколебал надежду познать строение всей Галактики (хотя тогда же появились детальные изображения спиральных рукавов M51, M81 и M101 на длине волны 21 см, доказавшие концентрацию в них газа).

Сегодня главные надежды возлагаются на наблюдения молекулярного водорода (по линии излучения CO на волне 2,6 мм), который гораздо сильнее концентрируется к рукавам, чем HI, и гигантские облака которого всегда присутствуют в областях современного звездообразования. Структуру диаграмм долготы — лучевая скорость для ГМО, по крайней мере наибольших из них и теплых (в которых явно присутствуют O-звезды), уже никак не объяснить одними только уклонениями от кругового вращения. Единый длинный рукав Киля—Стрельца прослеживается по этим данным на 40 кпк. Конечно, расстояния молекулярных облаков еще неточны, но тесная связь их с O-звездами и областями HII дает надежду на улучшение результатов.



Y, кпк

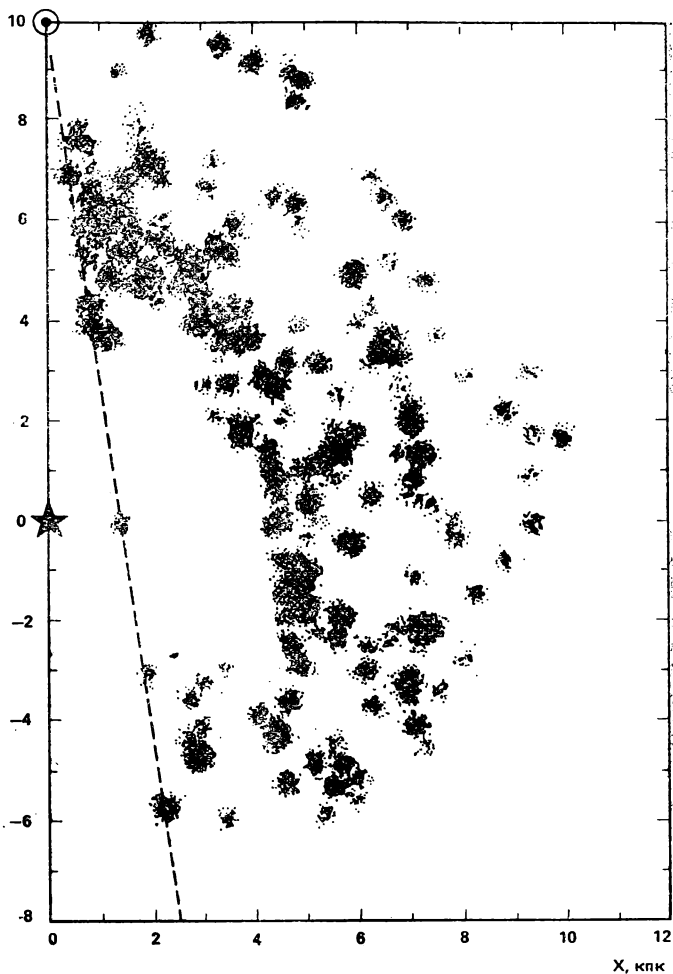


Рис. 12. Распределение цефеид в трех полях (пунктирные эллипсы) галактики Андромеды, переведенное из картинной плоскости в плоскость диска М31. Жирная линия — внутренний край рукава S4. Диаметры кружков пропорциональны периоду. Звездочкой слева отмечен центр галактики Андромеды. Пунктирная прямая — большая ось М31

Рис. 13. Распределение гигантских молекулярных облаков в I квадранте галактических долгот. Начало координат в центре Галактики, Солнце находится в левом верхнем углу. Слева от пунктирной прямой данных нет (по работе П. Соломона и др.)

Сравнение распределения цефеид в М31 и ГМО в Галактике (рис. 12, 13) обнаруживает замечательное сходство — концентрацию молодых объектов в широком кольце, в пределах которого, очевидно, и должны быть наиболее выраженные детали спиральной структуры. Увидеть их нелегко на обоих рисунках — но спиральная структура есть!

На рис. 12 пунктирными овалами изображены области, в пределах которых переменные звезды в М31 изучались на 5-метровом телескопе, и за полноту их открытия можно ручаться, и тем не менее имеются обширные пустые области. Но их нет в распределении цефеид в плоскости Галактики; последние гораздо слабее концентрируются к спиральным рукавам. Это, возможно, подтверждает вывод Л. С. Марочника о том, что Солнце находится близ коротационной окружности, где звездообразование уже не связано со спиральной структурой. Этот вывод означает, что Солнце лишь единственный раз — в эпоху своего образования — было в спиральном рукаве, условия в котором неблагоприятны для возникновения живых существ на Земле (хотя бы из-за близких вспышек сверхновых). Возможно, что вообще все живое в Галактике может существовать лишь вблизи коротации, где миллиарды лет все спокойно... Оказывается, из самого нашего существования можно сделать некоторые выводы о строении Галактики...

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Как открыли галактику Млечный Путь	5
Глава 2. Звездные населения	8
Глава 3. Корона Галактики	14
Глава 4. Галактический диск	19
Глава 5. Звездные комплексы и ассоциации	24
Глава 6. Молекулярные облака и звездообразование	36
Глава 7. Соседние галактики	45
Глава 8. Спиральные рукава	53



Научно-популярное издание

**Ефремов Юрий Николаевич**

**НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ГАЛАКТИКУ**

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *Н. Г. Вирко*

Мл. редактор *С. С. Патрикеева*

Обложка художника *К. С. Гуреева*

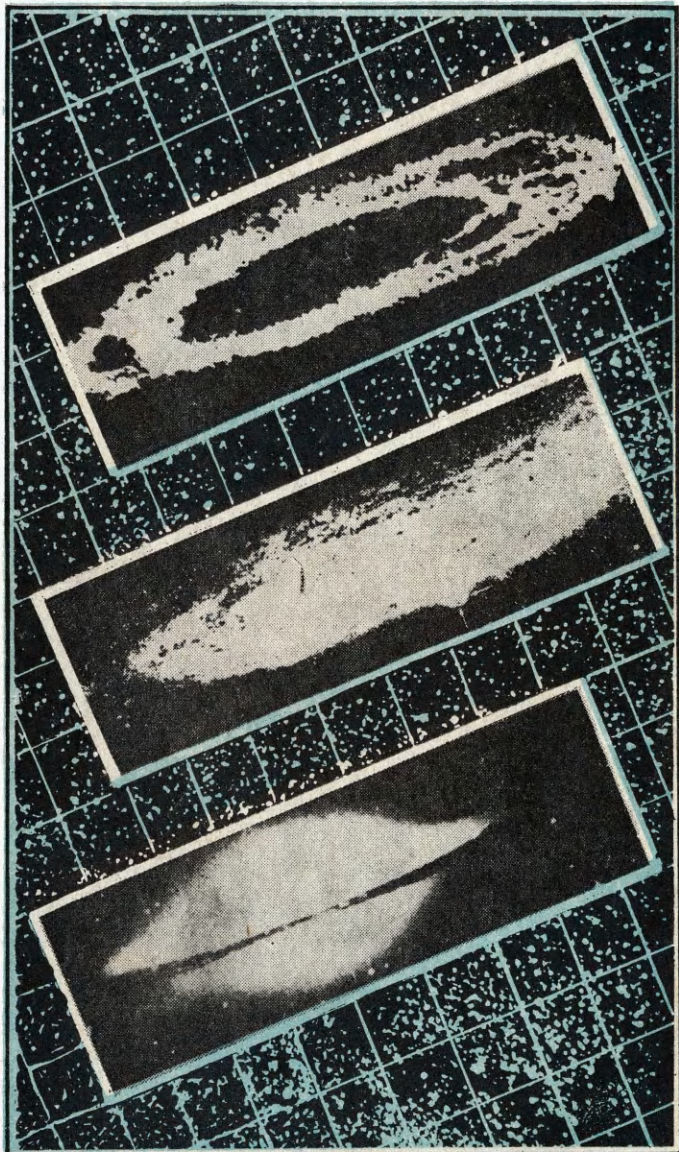
Худож. редактор *К. А. Вечерин*

Техн. редактор *Н. В. Клецкая*

Корректор *В. В. Каночкина*

ИБ № 10069

Сдано в набор 26.06.89. Подписано к печати 11.08.89. Т-91130.  
Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 2. Гарнитура лите-  
ратурная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57.  
Уч.-изд. л. 3,70. Тираж 27 153 экз. Заказ 1219. Цена 15 коп.  
Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд  
Серова, д. 4. Индекс заказа 894209.  
Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр,  
Новая пл., д. 3/4.



СЕРИЯ **КОСМОНАВТИКА,  
АСТРОНОМИЯ**