

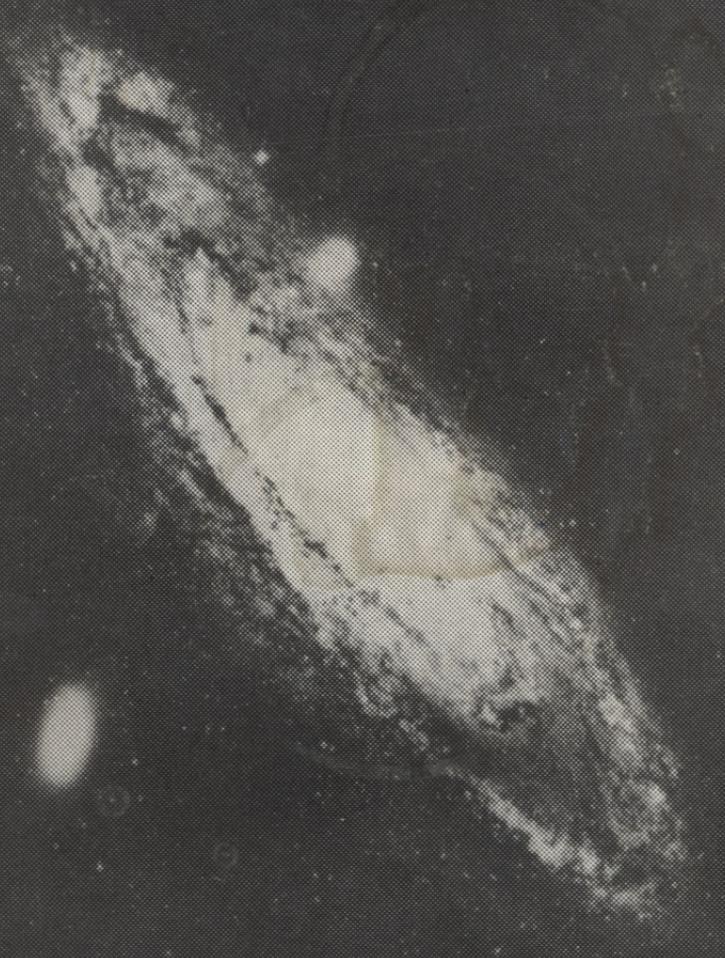
НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

2/1976

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

А.В. Засов
ГАЛАКТИКИ



НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

Серия «Космонавтика, астрономия»

№ 2, 1976 г.

Издается ежемесячно с 1971 г.

А. В. Засов,

кандидат физико-математических наук

ГАЛАКТИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1976

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Галактики — что это такое?	5
Структура галактик	15
Звездное население галактик и химия звезд	23
Газ в галактиках	28
Как в галактиках образуются звезды?	37
Где искать молодые галактики?	50
Ядра галактик	54
Заключение	62
Литература	64

Засов А. В.

3-36 Галактики. М., «Знание», 1976.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 2. Издается ежемесячно с 1971 г.)

Предлагаемая брошюра посвящена галактикам — гигантским звездным системам, подобным нашему Млечному Пути и являющимся «кирпичиками» нашей необъятной Вселенной. В последние годы обнаружен ряд необычных свойств этих небесных объектов, потребовавших по-новому пересмотреть вопросы, связанные с их происхождением и эволюцией.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся проблемами астрономии.

20605—057
3 073(02)—76 60—76

527

Анатолий Владимирович Засов

ГАЛАКТИКИ

Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Обложка *А. Е. Григорьева*.
Худож. редактор *В. Н. Конюхов*. Техн. редактор
Т. Ф. Айдарханова. Корректор *О. Ю. Мигун*.

А 03036. Индекс заказа 64202. Сдано в набор 18/XI 1975 г. Подписано к печати 13/1 1976 г. Формат бумаги 84×108/32. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл.-печ. л. 3,36. Уд.-изд. л. 3,48. Тираж 65 200 экз. Издательство «Знание». 101835. Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 2208. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Невая пл., д. 3/4.

Цена 11 коп.

© Издательство «Знание», 1976 г.

Введение

Открытие галактик — этих гигантских звездных миров — можно отнести к крупнейшим открытиям науки. Оно позволило нам узнать структуру и масштабы Вселенной, понять, какие всеохватывающие изменения происходят в ней со временем.

Раньше человеку Вселенная представлялась миром звезд. Звезды — это газовые шары, в которых собрана почти вся масса вещества, наблюдаемого нами в природе. Мириады и мириады звезд. Среди них есть и очень большие и очень маленькие, есть такие, которые уместились бы в пределах черты крупного города, есть размером с Землю или Юпитер, а встречаются и такие гиганты, что если поместить их на место Солнца, то большая часть планет Солнечной системы оказалась бы в их недрах!

Для звезд характерны огромная, но лежащая в строго определенных пределах масса (10^{32} — 10^{35} г) и более или менее сходный химический состав. В недрах большинства звезд работают созданные самой природой термоядерные реакторы: в них самый распространенный элемент — водород — превращается в гелий, и при этом выделяется энергия, благодаря которой звезды излучают свет.

Расстояния до звезд, как мы знаем, колоссально велики. Лучу света, имеющему максимальную скорость движения в природе $\sim 300\,000$ км/с, требуется несколько лет пути, чтобы дойти к нам только от ближайших звезд. Глядя невооруженным глазом на звезды, мы воспринимаем их свет, идущий к нам сквозь расстояния в десятки, а то и сотни тысяч миллиардов километров.

Но как далеко мы можем наблюдать звезды? Ведь для всякой звезды, каким бы мощным источником света она ни была, существует предельное расстояние, определяемое возможностями телескопа. А что находится дальше этих расстояний? Человек бы никогда об этом, может, и не узнал, если бы не оказалось, что звезды концентрируются в пространстве в гигантские миры — галактики, состоящие из стольких звезд, что общий их свет способен проникать к нам сквозь фантастически большие расстояния.

На нашем северном небе есть такой объект, который также расположен во много раз дальше любой звезды, и тем не менее его можно наблюдать безо всяких оптических инструментов. Этот объект находится недалеко от созвездия Кассиопеи, яркие звезды которого образуют фигуру, напоминающую латинскую букву W. Расположено созвездие по другую сторону от Полярной звезды относительно семизвездного ковша Большой Медведицы (рис. 1). Правее и ниже этой бук-

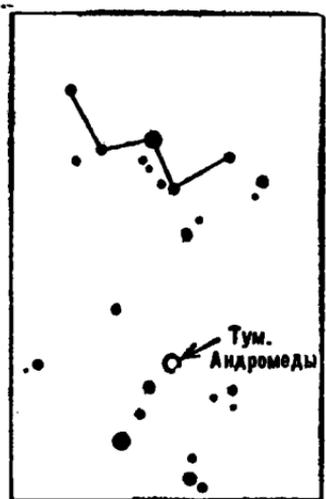


Рис. 1. Схематическое изображение участка звездного неба, на котором указано положение туманности Андромеды. Фигура, похожая на букву W, образована яркими звездами созвездия Кассиопеи. Сама же туманность расположена в созвездии Андромеды

вы W в ясную ночь можно найти слабое туманное пятнышко, известное под названием туманности Андромеды. Это слабое туманное пятнышко как раз и является целым звездным архипелагом — галактикой, и нет на северном небе более далекого объекта, который можно было бы увидеть невооруженным глазом. Наблюдая

эту туманность, мы заглядываем в бездну пространства, для преодоления которого лучу света требуется около 2 млн. лет пути.

Когда дошедший до нас сегодня свет лишь покидал туманность Андромеды, на Земле только-только появился первобытный человек. Шли столетия, тысячелетия, на Земле проходили эпохи оледенения, человек постепенно обживал планету, а лучи света все еще находились в пути. К моменту, когда человек научился выскабливать на стенах пещер изображения мамонтов и других доисторических животных, посланцы туманности Андромеды уже прошли 98—99% своего пути к нам (а в начале нашей эры им оставалось пройти только тысячную долю своего пути). Однако 2 млн. лет — срок очень малый по сравнению со временем жизни абсолютного большинства звезд, поэтому, наверняка, и сейчас туманность Андромеды выглядит так же, как 2 млн. лет назад и какой мы наблюдаем ее в телескоп (см. изображение на обложке).

Галактики — что это такое?

Давайте представим себе, что мы можем двигаться среди звезд со сказочной скоростью, при которой они пролетают мимо нас, как огни городских улиц для едущего в автомашине. Предположим, мы начали свой путь от Солнца, и вот оно быстро уменьшилось и превратилось в светлую точку, затерялось среди тысяч других звезд на черном фоне, а сами звезды поплыли назад, одни — быстрее, другие — медленнее. Перед нами будут разворачиваться все новые и новые звездные панорамы...

Раньше полагали, что при таком нашем воображаемом движении никогда не наступит конец этим звездным россыпям. Теперь мы знаем, что со временем такое путешествие должно привести нас на окраину нашего звездного острова — нашей собственной Галактики¹, подобно тому как автомашина, движущаяся по городу, должна достигнуть его окраин. А далее мы бы

¹ Нашу галактику, в которой мы находимся, принято выделять заглавной буквой — Галактика.

путешествовали в беззвездной черноте. Иными словами, мир звезд, окружающих нас, не беспределен: звезды не равномерно распределены по всему пространству, а образуют островную структуру.

Если бы предельно кратко суммировать то основное, что мы знаем о крупномасштабном распределении звезд, то, наверное, следовало бы сказать так: «Звезды сконцентрированы в гигантские острова — галактики (полная масса большинства которых лежит в пределах от 1 млн. до 1000 млрд. масс Солнца). Помимо звезд, в состав галактик входят: разреженный газ, пыль, твердые тела (например, планеты), магнитные поля, космические лучи. Эти составляющие связаны вместе благодаря гравитационным силам притяжения».

К счастью, пространство между галактиками оказалось совершенно прозрачным для света, что позволяет нам с помощью лучших оптических инструментов наблюдать многие миллионы звездных островов. Правда, на фотографиях в большинстве своем они выглядят лишь небольшими туманными пятнышками с размытыми очертаниями. Но к выводу об «островном» характере распределения звезд во Вселенной ученые пришли не сразу.

После появления сравнительно больших телескопов было обнаружено много светлых пятнышек или, как их называли, туманностей, которые по своему угловому размеру существенно уступали туманности Андромеды.

К середине XVIII в. на небе было найдено 42 туманных пятна, а к 1781 г. французский «искатель» комет Шарль Мессье опубликовал список более 100 туманностей, который и стал их первым каталогом (хотя сам Мессье к этим объектам относился лишь как к нежеланным помехам в поисках комет). До сих пор еще многие туманности обозначаются буквой М, за которой следует номер каталога Мессье. Например, туманность Андромеды в научной литературе обычно встречается под номером М31.

Английский астроном Вильям Гершель, наблюдая небо с помощью им самим изготовленных самых больших для того времени телескопов, за 20 лет — к началу XIX в. — нашел и описал положение около 2500 туманностей, а сын его, Джон Гершель, увеличил это число до 5079.

Однако не все туманные пятна являются далекими галактиками. Некоторые из них еще Гершелю удалось «разложить» на отдельные звезды. Эти туманности оказались многочисленными звездными скоплениями нашей Галактики. У других туманностей свечение вообще незвездное: применение спектрального анализа показало, что многие из них — это прозрачные облака горячего газа (они также находятся в нашей Галактике, сравнительно близко к нам). Но излучение многих туманностей, в том числе и туманности Андромеды, имело спектр, похожий на спектр звезд, хотя никаких звезд ни один телескоп не мог там обнаружить.

Лишь после того как в начале нашего столетия вступили в строй крупные телескопы-рефлекторы, удалось запечатлеть на фотопластинке отдельные, наиболее яркие звезды туманности Андромеды (М31) и туманности в созвездии Треугольника (М33), находящихся примерно на одинаковом расстоянии от нас. Но природа этих туманных пятен была окончательно выяснена лишь когда в 20-х годах американский астроном Э. Хаббл впервые обнаружил в М31 цефеиды — звезды, периодически меняющие свой блеск. К этому времени уже было известно, что по периоду изменения блеска цефеид можно определить их светимость, т. е. количество энергии, излучаемое этими звездами в единицу времени. А знание светимости позволяет легко определить расстояние до звезды по ее видимому блеску — чем дальше от нас звезда известной светимости, тем она слабее.

Пытаясь определить по цефеидам расстояние до туманности Андромеды, Хаббл получил величину, вдвое меньшую по сравнению с ныне принятой (в то время вычисление светимости цефеид по периоду изменения их блеска было отягощено большими систематическими ошибками). Но тем не менее и столь грубая оценка расстояния указывала на то, что туманность Андромеды находится далеко за пределами нашей Галактики и представляет собой самостоятельную звездную систему.

В настоящее время метод определения расстояний до галактик по переменным звездам-цефеидам является наиболее точным. Но, к сожалению, мы можем наблюдать отдельные звезды только в самых близких га-

лактиках¹. В туманности Андромеды, например, с помощью современных крупных телескопов можно обнаружить только такие звезды, которые излучают света по крайней мере в несколько сотен раз больше, чем наше Солнце (т. е. со светимостью в сотни светимостей Солнца!). Подобных звезд совсем немного: например, в таких галактиках, как наша или туманность Андромеды, 95—97% всех звезд уступают Солнцу по светимости. Значит, абсолютное большинство звезд даже в самых близких галактиках и даже в своей собственной Галактике мы не видим (их изучают лишь по тому вкладу, который они вносят в массу, светимость, спектр галактики как целого). Но все же ярчайшие звезды в ближайших галактиках составляют достаточное количество, чтобы служить надежным критерием определения расстояния до галактик. В туманности Андромеды, например, одних только переменных звезд известно более тысячи. Каковы же расстояния до наблюдаемых галактик?

Прежде чем ответить на этот вопрос, вспомним те единицы длины, которые используются в астрономии и, в частности, для выражения расстояния до галактик.

Во-первых, это хорошо знакомые нам сантиметр или метр. На первый взгляд кажется, что эти единицы слишком мелки и потому неудобны в применении к астрономическим объектам. Однако это не так. Краткая математическая запись больших чисел позволяет легко оперировать с подобными величинами (например, расстояние до туманности Андромеды в сантиметрах выразится числом $2,13 \cdot 10^{24}$ см). А любые физические расчеты всегда удобнее проводить в единой метрической системе единиц, используемой в физике, не вводя специфических единиц для астрономических объектов.

С другой единицей длины мы уже встречались. Это — световой год (или 1 св. год) — расстояние, которое свет (точнее, электромагнитная волна, распространяющаяся в вакууме) проходит за год. Скорость света близка к 300 000 км/с. Умножив эту величину на число секунд в году, получим, что 1 св. год равен около 10^{18} см. Широко известная единица расстояния — астрономическая единица (или 1 а. е.), равная среднему

¹ Лишь взрывающиеся звезды — Сверхновые могут быть видны с очень больших расстояний, но они вспыхивают в галактиках крайне редко.

расстоянию между Землей и Солнцем, примерно в 63 тыс. раз меньше светового года.

Наконец, часто используется в астрономии такая единица расстояния, как парсек (1 пс). По определению, это такое расстояние, с которого виден под углом в $1''$ отрезок, перпендикулярный лучу зрения, равный радиусу земной орбиты (т. е. 1 а. е.). 1 пс в 206 265 раз больше 1 а. е. и составляет $3,08 \cdot 10^{18}$ см, или 3,26 св. года. В парсеках удобно измерять расстояния до звезд. Во внегалактической астрономии используются единицы, производные от парсека: килопарсек (1 кпс = 1000 пс) и мегапарсек (1 Мпс = 1000 кпс). Так, расстояние до туманности Андромеды составляет $690 \text{ кпс} = 0,69 \text{ Мпс}$.

Расстояние до этой галактики измерено достаточно точно, чего, к сожалению, нельзя сказать о расстояниях до основной массы изучаемых галактик. Определение расстояний до галактик и в настоящее время представляет собой сложную проблему, и существующие методы часто не дают необходимой точности, приводя к оценкам, различающимся подчас в 1,5—2 раза. Точнее всего расстояния определяются для близких галактик, т. е. для таких, в которых можно различить отдельные объекты — яркие звезды, цефеиды, облака горячего газа, звездные скопления. В таких случаях расстояния оцениваются путем сравнения этих объектов с такими же объектами, расстояние до которых известно, например в нашей Галактике.

Для далеких галактик, в которых не видны отдельные объекты (а таких галактик абсолютное большинство), сравнительно легко и точно можно найти относительное расстояние, т. е. узнать, во сколько раз одна галактика дальше от нас, чем другая. Этот метод определения расстояний связан с самым грандиозным процессом, происходящим в природе, — с расширением Вселенной¹. Теоретически предсказанный советским физиком А. А. Фридманом этот процесс был обнаружен в 30-х годах нашего века Э. Хабблом, после того как тот проанализировал спектры галактик с целью узнать, с

¹ Под расширением Вселенной понимают непрерывное увеличение лишь средних расстояний между далекими галактиками. Никакого увеличения расстояния не происходит, если близкие друг к другу галактики образуют пары, группы или скопления, в которых они удерживаются вместе силами взаимного притяжения.

какими скоростями они движутся. Измерение длин волн линий в спектре источника с помощью так называемого эффекта Доплера позволяет узнать, приближается или удаляется от нас источник света.

Хаббл обнаружил, что спектры большинства галактик указывают на «красное смещение» линий¹, т. е. смещение в сторону красного конца спектра, которое говорит об удалении галактик от нас. Величиной красного смещения называют относительное изменение длин волн излучения, т. е. дробь $z = \Delta\lambda/\lambda_0$, равную отношению лучевой скорости к скорости света v/c . Хаббл обнаружил, что величина красного смещения галактик в среднем пропорциональна расстоянию до галактик.

Например, если одна галактика имеет скорость 1000 км/с, то вдвое более далекая будет иметь скорость около 2000 км/с, находящаяся втрое дальше — около 3000 км/с, и т. д. Эту зависимость можно записать в таком виде: $v = HD$, где D — расстояние до галактики, а H (км/с·Мпс) — коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Хаббла.

Существование такой зависимости говорит о том, что Вселенная расширяется однородно: никакого центра расширения не существует. Если бы мы находились в какой-либо другой галактике, то закон Хаббла был бы справедлив и в этом случае: мы бы наблюдали удаление от нас всех других галактик, включая и нашу собственную Галактику. Таким образом, все галактики находятся в равноправном положении.

Пользуясь законом Хаббла, можно, измерив красное смещение галактик, определить, во сколько раз одна из них дальше от нас, чем другая. Но узнать истинное расстояние сложнее — сначала надо найти, чему равна постоянная Хаббла. Казалось бы, что проще: измерить скорости удаления близких галактик, расстояние до которых определено без помощи красного

¹ Если расстояние между источником и наблюдателем увеличивается, то линии спектра будут, по эффекту Доплера, смещаться в сторону красного конца оптического диапазона длин волн, а если уменьшается, то в противоположную сторону, к фиолетовому концу. Для скоростей, много меньших, чем скорость света, справедлива простая формула: $v = c \Delta\lambda/\lambda_0$, где v — скорость приближения (или удаления) источника; c — скорость света; λ_0 — длина волны излучения, наблюдаемого у неподвижного источника, а $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ — изменение длин волн, связанное с его движением.

смещения (по отдельным объектам), а потом разделить полученную скорость на величину расстояния. Но оказалось, что чем ближе к нам галактика, тем хуже (менее точно) выполняется зависимость Хаббла, а для самых близких вообще не пригодна. Это связано с тем, что галактики, помимо космологической скорости, т. е. связанной с расширением Вселенной, обладают еще дополнительными, или пекулярными скоростями, направление которых может быть самым произвольным, а величины доходят до 1000 км/с. Для близких галактик космологические скорости малы (в соответствии с зависимостью Хаббла), и поэтому невозможно отделить их от пекулярных скоростей. А если галактики удерживают к тому же друг друга силами гравитации, то расширение Вселенной и вовсе не влияет на их движение.

Вторая причина, мешающая найти правильное значение постоянной Хаббла, связана с наличием систематических ошибок в определении расстояний до близких галактик, в частности, с помощью метода цефеид. Как уже было сказано выше, расстояние, определяемое по наблюдениям цефеид, основано на зависимости величины светимости цефеид от периода изменения их блеска. Эта зависимость неоднократно пересматривалась, уточнялась, и каждый раз вследствие этого приходилось менять оценки расстояний до близких галактик, а следовательно, и значение постоянной Хаббла, а через нее — расстояния до всех галактик. Интересно отметить, что каждая последующая оценка H , как правило, оказывалась ниже предыдущей (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Значения постоянной Хаббла, определявшиеся различными авторами на протяжении ряда лет

Год	Постоянная Хаббла, км/с · Мпс	Авторы
1935	535	Хаббл
1955	180	Хьюмасон, Мейалл, Сендидж
1968	75	Сендидж
1970	50	Вокулер
1972	55	Сендидж, Тамманн

Последняя оценка H получена Сендиджем и Тамманом в результате кропотливой работы по определению расстояний до галактик методом цефеид и по измерению угловых размеров гигантских облаков горячего газа. В нашей брошюре мы будем использовать значение постоянной Хаббла, равное $H = 50$ км/с · Мпс.

Вспомним теперь, что если мы уменьшим значение H в несколько раз, во столько же раз увеличатся принятые значения расстояний до далеких галактик. А вместе с расстояниями изменятся и оценки физических параметров галактик (табл. 2).

Теперь ясно, почему для одной и той же галактики в литературе подчас можно найти сильно отличающиеся данные, даже если они получены одними и теми же авторами. Просто они относятся, как говорят, к различным «шкалам» расстояний, т. е. к различным значениям постоянной Хаббла H .

Рассмотрим теперь, на каких расстояниях от нас находятся некоторые известные галактики.

Ближе всех к нам находятся две небольшие галактики — Большое и Малое Магеллановы Облака (сокращенно — БМО и ММО).

Таблица 2

Пропорциональность основных характеристик галактик от принятого значения расстояния D и постоянной Хаббла H

Физическая величина	Зависимость от принятого значения D	Зависимость от принятого значения H
Размер	D	H^{-1}
Занимаемый объем	D^3	H^{-3}
Масса	D	H^{-1}
Средняя плотность	D^{-2}	H^2
Светимость	D^2	H^{-2}
Масса межзвездного газа	D^2	H^{-2}
Скорость	Не зависит	Не зависит

Они являются, по-видимому, спутниками нашей Галактики (расстояние от ее центра до них составляет примерно 150 тыс. св. лет). Своё название эти галактики получили потому, что были впервые описаны одним из участников первой кругосветной экспедиции Магеллана. БМО и ММО хорошо видны невооруженным глазом.

В пределах расстояния 5 млн. св. лет от нас обнаружено несколько десятков галактик; большинство из них — карликовые (мы не увидели бы их, будь они очень далеко). Уже знакомая нам туманность Андромеды — самая ближайшая из галактик-гигантов, к числу которых относится и наша собственная Галактика.

Если ограничиться расстоянием в 2—3 млрд. св. лет, то число галактик, которые реально можно обнаружить, увеличится до нескольких десятков миллионов! Все они в принципе доступны для наблюдения, хотя абсолютное большинство из этих галактик еще вообще не исследовалось. Наиболее полные из существующих каталогов галактик содержат скупые и краткие сведения «всего лишь» о нескольких десятках тысяч звездных островов, это во много раз меньше числа галактик, в принципе доступных наблюдениям, но большинство из них расположено настолько далеко, что их невозможно рассмотреть детально.

До 1975 г. самой далекой галактикой (из тех, для которых расстояние было определено) считалась гигантская звездная система, известная как радиисточник 3С 295 (галактики, выделяющиеся своими громадными размерами и светимостями, часто бывают мощными радиисточниками). Ее красное смещение $z = \Delta\lambda/\lambda$ оказалось равным 0,46 — источник удаляется от нас со скоростью, составляющей почти половину скорости света! Если судить по красному смещению, расстояние до 3С 295 составляет > 2700 Мпс, или > 8 млрд. св. лет.

В 1975 г. появилось сообщение о получении спектра еще, как оказалось, более далекой галактики — 3С 123 (она тоже является сильным радиисточником). Красное смещение 3С 123 составляет 0,64, т. е. галактика находится почти в 1,5 раза дальше 3С 295.

Галактика 3С 123 выглядит на фотоснимках крошечным и слабым пятнышком (22^m), в несколько миллионов раз более слабым, чем звезды, которые еще можно с трудом увидеть на ночном небе невооруженным глазом. Пока это самая далекая из известных звездных систем.

Однако еще дальше находятся компактные источники гигантской светимости — так называемые квазизвездные объекты (КЗО), на фотографиях почти не отличимые от слабых звезд. Их природа и возможная связь с галактиками еще является предметом научных

дискуссий. Красное смещение некоторых известных КЗО превышает 2 или даже 3 единицы¹. По-видимому, КЗО — самые далекие от нас объекты, которые мы в состоянии наблюдать.

Зная размер области, занимаемой галактикой на небе, и ее расстояние, легко вычислить размер этой галактики. Оказалось, что «типичные» размеры наблюдаемых галактик составляют от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч световых лет, хотя само понятие «размер» несколько неопределенно: ведь у галактик нет резких границ, и чем более слабые области мы можем обнаружить, тем как бы больше для нас становится галактика².

В гигантском объеме галактики содержится до нескольких сотен миллиардов звезд. Несмотря на это, из-за огромных расстояний между ними средняя плотность звезд, а значит, и всего вещества в галактиках крайне мала. Астрономы уже как-то называли «видимым ничто» хвостатые кометы из-за их малой плотности. Как же назвать тогда галактики, если их средняя плотность еще в миллиарды раз меньше?

Конечно, подсчитать точное количество звезд в какой-либо галактике было бы невозможно, даже если бы все они были видны по отдельности. Предпочтительнее иметь дело не с числом звезд, а с полной светимостью или массой галактики. Определение светимости сравнительно несложно: оценивается мощность светового потока, приходящего к нам от галактики, а зная расстояние до нее, находится полная мощность излучения, или светимость (обычно ее выражают в единицах светимости Солнца). Оценивать массу значитель-

¹ Правда, для тех объектов, у которых красное смещение сравнимо с единицей или больше единицы, определение скорости или расстояния уже нельзя произвести по простым, приведенным выше формулам. На таких больших расстояниях само понятие расстояния уже теряет свою однозначность, как, впрочем, и понятие скорости. Поэтому оценки скорости и расстояния и связанных с ним характеристик для объектов с очень большим красным смещением ($z > 1$) носит лишь приближенный, иллюстративный характер. В этих случаях удобнее характеризовать степень удаленности от нас объекта его красным смещением.

² Очень трудно представить себе наглядно, насколько велики галактики. Можно привести такой пример: если построить карту, в масштабе которой весь земной шар будет всего лишь крошечным кружочком размером 1 мм, то характерный размер галактик в таком масштабе составит расстояние от Земли до Солнца (1 а. е.)!

но труднее. Для этого необходимо измерение скоростей движения звезд внутри исследуемой галактики (для одних галактик — это скорости хаотического движения звезд, летящих в различных направлениях, для других — это скорость вращения звезд вокруг галактического центра). Масса определяется из очевидного условия: она должна быть такой, чтобы гравитационное поле удерживало звезды внутри галактики, не давая им разлетаться во все стороны. Чем больше скорость движения звезд и размер галактики, тем больше ее масса. В настоящее время разработаны математические методы, позволяющие по известной скорости вращения галактики на разном расстоянии от ее центра узнать, как распределено вещество внутри галактики. Ясно, что плотность вещества галактик падает от центра к краю. Но до сих пор еще не выяснен вопрос, не содержится ли основная масса вещества в самых внешних областях галактик, которые трудно наблюдать из-за крайне низкой яркости — в так называемых коронах галактик, предельно слабое свечение которых было недавно обнаружено.

Если величину массы галактики M разделить на величину ее светимости L (M и L будем считать выраженными в единицах массы и светимости Солнца), то получим отношение M/L , с помощью которого можно много узнать о звездах, населяющих галактику. Если бы галактика состояла из звезд, подобных Солнцу, то M/L было бы равно единице (в солнечных единицах). В действительности же величина этого отношения находится в пределах от нескольких до 30—100 единиц. Это говорит о том, что основное население галактик — карликовые звезды низкой светимости, потому что, как показывают наблюдения, именно для них характерны большие значения M/L . Интересно и другое: отношения M/L , как, впрочем, и другие характеристики галактик, оказались различными для галактик разной структуры.

Структура галактик

В середине прошлого века состоятельный любитель астрономии лорд Росс построил собственный телескоп, который и в наше время мог бы считаться весьма круп-

ным — диаметр его зеркального объектива составлял 180 см. Телескоп позволил обнаружить на небе большое количество неизвестных ранее туманных пятен, многие из которых, как мы теперь знаем, являются далекими галактиками.

Наблюдая одну из туманностей в созвездии Гончих Псов (M51, по каталогу Мессье), Росс неожиданно обнаружил, что она вовсе не бесформенна, а имеет интересную структуру: две нечеткие бледные полосы как бы исходят из центрального сгущения и закручиваются в одну сторону по спирали. Так впервые была открыта спиральная структура галактик. Галактики, обладающие такой структурой, получили название спиральных.

Заметим, что M51 и сейчас считается одной из интереснейших галактик. На небе она находится недалеко от ковша Большой Медведицы, и наблюдать ее наиболее яркую центральную часть можно даже в небольшой телескоп.

В начале XX в. научились получать фотографии галактик. Фотографическая эмульсия, как известно, обладает бесценным свойством накапливать действие падающего на нее света. То, что при визуальных наблюдениях выглядит бледным, едва заметным пятном, на фотографии может предстать ясным четким изображением галактики со сложной внутренней структурой.

Спиральные ветви обнаружили на фотографиях большинства наблюдаемых галактик. К числу спиральных принадлежит и туманность Андромеды, и наша Галактика. Спиральные галактики обычно обозначаются буквами Sa, Sb и Sc (рис. 2). Причем маленькие бук-



Рис. 2. Схематический вид галактик различных типов («с ребра» и «плашмя»)

вы а, b, с характеризуют степень развития спиральной структуры: Sa — спиральные ветви гладкие, туго обхватывающие большую яркую и бесструктурную область в

центре галактики (ядро); Sc — спиральные ветви далеко отходят от небольшого по размерам ядра, неровные, клочковатые, подчас разбивающиеся на отдельные яркие сгустки; Sb — ветви с промежуточными характеристиками (см. фотографии на рис. 3).

В некоторых галактиках спирали начинаются как бы от концов толстого прямого звездного рукава — «бара», расположенного в центре галактики. Такие галактики называются спиральными с перемычкой и их обозначают SBa, SBb или SBc.

Но далеко не все галактики обладают спиральной структурой. Многие галактики имеют на фотографии форму кругов или эллипсов с расплывчатыми очертаниями и сильной концентрацией яркости к центру. Это так называемые эллиптические галактики. Их обычно обозначают буквой E. И если невозможно найти две одинаковые спиральные галактики — у каждой свой, подчас очень сложный рисунок ветвей, то эллиптические галактики часто практически неотличимы друг от друга по форме.

Эллиптические галактики могут иметь различную степень сплюснутости. Для ее учета часто за буквой E пишут цифру, которую определяют следующим образом. Пусть галактика выглядит как эллипс с большой осью a и малой осью b ; тогда цифра, характеризующая сплюснутость, — это округленная до целого числа дробь $10(a-b)/a$. Цифра 0 соответствует «круглой» галактике, 6 — сильно сплюснутой. Эллиптические галактики, сплюснутость которых характеризовалась бы цифрами, большими 6, не наблюдаются.

Между типами S и E в классификационной последовательности располагаются так называемые линзовидные галактики (они обозначаются как S0), но о них мы расскажем несколько позже.

Существуют также галактики, которые не имеют ни спиральных ветвей, ни эллиптических или близких к ним очертаний. Пример тому — ближайшие к нам галактики — БМО и ММО. Подобные галактики обладают неправильной, асимметричной формой, потому и получили название «неправильные» (обозначаются Ir).

Мы описали наиболее широко распространенную, хотя и довольно приближенную классификацию наблюдаемых форм галактик. Сразу же заметим: не для всех галактик она годится, так как слишком многообразны

по внешнему виду могут быть звездные острова. Но мы пока ограничимся рассмотрением этих трех типов, объединяющих абсолютное большинство наблюдаемых галактик: эллиптические E, спиральные S, неправильные Ir.

Чем вызвано различие этих типов галактик по их внешнему виду? Чем галактики этих типов физически отличаются друг от друга? Почему вообще галактики бывают такими непохожими одна на другую? Над решением этих вопросов работают сейчас ученые.

Довольно быстро было установлено, что галактики различных типов отличаются по цвету.

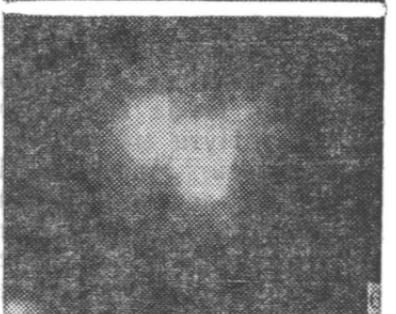
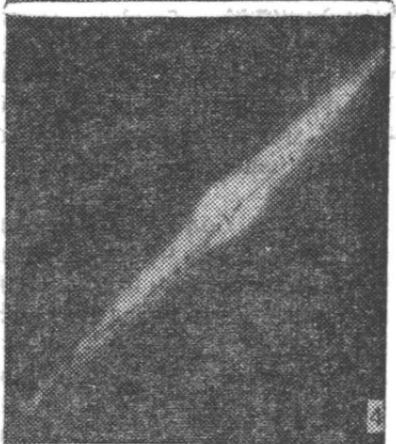
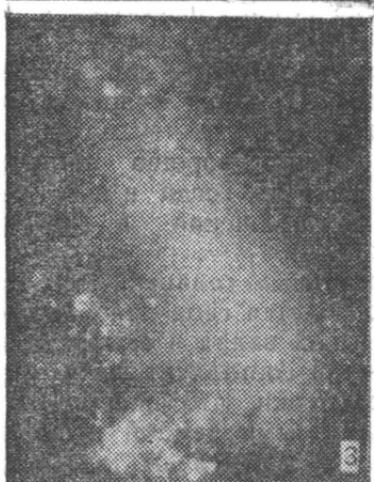
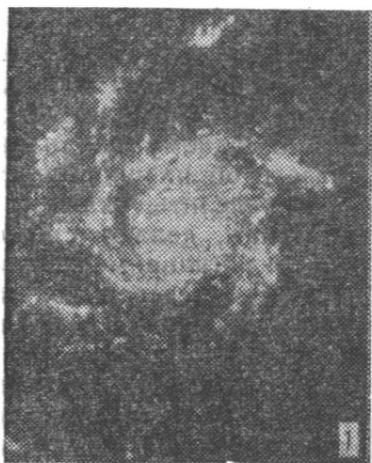
Глаз человека не различает цветовые оттенки, если объекты наблюдений имеют низкую яркость (как, например, галактики). Да и невозможно получить объективные и точные глазомерные оценки цвета, даже если исследовать яркий источник. В астрономической практике для измерения цвета обычно фотографируют объект через два или несколько светофильтров. После этого по специальной методике, которой мы здесь касаться не будем, измеряя степень почернения изображения на негативах, получают количественную оценку цвета объекта, так называемый показатель цвета¹.

Измерив цвета галактик различного типа, астрономы выявили следующую закономерность: при переходе от E- к S- и далее к Ir-галактикам их цвет систематически становился все более и более голубым. О чем это может говорить? Видимо, о том, что у галактик различен звездный состав — ведь цвет галактик определяется цветом и светимостью составляющих их звезд.

Итак, галактики отличаются своим внешним видом, размерами, звездным составом (цветом). Они также различаются по массе, количеству межзвездного газа и другим характеристикам. Однако многие галактики

¹ Применение в астрономии фотоэлектрических приемников излучения — фотомножителей сделало процедуру измерения цвета особенно точной.

Рис. 3. Фотографии различных галактик: 1 — спиральная галактика M 33 в Треугольнике (Sc); 2 — спиральная галактика M 81 в Большой Медведице (Sb); 3 — Большое Магелланово Облако (Ir); 4 — спиральная галактика NGC 4565 (Sc); 5 — эллиптическая галактика NGC 205 — спутник туманности Андромеды (E5); 6 — далекая радиогалактика Лебедь A



объединяет и нечто общее. Это — их строение, основные особенности структуры.

Рассмотрим, к примеру, структуру спиральных галактик. Мы видим их как пятна с круглыми или эллиптическими очертаниями, внутри которых прослеживается спиральная структура. По одному их только изображению ничего нельзя сказать об их пространственной форме. Когда хотят ее определить, скажем, у горного хребта или недоступной горы, делают стереофотоснимок — фотографируют объект (например, с самолета) в двух ракурсах. Но сделать стереоснимок галактик мы, к сожалению, никогда не сможем — слишком велики до них расстояния.

Изучению пространственной структуры помогает статистика — ведь мы наблюдаем не одну, а много галактик, по разному относительно нас ориентированных в пространстве. Статистический анализ наблюдений показал, что спиральные галактики — сплюснутые и в большинстве своем осесимметричные образования (правда, расположение отдельных ярких участков может нарушать эту симметрию).

Структура галактики особенно хорошо заметна, когда мы наблюдаем ее «с ребра». Тогда в ней ясно видны звездный диск и утолщение в центре (рис. 3).

Диск в большинстве спиральных галактик — их самая массивная часть. Он включает в себя преобладающую массу звезд и дает основной вклад в свечение галактики. Толщина диска обычно составляет сотни парсек. На фотографиях те галактики, что повернуты к нам ребром, кажутся пересеченными темной неровной полоской, идущей вдоль диска. Это — следы межзвездной пыли. На примере нашей Галактики мы знаем, что в межзвездном пространстве газ перемешан с пылью. Газ примерно в 100 раз больше, чем пыли, но он прозрачен и поэтому не задерживает свет звезд. Иное дело — пыль. Из-за нее далекие звезды в направлении Млечного Пути мы видим сильно ослабевшими и покрасневшими. Млечный Путь — это наиболее яркая, близкая к плоскости нашей Галактики область звездного диска. Даже невооруженным глазом заметно, что его очертания очень неровны. В созвездии Лебедя Млечный Путь даже раздваивается на два рукава. Все это — результат проекции на Млечный Путь облаков

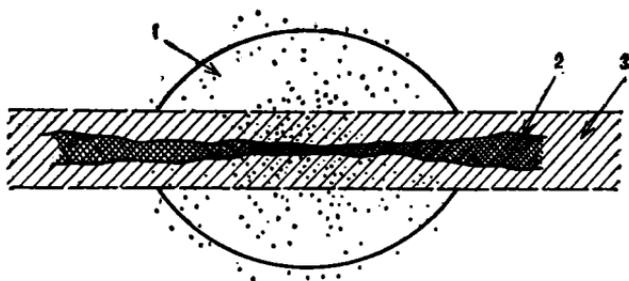


Рис. 4. Схема строения галактики, видимой «с ребра»: 1 — сферондальная составляющая; 2 — слой газа и пыли; 3 — звездный диск

межзвездной среды, содержащих пыль. И поэтому если бы мы могли наблюдать диск нашей Галактики со стороны, «с ребра» (а где-нибудь кто-то наверняка его так наблюдает), то также видели бы его пересеченным темной полосой.

Газо-пылевой слой по толщине в несколько раз меньше звездного диска (см. рис. 4). Но с газом связаны молодые и горячие звезды, звездные скопления, облака нагретого водорода. Все эти объекты образуют так называемую плоскую составляющую галактик, изобилующую яркими источниками света, которая располагается внутри звездного диска. Спиральные ветви — самое первое, что бросается в глаза на снимках галактик, — также образованы членами плоской составляющей.

Обратимся теперь к утолщению в центральной части галактик. Его образуют звезды, принадлежащие к так называемой сферической (или, правильнее, сфероидальной) звездной составляющей. В отличие от плоской она не сильно концентрируется к плоскости галактики: поверхности равной концентрации ее звезд в пространстве представляют собой эллипсоиды вращения с отношением осей от 1:1 до 3:1. Однако звезды сфероидальной составляющей очень сильно концентрируются к центру галактики, вблизи которого их плотность особенно велика.

Итак, плоская составляющая со спиральными ветвями, яркими звездами, газом и пылью, массивный звездный диск и сфероидальная составляющая — это элементы структуры спиральных галактик. В разных галактиках относительный вклад их в общую светимость

различен. Как правило, от Е- к S- и далее — к Iг-галактикам уменьшается вклад сфероидальной и растет яркость плоской составляющей, которая богата молодыми горячими звездами.

Различные составляющие галактик имеют свойственный только им закон уменьшения яркости от центра галактики к ее краю. Яркость звездного диска (вместе с плоской составляющей) I почти всегда связана с расстоянием от центра R простым экспоненциальным законом: $I_1 = Ae^{-Bk}$, или $\ln I_1 = A_1 - B_1 R$, где A , A_1 и B , B_1 — величины, постоянные для данной галактики.

Для эллиптической галактики зависимость наблюдаемой яркости от расстояния до центра $I_2(R)$ имеет приблизительно такой вид: $\ln I_2 = C - DR^{1/4}$; здесь C и D — также постоянные величины (различные, конечно, для разных галактик). Очень важно, что такая же зависимость характерна и для яркости сфероидальных составляющих спиральных (а возможно, и для неправильных) галактик. Отсюда следует такой вывод: спиральные галактики по своей структуре отличаются от эллиптических только тем, что имеют звездные диски со спиральными ветвями. Если же мысленно убрать у них звездный диск, то перед нами окажется обычная эллиптическая галактика.

Интересно, что в природе много и таких галактик, у которых есть и сфероидальная составляющая и диск, но отсутствует плоская составляющая, т. е. молодые горячие звезды или спиральные ветви. Такие галактики выглядят осесимметричными образованиями, очень похожими на эллиптические, и лишь по тому, каким законом описывается падение их яркости к краю, можно узнать о наличии в них звездного диска. Это — уже упоминавшиеся линзовидные галактики S0. На классификационной схеме их помещают между спиральными и эллиптическими галактиками — у них есть сходство и с теми и с другими.

В табл. 3 просуммировано все вышесказанное о структуре галактик различных типов. Знаки «+» или «—» в ней указывают на наличие или отсутствие тех или иных элементов структуры галактики.

Из табл. 3 видно, что строение галактик, в общем-то, сходно: они содержат те же элементы структуры, однако относительная доля массы, приходящаяся на

Элементы структуры галактик

Элементы структуры	E	S0	Sa	Sb	Sc	Ir
Сферондальная составляющая	+	+	+	+	Слаба	Слаба
Диск	—	+	+	+	+	+
Плоская составляющая	—	—	+	+	+	+
Спиральные ветви	—	—	+	+	+	—

различные компоненты ее структуры, меняется в широких пределах от галактики к галактике. Но вместе с этим, как оказалось, меняются и свойства так называемого звездного населения галактик, к рассказу о котором мы переходим.

Звездное население галактик и химия звезд

Хотя звезды находятся в непрерывном движении, полного их перемешивания в галактиках не происходит. Если исследовать совокупность звезд в разных областях одной галактики, то может оказаться, что их средняя характеристика (скажем, цвет, химический состав) будет различными. Это характерно, например, для звездных скоплений Галактики: скопления вблизи Млечного Пути и вдали от него, как правило, непохожи друг на друга¹.

К плоскости Млечного Пути концентрируются так называемые рассеянные скопления. Типичный пример — Плеяды, яркие звезды которого хорошо видны невооруженным глазом. Возраст звезд рассеянных скоплений

¹ Исследование звезд в скоплениях вообще сыграло колоссальную роль в астрономии, особенно в теории эволюции звезд и их происхождения. Звезды в каждом скоплении связаны совместным образованием, имеют приблизительно один возраст, удалены от нас на одно расстояние. Это делает очень удобным сравнение звезд внутри скоплений.

Возникновение скоплений происходило в разное время и в различных условиях и, сопоставляя скопления друг с другом, ученые стараются понять, как изменялись условия образования звезд в зависимости от места и времени рождения и как эволюционируют звезды.

не бывает очень большим — он обычно много меньше 1 млрд. лет. Это не так уж много для звезд: возраст Солнца, например, около 5 млрд. лет. Среди наблюдаемых рассеянных скоплений есть и такие, которые не просуществовали еще и 100 млн. лет.

Второй тип — так называемые шаровые скопления, которые можно встретить в Галактике на любых расстояниях от плоскости Млечного Пути. Их массы измеряются десятками тысяч масс Солнца. Они имеют правильную форму, близкую к сферической (отсюда и их название). Плотность звезд в них особенно велика в центре скопления. На любых фотографиях центр скоплений выглядит сплошной белой массой, словно звезды сливаются там в один клубок. Это, конечно, только фотографический эффект: звезды движутся и через центр скопления, не сталкиваясь друг с другом.

Звезды шаровых скоплений отличаются от звезд рассеянных скоплений своим цветом (первые более красные). Исходя из современных представлений об эволюции звезд, можно по цвету и светимости звезд скопления оценить его возраст. Оказалось, что красноватый цвет шаровых скоплений объясняется тем, что возраст входящих в них звезд очень велик. Эти скопления содержат, по-видимому, самые старые звезды, которые есть в природе, они уже «прожили» 12—18 млрд. лет. Сейчас в нашей Галактике таких массивных скоплений, как шаровые, практически не образуется, однако образование рассеянных продолжается.

Интересно, что звезды таких типов, какие образуют шаровые скопления, среди звезд, окружающих Солнце, встречаются очень редко, а если и попадаются, то обладают необычайно высокими скоростями, говорящими о том, что они, как и большинство шаровых скоплений, движутся в Галактике по очень вытянутым орбитам.

При исследовании галактик важно выяснить, какого типа звезды их населяют? На какие звезды нашей Галактики они похожи? Первые звезды, которые были обнаружены с помощью крупнейших телескопов в ближайших спиральных галактиках, относятся к плоской составляющей. Это такие же звезды большой светимости, которые можно найти в молодых рассеянных скоплениях Галактики. Они наблюдаются в тех областях, где хорошо различима спиральная структура. «Разло-

жить» же центральную яркую часть галактик на звезды долгое время не удавалось никому. Они там оказались слишком слабыми. Потребовалось несколько десятилетий для того, чтобы астрономы смогли существенно понизить порог обнаружимости звезд. Лишь в 1944 г. американскому астроному В. Бааде с помощью фотопластинок, чувствительных к красному свету, после года тщательной подготовки инструмента (250-сантиметрового рефлектора) и тренировки удалось выявить изображения отдельных звезд в центральном сгущении туманности Андромеды. Оказалось, что по совокупности таких характеристик, как цвет и светимость, они отличаются от звезд, открытых в этой галактике ранее. При этом, как выяснилось, они очень похожи на звезды шаровых скоплений нашей Галактики, которые редко встречаются в звездных окрестностях Солнца.

Чтобы подчеркнуть различие в характеристиках звезд, населяющих Галактику, Бааде ввел термин «звездное население типов I и II». Звезды в спиральных ветвях и рассеянных скоплениях — пример населения типа I, а звезды в шаровых скоплениях нашей Галактики — населения типа II. Бааде связал различие между населением с возрастом звезд. Он предположил, что образование звезд шло как бы поэтапно: сначала образовались звезды населения типа II, затем — звезды населения типа I. Но в действительности картина оказалась более сложной, и это выяснилось при изучении химического состава звезд.

В конце прошлого века в науке появился новый метод анализа химического состава вещества, применимый к горячим газам, — метод спектрального анализа. Очень скоро после своего открытия спектральный анализ был применен в астрономии и привел к одному из фундаментальных открытий науки. Оказалось, что звезды, как фантастически далекие, так и близкие, состоят из набора тех же самых атомов, которые известны на Земле и включены в таблицу Менделеева. То же относится и к составу облаков межзвездного газа, и других небесных тел. Атомы везде одни и те же — и на Земле, и на Солнце, и в далеких галактиках. При этом обнаружилось, что и в Солнце, и в звездах, и в межзвездном газе больше всего содержится водорода (около 70%), затем идет гелий, а после него — все остальные элементы (причем за некоторыми исключе-

ниями выполняется общее правило: чем больше атомный вес элемента, т. е. чем массивнее атомные ядра, тем реже встречается в природе).

Относительные массы вещества, приходящиеся на долю различных химических элементов, в наблюдаемых звездах, как правило, почти одинаковы. Существует даже такое понятие: стандартный химический состав, или космическая распространенность элементов. Сильные аномалии химического состава звездных атмосфер наблюдаются очень редко. Однако, как известно, и небольшие изменения содержания элементов тяжелее гелия могут заметно повлиять на температуру звезды и на ее способность вырабатывать энергию, а значит, и на эволюцию звезды.

Когда теоретически вычисленные зависимости светимости звезд от их цвета сравнили с результатами фотоэлектрических наблюдений шаровых скоплений, то оказалось, что многие скопления «развиваются» так, как если бы в составе их звезд было во много раз меньше металлов, чем у Солнца или близких к нему звезд. Этот вывод был подтвержден прямыми исследованиями звездных спектров.

Низкое содержание элементов тяжелее гелия найдено и у звезд сфероидальной составляющей нашей Галактики, не входящих в состав скоплений. Орбиты этих звезд в Галактике похожи на орбиты шаровых скоплений. Как правило, чем вытянутее орбита, тем сильнее дефицит тяжелых элементов. Это может показаться очень странным: откуда звезда с тем или иным химическим составом «знает», как ей надо двигаться? Видимо, такая зависимость отражает изменение со временем динамических характеристик вещества, из которого возникли звезды (газ), и его химического состава.

Звезды с малым содержанием тяжелых элементов относятся (в нашей Галактике) к старым звездам населения типа II. Но большинство звезд (по-видимому, все звезды, за исключением самых-самых старых) относятся к населению типа I¹.

В чем причина особенности химического состава

¹ Сейчас принято разделять звезды на населения типов I и II не по признаку «молодые—старые», а по химическому составу. Население типа I — «нормальный» химический состав, население типа II — мало металлов.

очень старых звезд? Очевидно, большинство химических элементов не существовало в природе всегда в том же количестве, что и сейчас. Элементы могут образовываться под действием внутриатомных ядерных сил. Наиболее вероятно, что появление основного количества всех существующих химических элементов (кроме двух самых легких, — водорода и гелия) связано с ядерным «горением» массивных звезд. (Гелий, правда, тоже образуется при термоядерных реакциях в звездах, но не в таких количествах, чтобы можно было объяснить его большое содержание в природе.) Элементы же тяжелее гелия, как показывают расчеты, неизбежно должны появиться при эволюции массивных звезд. На определенной стадии своей эволюции эти звезды взрываются и отдают часть своего вещества окружающей среде. Выброшенное вещество перемешивается с водородо-гелиевым газом¹, со временем все больше и больше обогащая его возникшими химическими элементами.

Здесь и надо искать разгадку различного химического состава звезд населения типов I и II. Население типа II объединяет звезды, которые образовались первыми. Наиболее массивные из них, сбросив часть своего вещества, обогатили тяжелыми элементами межзвездный газ, и когда из этого газа появились второе и последующие поколения звезд, то последние уже имели химический состав, близкий к солнечному².

Итак, звезды населения типа II — самые старые; они относятся к сфероидальной составляющей галактик. Звезды населения типа I («нормальный» химический состав) могут присутствовать в любой составля-

¹ О водороде и гелии надо сказать особо: их происхождение связывают с ранними этапами расширения Вселенной, когда еще не существовало ни звезд, ни галактик, а была плотная, горячая и быстро расширяющаяся плазма. Она состояла из равновесной смеси непрерывно взаимодействующих элементарных частиц. Как показали расчеты, на определенной стадии расширения Вселенной нейтроны вместе с частью протонов оказались связанными в ядра атомов гелия, а немного позднее протоны вместе с электронами образовали нейтральные атомы водорода.

² Конечно, здесь дана лишь грубая, упрощенная схема. В действительности согласовать теорию с наблюдениями количественно оказалось не просто, и задача эта не может считаться окончательно решенной и поныне, хотя сама идея оказалась очень плодотворной.

ющей. Например, в туманности Андромеды звезды, обогащенные металлами, можно обнаружить не только в диске, но и в сферической составляющей. То же относится и к гигантским эллиптическим галактикам — в спектре этих галактик, как и в спектре ядер массивных спиральных систем, содержится хорошо заметная полоса циана, типичная для населения типа I. Конечно, звезды населения типа II там также имеются (правда, не они дают основной вклад в светимость) Вообще говоря, звезды, «бедные» тяжелыми элементами, оказались во всех галактиках, где их присутствие можно было обнаружить, а в эллиптических галактиках-карликах небольшой массы (меньше 10^8 масс Солнца) практически все звезды можно отнести к населению типа II.

Это не случайно. Подмечена такая закономерность: чем менее массивна галактика, тем меньше в ее звездах тяжелых элементов. На первый взгляд зависимость по меньшей мере странная — как звезды или среда, из которой они возникают, «узнают» о том, какова суммарная масса всех тел, составляющих галактику, и как они могут «подстроить» под эту массу свой химический состав? Существует, однако, очень интересная гипотеза, которая объясняет упомянутую связь. Вспомним, что вещество (газ), обогащенное образовавшимися элементами, поступает в среду при взрывах Сверхновых или при быстром истечении вещества из звезд. Что с ним происходит дальше? Выброшенное вещество имеет определенную начальную скорость, зависящую от свойств породившей его звезды. Но галактика малой массы в отличие от галактики-гиганта слабее удерживает газ своим гравитационным полем, и выброшенный газ может легко ее покинуть, унося с собой образовавшиеся элементы. Звезд населения типа I в этом случае возникнет очень мало.

Газ в галактиках

Как говорилось выше, молодые звезды в галактиках сконцентрированы внутри звездного диска, вблизи его центральной плоскости. Там же сосредоточен почти весь межзвездный газ. Спрашивается, почему же газ и звезды распределены неодинаково? Дело в том,

что в обычном газе, даже если он крайне разрежен, происходят столкновения отдельных частиц (или облаков, если среда не сплошная). В результате газ неизбежно теряет часть своей внутренней энергии, «высвечивая ее», т. е. порождая электромагнитное излучение, которое эту энергию уносит. Поэтому газ динамически эволюционирует несравненно быстрее, чем совокупность большого количества звезд, вероятность столкновений которых в галактиках ничтожно мала. Этим прежде всего и объясняется различное распределение звезд и газа в галактиках.

Поясним это на таком примере. Представим себе медленно вращающийся и сжимающийся под действием собственной гравитации газовый шар — протогалактику, в которой только начинают образовываться первые звезды. Неважно, сплошной этот шар или состоит из многих облаков; однако если газ в процессе сжатия теряет энергию движения, то он будет собираться в диск, к экваториальной плоскости протогалактики. Возникающие в газе звезды, сохраняя свою энергию (гравитационную плюс кинетическую), быстро «отвяжутся» от газа, в то время как последний будет оседать, образуя диск. Звезды же будут продолжать двигаться в том объеме, который заполнял газ в момент их рождения. Отсюда следует вывод, что пока не закончилось формирование диска, звезды будут рождаться все ближе и ближе к плоскости галактики. Действительно, для нашей Галактики, например, давно известно, что самые старые звезды населения типа II заполняют большой объем пространства и далеко уходят от галактической плоскости, двигаясь по вытянутым, далеко не круговым орбитам; в то же время траектории звезд, образующих диск, наоборот, близки к окружностям.

С этой точки зрения отсутствие диска в эллиптических галактиках говорит о том, что газ весь (или почти весь) там превратился в звезды еще до того, как успел потерять энергию и образовать диск. А возникшие из газа звезды продолжают двигаться по вытянутым орбитам, расположенным в различных плоскостях. В галактиках типа Sc или Iг, для которых характерны хорошо развитый звездный диск и слабая сфероидальная составляющая, большинство звезд, наобо-

рот, появилось уже после того, как газ потерял энергию и сформировал диск.

Заметим, что эти рассуждения можно отнести и к образованию Солнечной системы: орбиты планет расположены примерно в одной плоскости, значит их образование произошло уже после того, как протопланетное газовое облако сжалось в диск. Раньше этого, возможно, возникли кометы, двигающиеся по вытянутым орбитам, сильно наклоненным к плоскостям планетных орбит.

Сейчас в галактиках осталось уже мало газа — в большинстве случаев несколько процентов от первоначального количества. Естественно ожидать, что он скопился там, где минимальна потенциальная энергия тел: вблизи плоскости звездного диска.

Обнаружить на фотографиях следы межзвездного газа можно только в том случае, если он нагрет и достаточно плотен. Нагреть газ и заставить его светиться может любая горячая звезда. Ее ультрафиолетовая радиация вызовет ионизацию газа с последующим переизлучением как в непрерывном спектре, так и в отдельных спектральных линиях.

Зоны ионизованного водорода называются областями H II. Это светлые газовые туманности, которые наблюдаются в телескопы как небольшие зеленоватые пятнышки.

Звезды, способные благодаря высокой температуре и светимости ионизовать большие массы газа и привести к появлению хорошо заметных областей H II, должны находиться среди недавно образовавшихся звезд. По этим причинам области H II служат отличными индикаторами тех районов галактики, где происходит интенсивное звездообразование.

Для выявления областей H II в галактиках используют спектральные аппараты, позволяющие обнаружить эти области по характерному спектру газа, или фотографируют галактики через специальные светофильтры, пропускающие свет в тех спектральных линиях, которые излучает горячий газ.

Наблюдения областей H II в галактиках привели к важным открытиям. Так оказалось, что эти области (а значит, и районы, где образуются звезды) почти всегда лежат в спиральных ветвях галактик. Особенно много областей H II в галактиках типов Sc или Ir.

В них иногда встречаются такие гигантские области H II, размер которых превышает 1 кпс, а масса горячего газа — 1 млн. солнечных масс. Для сравнения укажем, что хорошо известная область H II в нашей Галактике туманность Ориона содержит горячего газа около 100 солнечных масс и имеет размер около 5 пс.

В эллиптических галактиках области H II почти никогда не наблюдаются — в этих звездных системах вообще очень мало межзвездного газа.

Помимо спиральных ветвей, следы горячего газа обнаруживаются с помощью спектроскопии и вблизи самих центров галактик, в их ядрах (в том числе и в ядрах некоторых эллиптических галактик).

Но во всех случаях области H II содержат очень небольшой процент всего межзвездного газа в галактике. Остальной газ слишком разрежен или слишком холоден, чтобы можно было зарегистрировать его оптическое излучение.

Основную массу газа в галактике составляет не ионизованный, а холодный нейтральный водород (H I) и молекулярный водород H₂. Холодный нейтральный водород не излучает в оптическом диапазоне, и все же его удается наблюдать, только совершенно иным путем: методом радиоастрономии.

В 1945 г. молодой голландский ученый ван де Хюлст выдвинул предположение о существовании излучения нейтрального межзвездного водорода в радиолинии на длине волны около 21 см, или, точнее, на частоте 1420,4 МГц. Вскоре сигнал от нейтрального межзвездного водорода на этой линии действительно был зафиксирован. Как и можно было ожидать, водород наблюдался преимущественно вблизи плоскости Млечного Пути. По эффекту Доплера было также подтверждено, что газ, как и следовало ожидать, принимает участие во вращении нашей Галактики. До сих пор радионаблюдения нейтрального водорода в Галактике представляют основной метод исследования внутренних движений газа в Галактике, его распределения в ней, спиральной структуры самой Галактики. Правда, интерпретация подобных наблюдений осложняется тем, что радиотелескоп регистрирует потоки излучения, проходящие от всех слоев газа, лежащих в том направлении, куда наведен радиотелескоп.

Казалось бы, для других галактик сопоставить рас-

пределение звезд и газа проще: рассматривая сложную систему со стороны, всегда можно лучше разобраться в ее структуре, чем изучая ее изнутри. Но галактики все же очень далеки от нас и занимают на небе области, за редким исключением очень малых угловых размеров (меньше 0,1 кв. углового градуса). Уловить слабое радиоизлучение нейтрального водорода от таких объектов — задача технически очень сложная. А главное — радиотелескопы из-за волновых свойств излучения в большинстве случаев не могут создать такого «резкого» изображения радиоисточника (в данном случае, галактики), как оптические телескопы.

У радиотелескопов, как говорят, сравнительно низкая разрешающая способность, т. е. способность различать мелкие детали изображения. Например, один из крупнейших радиотелескопов мира, на котором производится изучение распределения нейтрального водорода в галактиках, — Джодрел-Бэнк (Великобритания), имеет разрешающую способность на волне 21 см около 10' (он «видит» объект исследования в 10 раз менее резко, чем невооруженный человеческий глаз в «своем» диапазоне длин волн)¹.

В настоящее время зафиксировано излучение нейтрального водорода более чем от 200 галактик, хотя для большинства из них получена лишь оценка полной массы межзвездного водорода (что также важно). Но неизвестно, как он распределен внутри галактики.

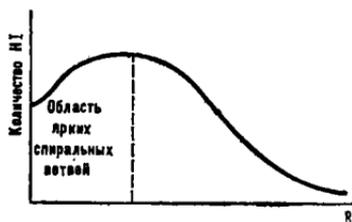
Оказалось, что гигантские спиральные галактики содержат столько межзвездного нейтрального водорода, что его могло бы хватить на образование нескольких миллиардов звезд такой массы, как наше Солнце. Интенсивность процесса образования звезд, как можно было ожидать, связана с количеством межзвездного газа. Вдоль морфологической последовательности галактик — от E до Iг — одновременно увеличивается и относительное количество молодых звезд, и доля мас-

¹ Правда, в последнее время удалось создать такие системы радиointерферометров, куда входит несколько далеко отстоящих друг от друга радиоантенн, что разрешающая способность в радиодиапазоне далеко превзошла оптическую. Ряд объектов наблюдался с разрешением, лучшим, чем 0,001", — это в сотни и тысячи раз превосходит угловое разрешение оптических телескопов, но достигается такая точность только по одной координате; двухмерную карту источника с таким разрешением пока построить нельзя.

сы, приходящаяся на межзвездный нейтральный водород. В галактиках типа Sc или Iг газ составляет 15—25% по массе, а в E-галактиках межзвездный газ практически отсутствует.

Итак, количество Н I в галактиках тесно связано с такими характеристиками, как их морфологический тип. Но здесь речь идет об общем, интегральном содержании холодного межзвездного водорода. Сейчас имеется целый ряд галактик, для которых известна не только полная масса Н I, но и распределение его по галактическому диску. К сожалению, почти все эти галактики относятся к типу Sc, для которых масса межзвездного газа достаточно велика. О распределении Н I внутри галактик других типов известно очень мало, но что касается галактик Sc, то, как оказалось, водород в них распределен совсем иначе, чем звезды. Для многих галактик характерно кольцеобразное распределение газа: поверхностная плотность межзвездного водорода (т. е. его масса, приходящаяся на единицу площади диска галактики) достигает максимума не в центре галактики, а на некотором расстоянии от него (рис. 5). Достигнув максимума, плотность межзвездного водорода спадает, но значительно медленнее, чем плотность звезд, поэтому доля массы, приходящаяся

Рис. 5. Зависимость поверхностной плотности межзвездного нейтрального водорода Н I от расстояния от центра галактики R , характерная для спиральных галактик



на межзвездный газ, все время повышается по мере удаления от центра. В некоторых случаях газ был обнаружен на таких расстояниях от центра, на которых присутствие звезд уже не заметно (конечно, это не означает, что их там нет совсем).

Объяснение наблюдаемого распределения Н I наталкивается на большие трудности, поскольку количество газа в галактиках непрерывно менялось из-за звездообразования, и мы еще плохо представляем, от каких величин зависит скорость этого изменения. По-видимо-

му, было такое время, когда весь диск галактики состоял преимущественно из газа. Постепенно газ конденсировался в звезды, и его становилось все меньше и меньше, но на периферии галактики этот процесс происходил медленнее, чем в центральных областях, или быстрее «затормозился» (напомним, что речь идет только о галактиках, богатых газом; про другие мы пока ничего не можем сказать). Сопоставляя распределение межзвездного газа и звезд, в принципе можно узнать об «истории» звездообразования в дисках галактик. Во внешних частях спиральных галактик межзвездный газ, по-видимому, пришел в состояние, близкое к стационарному. Изменение его количества со временем почти не происходит. Звезды там или вовсе не образуются, или образуются за счет газа, сбрасываемого уже проэволюционировавшими звездами. Существует довольно интересное предположение американского астрофизика В. Квирка о том, что средняя плотность межзвездного газа на заданном расстоянии от центра определяется скоростью вращения диска на этом участке. Если это предположение подтвердится, оно будет означать, что мы живем в такую эпоху, когда количество межзвездного водорода в большинстве наблюдаемых галактик и его плотность почти перестали меняться со временем, поскольку скорости вращения практически не изменяются (на данном расстоянии от центра). Это предположение позволяет объяснить распределение газа вдали от центра. Что касается наблюдаемого «провала» в распределении поверхностной плотности водорода в центре галактики (см. рис. 4), то он может быть объяснен действием нескольких факторов. Основной из них, по-видимому, связан с существованием спиральных ветвей. В большинстве галактик, где такой «провал» обнаруживается, яркие спиральные ветви простираются как раз до его краев. По-видимому, в спиральных ветвях происходит более быстрое и значительное исчерпание межзвездного газа, превращающегося в звезды. По существующим представлениям межзвездный газ в спиральных ветвях подвергается дополнительному (не гравитационному) сжатию, которое облегчает конденсацию этого газа. Можно ожидать, что особенно сильным сжатие будет в тех галактиках, которые быстро вращаются. И действительно, в

таких галактиках центральный «провал» бывает особенно глубоким и заметным.

Наблюдения соседних звездных систем — БМО и ММО, туманности Андромеды, галактики в Треугольнике — позволили увидеть мелкие детали в общей картине распределения межзвездного водорода в галактике. Оказалось, что он распределен очень неравномерно. Даже на одном расстоянии от центра галактики его плотность в различных местах может быть совершенно разной. В БМО, например, межзвездный газ разбит на десятки больших конденсаций. Крупные уплотнения газа, по-видимому, присутствуют в галактиках всех типов, но, что особенно важно, районы с высокой плотностью межзвездного газа обычно совпадают с областями, где наблюдается много горячих звезд и молодых звездных скоплений. Иными словами, в областях повышенной плотности межзвездного газа мы, как правило, наблюдаем рождение звезд. В неправильных галактиках области звездообразования беспорядочно разбросаны; в спиральных они сконцентрированы в спиральных ветвях. Там же, судя по фотографиям галактик, сконцентрирована и межзвездная пыль, поглощающая свет. Этот вывод очень важен: он говорит о том, что образование звезд связано с массивными газовыми уплотнениями; в них масса газа значительно превышает суммарную массу возникших звезд. Например, в БМО наблюдается большая яркая область ионизованного газа — газовая туманность Тарантул. Радионаблюдения показали, что горячий газ, образующий область H II, — это лишь нагретая звездами небольшая часть гигантского газового комплекса, куда входит 4 млн. солнечных масс водорода! Общая масса звезд в этой области по крайней мере вдесятеро меньше.

В спиральных галактиках (точнее, в их спиральных ветвях) также часто встречаются гигантские по размерам комплексы ионизованного и нейтрального газа, пыли и горячих звезд. Но по какой причине в спиральных ветвях наблюдаются уплотнения газа — из-за того, что газ там сильнее сжат к плоскости галактики, или потому, что его в ветвях просто больше? От ответа на этот вопрос зависело наше представление о природе спиральных ветвей, а значит, и о механизме, который управляет в галактиках образованием звезд. Вопрос был решен с помощью уникального радиотелескопа в

Вестерборке (Голландия), который специально был сконструирован для изучения структуры протяженных радиисточников. Этот радиотелескоп содержит 12 чашеобразных антенн — по 25 м диаметром каждая. 10 антенн неподвижны, а две могут менять свое положение. Каждая из двух может работать «в паре» с любой из неподвижных антенн — получается как бы 20 одновременно работающих двухантенных интерферометров. Специальная электронно-счетная машина может обрабатывать результаты наблюдения источника, на который нацелены антенны. Вот с помощью этого радиотелескопа на длине волны излучения 21 см и были получены «изображения» слоя нейтрального водорода нескольких спиральных галактик с угловым разрешением порядка 0,5'. Оказалось, что водорода действительно больше в спиральных ветвях, чем за их пределами: на «радиокартах» получилось отчетливое изображение ветвей, которые хорошо совпадают с оптическими. Значит, газ в своем движении вокруг центра галактики действительно скапливается в спиральных ветвях.

Однако нейтральный водород в галактиках — это еще не весь межзвездный газ. Специальные исследования показали, что межзвездный газ в других галактиках, как и в нашей, примерно на 30% состоит из гелия. Важную проблему представляет и молекулярный водород. На примере нашей Галактики мы знаем, что в очень плотных облаках газа основная доля водорода находится в молекулярном состоянии (как оказалось, объединение атомов в молекулы H_2 особенно эффективно происходит на межзвездных пылинках). Возможно, что масса молекулярного водорода во всей галактике сравнима с массой $H\ I$. При этом наибольшее количество молекулярного водорода можно ожидать вблизи областей звездообразования, где плотность газа и пыли обычно наиболее высокая.

Подводя общий итог, нужно заметить, что и количество межзвездного газа, его состав, и распределение по галактике, а также форма спиральных ветвей и характеристики звездного населения зависят от того, где и в каком количестве появляются или появлялись в галактике молодые звезды.

Как в галактиках образуются звезды?

Было бы неверным сказать, что мы знаем, как образуются звезды. Скорее мы только начинаем понимать, как это происходит. Вопрос об образовании звезд можно назвать одним из самых фундаментальных в современной астрофизике. От его правильного решения зависят наши представления о рождении и эволюции галактик (как звездных островов), о природе межзвездного газа и его облачной структуры, о происхождении планет, изменении химического состава среды и о многом-многом другом.

Рассматривая ранее взаимосвязь газа и звезд, мы исходили из того, что звезды — это сконденсировавшийся газ. Все современные теории, описывающие происхождение звезд, образование и эволюцию галактик, базируются на этой концепции. Насколько она обоснована?

Многие факты, касающиеся строения и эволюции звезд и галактик, естественно, объясняются конденсацией газа в звезды. К ним можно отнести, например, наличие вращающихся дисков галактик, рождение звезд преимущественно в областях с минимальной потенциальной энергией (вблизи плоскости галактик), появление звезд в спиральных ветвях, связь массивных газовых конденсаций и наиболее холодных областей межзвездного газа с очагами звездообразования, почти полное прекращение звездообразования в тех галактиках, которые содержат мало межзвездного газа, особенности химического состава очень старых звезд. Этот перечень можно было бы расширить и продолжить.

Наблюдательные данные указывают, что с областями звездообразования связаны плотные и очень холодные газо-пылевые облака размером меньше 1 пс, тепловая энергия которых меньше гравитационной (т. е., по-видимому, находящиеся на стадии сжатия). Получены и спектроскопические доказательства продолжающегося оседания газа со скоростями свободного падения на поверхность очень молодых звезд (типа УУ Ориона).

К настоящему времени удалось заложить основы теории гравитационной конденсации звезд, базирующейся на фундаментальных законах физики и известных свойствах межзвездной среды. Хотя теорию нельзя

считать законченной — в ней имеются определенные проблемы, и некоторые процессы различные авторы представляют проходящими несколько по-разному — она наглядно показала физическую возможность гравитационной конденсации межзвездного газа.

Представление о гравитационной конденсации газа не входит в прямой конфликт с наблюдениями, позволяя при этом понять многие наблюдаемые свойства звездных систем. Посмотрим, как происходит с этой точки зрения процесс звездообразования в галактиках различных типов.

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ГАЛАКТИКИ

Поражает почти полная идентичность цвета E-галактик, близких по светимости. Выше говорилось, что они состоят, по-видимому, из очень старых звезд. Однако очаги звездообразования могут быть и в них — вблизи самого центра. Значительная часть этих галактик (около 15%) в центральной области имеет достаточное количество горячего газа, чтобы его присутствие можно было выявить из спектрального анализа. В одном случае в центре галактики даже обнаружена гигантская область ионизованного водорода типа туманности Тарантул в БМО. Но и в этом случае полная масса межзвездного газа составляла ничтожный процент от массы всей галактики. В близких к нам эллиптических галактиках — NGC 205 и NGC 185, которые хорошо видны на фотографиях как светлые округлые пятна рядом с туманностью Андромеды, также обнаружены клочковатые следы диффузного вещества вблизи центра галактики. Там же в 1950-х годах было найдено присутствие нескольких десятков горячих голубых звезд большой светимости, по-видимому, недавно образовавшихся. Есть и другие примеры, показывающие, что звездообразование, хотя очень слабое, может продолжаться и в эллиптических галактиках. Но откуда берется для этого межзвездный газ?

Оказывается, не столько удивительно, что он там есть, сколько то, что его так мало. Действительно, раз имеются звезды, то многие из них в течение своей эволюции должны потерять часть своего вещества, как это мы наблюдаем, например, в нашей Галактике. По приближенным оценкам, в массивной галактике, состоящей

из старых звезд, в межзвездное пространство за год выбрасывается около одной или нескольких солнечных масс этого газа. Это дает 10^9 масс Солнца за 1 млрд. лет, а такое количество газа мы легко могли бы обнаружить. Куда же девался газ?

Интересный ответ на этот вопрос был предложен в 1972 г. У. Метьюсом и Дж. Бекером. Они предположили, что сброшенный звездами газ нагревается Сверхновыми. Хотя взрывы Сверхновых — редкое явление, они, отдавая часть своей энергии межзвездной газовой среде, в состоянии нагреть очень разреженный газ до температуры в несколько миллионов градусов. При таких температурах, как показывают расчеты, газ уже не удерживается в галактике и покидает ее. При этом образуется как бы «галактический ветер» (по аналогии с «солнечным ветром») — поток горячего газа в межгалактическое пространство. Правда, расчеты показывают, что уходит не весь газ. Вблизи самого центра, где плотность межзвездного газа больше, чем в других местах, он будет довольно быстро остывать и его не смогут нагреть до достаточно высоких температур взрывы Сверхновых. Собираясь в центральной области, он будет способствовать процессу звездообразования или служить источником энергии для активности галактического ядра (об этом будет идти речь дальше).

СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ И ИХ ВЕТВИ

В больших спиральных галактиках, наподобие той, в которой мы живем, полная масса звезд составляет около 100—200 млрд. масс Солнца. Если разделить это число на вероятный возраст галактик (10—20 млрд. лет), то мы получим среднюю скорость образования звезд из газа за всю историю галактики, которая равна 5—20 солнечных масс в год. Однако темп звездообразования постепенно уменьшается со временем, поэтому сейчас в большинстве случаев он составляет для большинства спиральных галактик 1—5 массы Солнца в год. А несколько молодых звезд в год — это не так уж много.

Молодые звезды образуются неодинаково часто по всей галактике. Темпы звездообразования зависят от расстояния от центра галактики примерно так, как по-

казано на рис. 6¹. Хотя молодые звезды могут присутствовать (в небольшом количестве) вблизи центра галактики, подавляющее большинство их связано со спиральными ветвями. Образование звезд за пределами оптически наблюдаемых ветвей практически не проис-

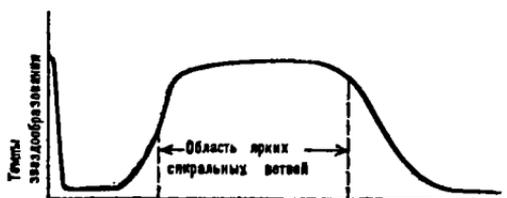


Рис. 6. Зависимость темпов звездообразования от расстояния от центра галактики R , характерная для спиральных галактик

ходит, несмотря на то что в ряде галактик там найден межзвездный газ.

Темп звездообразования отличается и для различных типов спиральных галактик. В галактиках Sa он, как правило, меньше, чем в галактиках Sc. Обычно в спиральных ветвях Sa-галактик не наблюдается отдельных голубых звезд или ярких областей H II — они там не только реже встречаются, но и слабее по светимости (последнее пока представляет собой загадку).

Чтобы понять, как происходит рождение звезд в галактиках, важно выяснить, откуда же появляются спиральные ветви и почему звезды возникают преимущественно в них?

Если взглянуть на фотографии некоторых спиральных галактик, то может показаться, будто вся галактика, кроме небольшой части в центре, состоит из спиралей. Но такое впечатление ошибочно. Проведя специальные измерения, можно убедиться, что даже в галактиках с хорошо развитой структурой светимость спиральных ветвей (и в особенности масса) составляет небольшую часть от светимости (или массы) всей галактики². Выделяются же они на общем звездном фоне потому, что в спиральных собраны самые яркие объ-

¹ О темпах звездообразования обычно судят по количеству наблюдаемых в галактике голубых звезд большой светимости и связанных с ними областей H II. Продолжительность жизни наблюдаемых голубых звезд сравнительно мала, поэтому их можно считать возникшими недавно.

² Идея о незначительной роли ветвей в распределении массы галактики была выдвинута советским ученым М. Р. Эйгенсоном еще в 1938 г.

екты галактик: горячие звезды с температурой на поверхности 20—30 тыс. градусов, скопления молодых звезд, звездные ассоциации и массивные газовые облака, ярко флюоресцирующие под действием ультрафиолетового излучения горячих звезд. Звезды с большой светимостью и высокой температурой живут гораздо меньше, чем «обычные» звезды типа нашего Солнца. Поэтому мы наблюдаем их только недалеко от мест, где они родились. Их концентрация в спиральных ветвях говорит о том, что ветви в галактиках — это вытянувшиеся длинной цепочкой или полосой области, где происходит величественный процесс зарождения звезд. Правда, известны галактики, где мы видим молодые звезды, а спиральных ветвей у них нет. В таких галактиках, как правило, много межзвездного газа. Похоже, что спиральные ветви просто облегчают и ускоряют образование звезд, делая этот процесс эффективным, даже когда остается мало необходимого для него «сырья» — межзвездного газа.

Спиральная форма ветвей может быть связана с вращением галактик. Это вращение таково, что его угловая скорость уменьшается с расстоянием от центра галактики. Отсюда следует, что отдельные части галактики обегают вокруг галактического центра с различными периодами, и если чем-нибудь выделить во вращающемся диске достаточно большую область, то уже меньше чем через один оборот она превратится в сегмент спирали.

Представим теперь себе, что в нескольких областях в плоскости галактики газ уплотнился и возникли очаги звездообразования. Тогда дифференциальное вращение галактики очень быстро (если можно назвать быстрым процесс, идущий десятки миллионов лет) «размажет» каждую такую область в сегмент — «обрывок» спиральной ветви. И действительно, «обрывки» спиральных ветвей в некоторых галактиках наблюдаются. Наверное, они есть в каждой звездной системе, где очаги звездообразования могут растягиваться дифференциальным вращением. Но это не решение проблемы, поскольку во многих галактиках спиральные ветви заведомо не сегменты. Их удастся проследить на протяжении одного и даже более оборотов вокруг ядра. Только процесс, охватывающий значительную часть всей

галактики, способен привести к образованию спиральных ветвей.

Быть может, спиральные ветви — это просто выбросы вещества из центра галактики? Но, во-первых, спиральные ветви далеко не всегда «дотягиваются» до центра (в галактиках с перемычкой они, например, отходят от нее под прямым углом), а, во-вторых, вещество спиральных ветвей (звезды, межзвездный газ) вращается вокруг центра галактики по орбитам, близким к круговым, а не движется радиально, как можно было бы ожидать в случае выброса. К тому же, выбросы должны происходить часто, чтобы можно было объяснить широкую распространенность спиральных галактик¹.

В таком случае спиральные ветви, может быть, представляют собой изогнутые трубки сравнительно плотного межзвездного газа, в котором образуются звезды? Наблюдения нейтрального межзвездного водорода не противоречат такому предположению, но что может удерживать газ в таких трубках, почему он не разлетится во все стороны? Собственное гравитационное поле газа удерживать его не может: действие гравитации приведет лишь к тому, что газовая трубка разобьется на отдельные конденсации и разрушится. Да и дифференциальное вращение галактики быстро растянет трубку, пока она через 1—2 оборота не «закрутится» совсем. Так что таким путем спиральные ветви объяснить не удастся.

Тогда, может быть, в состоянии спасти трубку газа от разрушения магнитное поле? Но и на этом пути встречаются большие трудности: чтобы спиральная ветвь-трубка вращалась как целое, необходимо иметь магнитное поле с плотностью энергии, в несколько сот раз большей соответствующей величины для поля в межзвездном газе нашей Галактики. Вряд ли это возможно: такое поле привело бы к легко обнаруживаемым эффектам, и его присутствие тем или иным путем выдало бы себя.

Решение (единственное ли?) проблемы существования спиральных ветвей удалось найти на ином пути, рассматривая их не как сплошные трубки, а как области, где особенно близко друг к другу располагаются орби-

¹ О возможной роли выбросов вещества в образовании спиралей см. сноску на с. 45.

ты звезд, вращающихся вокруг центра галактики (например, так, как показано на рис. 7). Спиральные ветви с этой точки зрения являются лишь уплотнениями в звездном диске, которые не включают в себя все время одни и те же объекты, а перемещаются по диску галактики, не перенося с собой вещества, как не переносят его волны, распространяющиеся по поверхности воды.

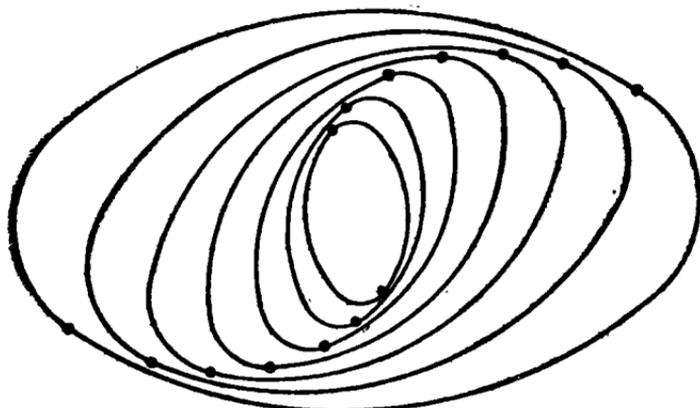


Рис. 7. Схематическое изображение возможной ориентации звездных орбит в галактике, при которой звезды будут концентрироваться к двум спиральным ветвям

Первым, кто начал разрабатывать подобный подход к объяснению природы спиральных ветвей, был шведский математик Б. Линблад. Начиная с 1960-х годов, теория спиральных ветвей как волн плотности стала быстро развиваться благодаря новому гидродинамическому подходу к вопросу распространения волн плотности, заимствованному из плазменной физики. Этот подход был применен к изучению волн сжатия со спиральным фронтом, распространяющихся в газо-звездном диске галактики. Согласно волновой теории образования спиральных ветвей дифференциальное вращение галактики не должно разрушать спиральную структуру, так как в отличие от звездного диска спиральный узор вращается с постоянным периодом, подобно ри-

сунку на твердой поверхности волчка. При этом и звезды, и газ движутся относительно спиральных ветвей, периодически проходя через фронт волны. На движение звезд такое прохождение сказывается мало: их плотность в спиральной ветви становится лишь чуть-чуть (на несколько процентов) выше. Иное дело — межзвездный газ. Его можно рассматривать как сплошную, легко сжимающуюся среду, плотность которой при прохождении через «гребень» волны должна резко возрастать. Здесь и кроется ответ на вопрос о том, почему спиральные ветви — место рождения звезд. Ведь сжатие межзвездного газа способствует его быстрой конденсации в облака, а затем и в звезды.

Процесс прохождения газа через спиральную ветвь неоднократно рассматривался теоретически. Результаты расчетов показывают, что, когда газ «входит» в спиральную ветвь, его плотность и давление резко возрастают (в некоторых случаях возникает ударная волна), и происходит быстрое разбиение газа на две фазы: плотную, но холодную (облака) и разреженную, но с температурой 7—9 тыс. градусов (межоблачная среда). Если масса облаков велика — несколько сотен масс Солнца, то внешнее давление горячей среды может сжать их настолько, что облака станут гравитационно неустойчивыми и смогут сжиматься (до образования звезд). Одновременно и независимо действует и другой механизм увеличения плотности газа. Он связан с тем, что межзвездный газ в магнитном поле галактики образует неустойчивую систему. Газовые облака как бы «соскальзывают» по силовым линиям магнитного поля, опускаясь к самой плоскости звездного диска — в так называемые «потенциальные ямы». Там они скапливаются и сливаются в большие газовые комплексы, где и происходит образование звезд. Эти комплексы газа, нагретые звездами, и создают клочковатый вид спиралей в галактиках, богатых межзвездным газом.

Появившиеся в результате этих процессов звезды продолжают свое движение по галактике с теми скоростями, которыми обладал породивший их газ, и постепенно — за десятки миллионов лет — выходят из спиральной ветви. Но за это время самые яркие звезды уже успевают постареть и перестают излучать много энергии («погаснут» и газовые облака, светившиеся благодаря этим звездам). Поэтому мы почти всегда на-

блюдаем яркие звезды и горячий межзвездный газ именно в спиральных ветвях, а не по всей галактике. Более того, эти объекты (а также темные «прожилки» пыли, появление которых, по-видимому, связано со сжатием газа) концентрируются не просто к спиральным ветвям, а к их внутренней стороне — как раз там, где, согласно волновой теории, ожидается «вхождение» газа в волну уплотнения и его сжатие.

После прохождения спиральной ветви межзвездный газ вновь становится разреженным — один атом на несколько кубических сантиметров пространства. Через фронт волны проходят новые массы газа, возникают новые очаги звездообразования.

Вывод о том, что спиральные ветви галактик могут быть образованы волнами плотности, находит свое подтверждение и в расчетах (с помощью быстродействующих ЭВМ) движения большого количества материальных точек, имитирующих звезды и газ галактического диска. Эти расчеты показали, что газ в своем движении действительно может образовывать ярко выраженную спиральную структуру.

При объяснении природы спиральных ветвей волновая теория встретила с серьезной проблемой: волны плотности оказались не «вечными». Они должны медленно затухать и исчезли бы, просуществовав не более 1 млрд. лет, если не возбуждались бы вновь или не поддерживались бы каким-либо источником энергии. Поэтому перед учеными встала еще одна задача: выяснить, каков источник или, лучше сказать, механизм возбуждения волн плотности?

Таких механизмов было предложено несколько, однако, какой из них играет основную роль в галактиках, пока неясно. Возбудить волны может и взаимодействие двух звездных подсистем галактик, если одна вращается быстро, а другая — медленно (звездный диск и сфероидальная составляющая галактики), и гравитационная неустойчивость межзвездной среды на периферии галактик, и неосесимметричное распределение масс, часто наблюдаемое вблизи центра галактик, а также, возможно, выбросы из ее центрального ядра¹.

¹ Действительно, в отдельных галактиках выбросы больших масс вещества из галактических центров, по-видимому, играют важную роль в формировании спиральной структуры. (Продолжение сноски см. с. 46)

Вообще говоря, как волны на воде или звуковые волны в воздухе можно возбуждать большим количеством способов, так и волны плотности в галактиках могут возбуждаться самыми различными путями — результат будет один: спиральная структура.

Окончательная проверка правильности волновой теории происхождения спиральных ветвей галактик, видимо, является делом недалекого будущего. Но пока еще наши знания о природе спиральных ветвей далеко не полны и все предположения и расчеты еще нуждаются в подтверждении. Да и форма спиральных ветвей часто слишком сложна, чтобы считать их математически правильной спиралью. Ветви могут быть и широкими и узкими, отклоняться от формы спирали, сливаться, разветвляться, соединяться перемычками, образовывать несколько независимых «ярусов» и т. д. (Б. А. Воронцов-Вельяминов среди тысяч спиральных галактик обнаружил и ряд таких, две ветви которых словно бы закручиваются в разные стороны!). Объяснить это многообразие форм пока не удастся. Наконец, в некоторых звездных системах спиральные ветви имеют явно неволновую природу, хотя их форма, видимо, все же связана с вращением галактики. Это относится не только к спиральным «обрывкам» внутри галактик. Известно немало случаев, когда спиральные ветви... выходят за пределы самих галактик! Широкие и неяркие, они тянутся неровной полосой, подчас на многие десятки тысяч световых лет через периферийные области звездных систем, уходя в межгалактическое пространство. Наблюдаются они почти исключительно там, где есть две или несколько так называемых взаимодействующих

Так, в одной из близких к нам спиральных галактик (NGC 4258) радионаблюдения с помощью радиотелескопа в Вестерборке открыли существование не одной, а двух пар радиоветвей; причем одна пара совпадает по положению с наблюдаемыми на фотографии спиральными ветвями галактики, а другая, более заметная по радиоизлучению, на фотографиях не видна. Было высказано предположение, что эта «невидимая» пара радиоветвей возникла в результате выброса больших масс газа (около 10 млн. масс Солнца) из ядра галактики в противоположные стороны. Выброшенные струи, образованные облаками газа, сжимали при своем движении межзвездный газ галактики, что неизбежно должно было привести к возрастанию интенсивности его радиоизлучения. Не исключено, что такими «толчками» из центра галактики могут возбуждаться волны плотности галактик.

галактик¹. Один из пионеров изучения взаимодействующих галактик — Б. А. Воронцов-Вельяминов обнаружил большое количество близких друг к другу галактик, одна или две из которых обладают странными межгалактическими ветвями, не всегда спиральными по своему виду (рис. 8). Подобные ветви в некото-

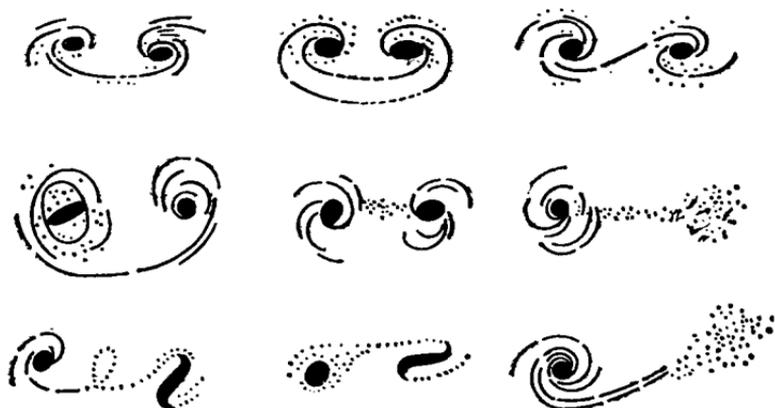


Рис. 8. Схематическое изображение некоторых характерных форм взаимодействующих галактик (по Б. А. Воронцову-Вельяминову)

рых случаях могут появиться при действии на звездную систему гравитационного поля соседней галактики. Внешнее гравитационное поле может изменить внутреннюю структуру галактики (ведь все ее вещество движется под влиянием сил гравитации). Когда к галактике подходит другая массивная звездная система, возникают силы, стремящиеся разрушить галактику. Но чаще всего до полного разрушения дело не доходит. Часть звезд отрывается от основного тела галактики и при определенных условиях может образовать одну или две «струи», искривляющиеся из-за того, что звезды до этого вращались вокруг центра галактики. По-

¹ Взаимодействующими обычно называют также галактики, форма которых искажена влиянием соседних, близко расположенных галактик. Их формы могут быть самыми разнообразными. Установить причину наблюдаемых искажений иногда очень трудно. Основная роль, по-видимому, принадлежит возмущающему действию гравитационного поля одной галактики на другую.

лучаются спирали из оторванных от галактики звезд. Если звездная система не окружена достаточно плотной газовой средой или не имеет размер, много больший, чем предполагают сейчас, то судьба таких спиралей проста — пройдут сотни миллионов лет и спирали исчезнут: входящие в них звезды «упадут» назад или навсегда покинут галактику. Правильность подобных представлений подтверждается расчетами взаимодействия звездных систем, проводившимися на ЭВМ.

Но вот что удивительно: можно найти такие галактики, у которых внешние ветви «стыкуются» с обычными спиральными ветвями. Значит, возбуждение волн плотности может быть связанным с внешним воздействием. Получается, что одна галактика может на расстоянии влиять на образование звезд (а значит, и планет) в другой, соседней галактике¹.

НЕПРАВИЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ

Существование неправильных галактик наглядно показывает, что для звездообразования не обязательно ни сжатие газа в спиральной ветви, ни наличие ядра, поскольку и то и другое у них отсутствует. Правда, судя по тому, что в них сохранилось больше межзвездного газа, чем в спиральных галактиках, звездообразование в неправильных галактиках происходило в среднем менее интенсивно (по-видимому, как раз из-за отсутствия спиральных ветвей). Особенно хорошо звездообразование изучено в двух ближайших к нам галактиках этого типа — БМО и ММО². Хорошо заметно, что молодые звезды в этих галактиках сильнее всего группируются в областях, богатых межзвездным газом. Однако однозначной зависимости темпов звездо-

¹ Есть основания полагать, что наша Галактика также несет следы взаимодействия с соседними системами — БМО и ММО. Австралийские радиоастрономы обнаружили длинный и узкий, пересекающий более чем полнеба «рукав» разреженного холодного нейтрального водорода, связанный с этими двумя соседними галактиками. Звезд в газовом рукаве пока не обнаружено, но они могут быть и слишком слабыми, чтобы их там можно было различить как отдельные точки.

² Правда, остается еще вопрос — насколько они типичны для неправильных галактик. Некоторые исследователи считают, что в БМО имеются признаки нечетко выраженной спиральной структуры.

образования от плотности и количества газа, по-видимому, не существует. В БМО звездообразование, например, происходит интенсивнее, чем в ММО, хотя газ в нем составляет меньшую долю массы.

В 1973 г. американский ученый П. Ходж изучил в БМО положение более полутысячи звездных скоплений различных возрастов. Оказалось, что в БМО звездообразование имеет характер отдельных «вспышек», активизируясь то в одной, то в другой области галактики. Размеры этих областей — около 1500 пс. В каждой области активное звездообразование продолжается порядка 1 млн. лет, после чего возникновение звездных скоплений прекращается, но продолжается или начинает происходить где-нибудь в другом месте¹. Наблюдатель, который мог бы следить за галактикой миллионы лет, увидел бы в ней калейдоскопическое чередование возникающих и гаснущих светлых областей.

Сделанный Ходжем вывод о «вспышечном» характере звездообразования в БМО был подтвержден советским астрономом Ю. Н. Ефремовым на основании изучения цефеид в этой галактике (правда, он получил несколько большую, чем у Ходжа, оценку продолжительности вспышек). Теоретического объяснения такой картины звездообразования пока не предложено, но можно предположить, что «вспышечный» характер звездообразования связан с развитием неустойчивости газового диска галактики, приводящий к концентрации газа то в одном, то в другом месте галактики.

Вспышки звездообразования, видимо, представляют собой типичное явление для неправильных галактик. В некоторых случаях вспышки могут резко поднять светимость всей галактики и сделать ее более голубой. Тогда впечатление будет таким, словно мы наблюдаем только что родившуюся или очень молодую галактику, в которой еще нет старых звезд. В связи с этим представляют интерес наблюдения голубых по цвету галактик — нет ли среди них действительно молодых объектов?

¹ Этот вывод перекликается с более ранними высказываниями В. Бааде, который говорил по поводу одной из неправильных галактик: «Я думаю, что когда в какой-нибудь области идет процесс звездообразования, он каким-то образом распространяется, подобно болезни, на соседние области, во всяком случае такое впечатление определенно создается».

Где искать молодые галактики?

Американские наблюдатели У. Саргент и Л. Сирль обнаружили несколько небольших, но ярких галактик голубого цвета, обладающих уникальными характеристиками, — они выглядели как гигантские области ионизованного водорода, изолированные в межгалактическом пространстве. (Поэтому авторы свою первую статью о них так и назвали: «Межгалактические области II».) Как показали радионаблюдения этих галактик в линии нейтрального водорода, в них так много межзвездного газа, что он может составлять основную долю массы этих необычных галактик (выходит, что, строго говоря, не всегда правильно называть галактики звездными системами!). К тому же оказалось, что химический состав межзвездного газа в этих галактиках тоже не совсем обычен: в нем, по-видимому, мало химических элементов тяжелее гелия (по сравнению с межзвездным газом в обычных галактиках). Цвет у галактик — голубой, говорящий о большом количестве молодых звезд, а по химическому составу — это население типа II!

Можно сделать несколько предположений относительно природы этих галактик. Во-первых, в них, возможно, велика доля звезд с очень большой массой по отношению к числу всех звезд. Поэтому в галактике и наблюдается много горячего газа.

Во-вторых, возможно, мы наблюдаем действительно молодые галактики — с возрастом несколько сотен миллионов лет, так что все звезды в них образовались недавно.

И наконец, в-третьих, они могут быть и старыми галактиками, наблюдаемыми во время «вспышек» звездообразования (довольно редко происходящих).

Первое предположение не объясняет недостаток тяжелых элементов, происхождение которых по существующей теории связано с массивными звездами.

Второе предположение также сталкивается с большими трудностями. Если считать, что образование галактик происходит в природе непрерывно, то придется допустить существование во много раз большего количества постаревших (уже не столь голубых) карликовых систем. Однако это не согласуется с наблю-

деннями. По оценкам того же Саржента, голубые компактные галактики, напоминающие «изолированные области H II», составляют довольно заметную долю (около 10%) от всех галактик низкой светимости. А это существенно больше, чем можно было ожидать при непрерывном образовании карликовых галактик.

Остается третий вариант как наиболее достоверный. При этом можно предположить, что эти звездные системы имеют такой же возраст, как и другие галактики (около 10—20 млрд. лет), но за время своего существования они в среднем испытали по 5—10 резких «вспышек» звездообразования. Те из карликовых галактик, которые мы наблюдаем во время этих «вспышек», выглядят так, словно у них только недавно началось образование первых звезд.

Итак, наличие большого количества молодых звезд еще не говорит о молодости всей галактики, а указывает лишь на интенсивное звездообразование в настоящее время.

Одно время считалось, что если неправильные галактики более богаты межзвездным газом и яркими звездами, то они, по-видимому, являются молодыми объектами. В действительности это не так. Например, в БМО и ММО найдено не только много молодых звезд, но и старых (населения типа II). Конечно, нельзя считать возраст самых старых звезд во всех галактиках абсолютно одинаковым. Сам процесс формирования первого поколения звезд не может очень быстро произойти, и возраст этих звезд для различных галактик вполне может отличаться на сотни миллионов лет. Интересно отметить, что, как показывают исследования, старые шаровые звездные скопления в БМО, по-видимому, на 1 млрд. лет моложе своих «собратьев» в нашей Галактике, а шаровые скопления туманности Андромеды примерно на столько же старше. Но 1 млрд. лет — это менее 0,1 части возраста этих галактик, так что возраст их все же можно считать примерно одинаковым.

Существуют ли вообще молодые галактики, возраст которых значительно меньше, чем у этих звездных систем? Как показали американские астрономы Л. Сирль, У. Саржент и В. Багнуоло в 1973 г., наблюдаемый цвет около 150 наиболее ярких галактик совместим с предположением об их одинаковом (причем большом) воз-

расте. Во всяком случае, среди них нет таких галактик, возраст которых отличался бы от 10^{10} лет более чем втрое (в ту или другую сторону). Различие их цвета как и количества межзвездного газа объясняется не разным возрастом, а неодинаковым темпом звездообразования в настоящее время и в прошлом¹.

Есть еще одна причина, заставляющая искать эпоху образования галактик в далеком прошлом — 10—20 млрд. лет назад. Это — процесс расширения Вселенной, который также начался 10—20 млрд. лет назад.

В настоящую эпоху плотность межгалактического вещества слишком мала, чтобы гравитационные силы смогли заставить чрезвычайно разреженный межгалактический газ сжаться до образования новых звездных систем. Образование галактик, по-видимому, происходило на ранних стадиях расширения Вселенной, когда плотность вещества была во много раз выше. Правда, как показывают оценки, рост гравитационной неустойчивости в расширяющейся Вселенной происходит слишком медленно и поэтому не может привести к образованию галактик из первоначально однородной среды². Требуется некоторые начальные («затравочные») возмущения среды (пусть даже очень малые), рост которых привел бы к резко неоднородному распределению вещества во Вселенной и появлению сначала газовых протогалактик, а затем и звездных островов—галактик.

Существует несколько теорий образования галактик, в которых рассматриваются различные типы начальных возмущений и их влияние на расширяющуюся плазму, существовавшую на ранней стадии эволюции Вселенной. Наибольшее распространение получили две из них: теория адиабатических возмущений плотности и вихревая теория. И та и другая основаны на теории относительности и космологической теории горячей Вселенной. Общее между ними и то, что согласно каждой из них быстрый рост возмущений привел к образованию протогалактик после того, как горячая плазма, существовавшая на самых ранних стадиях расширения

¹ Конечно, нельзя исключить возможность того, что та или иная из наблюдаемых галактик действительно «молодая». Но достоверных случаев «молодости» пока неизвестно.

² Строго говоря, из «идеально» однородной среды никаких отдельных концентраций вещества вообще не получится.

Вселенной за короткое время остыла и стала прозрачна для пронизывающего ее излучения. Это «остывание» произошло, когда средняя плотность вещества во Вселенной была в 2 млрд. раз больше, чем в настоящее время, — приблизительно такая же, какая наблюдается сейчас в плотных облаках межзвездного газа. Однако механизм формирования галактик в теориях адиабатических и вихревых возмущений различен. Согласно первой теории на самой ранней стадии расширения Вселенной уже существовали колебания плазмы (типа звуковых) небольшой амплитуды. Как показали расчеты, эти колебания догалактической плазмы при остывании вещества приводят к обособлению гигантских масс газа (около 10^{13} солнечных масс). Эти конденсации, как показывают те же расчеты, сделанные группой советских ученых под руководством академика Я. Б. Зельдовича, должны были быть сильно сплюснуты (их называют «блинами»). Затем в них уже возникают уплотнения с массами 10^6 — 10^{11} солнечных масс — газовые протогалактики, которые уже превращаются в звездные системы, сжавшись под действием собственной гравитации.

Согласно вихревой теории плазма до остывания находилась в состоянии хаотического вихревого (турбулентного) движения. Когда из-за расширения плазма остыла, вихревые движения продолжались: в холодном газе возросла роль гравитации, которая «стянула» вращающийся газ в гравитационно-связанные объекты — протогалактики.

Таким образом, в обеих теориях сделана попытка объяснить происхождение галактик, но исходя из различных предпосылок. Требуется дальнейшая наблюдательная проверка выводов этих теорий.

Конечно, развитию наших представлений о рождении галактик помогли бы непосредственные наблюдения этого процесса. Среди сравнительно близких к нам галактик нет таких, которые со всей определенностью можно было бы считать молодыми, хотя поиски и исследования «подозрительных» объектов должны быть продолжены. Но даже если окажется, что все галактики появились в природе миллиарды лет назад — мы в принципе все равно можем наблюдать их молодыми. Астрономия, наверное, единственная наука, которая позволяет увидеть (не воссоздать по крупицам, а действи-

тельно увидеть) то, что происходило очень давно. Из-за конечной скорости распространения света очень далекие галактики мы наблюдаем такими, какими они были миллиарды лет назад. Однако даже гигантские по светимости галактики с таких фантастических расстояний выглядят едва заметными туманными пятнышками. Молодые же галактики должны находиться еще дальше — где-нибудь на расстоянии 10—20 млрд. св. лет. Но они, как можно ожидать, имеют (вернее, имели) гигантскую светимость, потому что первый миллиард лет своей истории звезды, по-видимому, рождались особенно интенсивно — за это время возникла сферoidalная составляющая, появились тяжелые элементы... Может быть, большая светимость молодых галактик когда-нибудь поможет нам увидеть их с такого расстояния?

Попытки обнаружить молодые галактики «издалека» пока были безрезультатными. По-видимому, причина этого не только в громадном расстоянии. Большое красное смещение, которое должно быть в их спектрах, дополнительно ослабляет потоки света, идущие от далеких галактик. Удастся ли увидеть молодые галактики — покажет будущее¹.

Ядра галактик

Все изменения в галактиках, о которых шла речь выше, происходят для нас очень медленно — за десятки и сотни миллионов, а то и за миллиарды лет. Однако изучение галактик не перестает преподносить сюрпризы. Оказалось, что в некоторых галактиках происходят ощутимые изменения не только за короткую человеческую жизнь, но и за время, меньше года! Изменениям могут быть подвержены цвет, светимость, спектр... Какие же грандиозные процессы в галактиках приводят к этому? «Виновниками» оказались ядра галактик.

Дать строгое определение ядра, опирающееся на на-

¹ Большие надежды ученые связывают с наблюдением протогалактик на их «газовой» стадии — по излучению в линии 21 см, сильно «смещенной» в длинноволновую область спектра из-за большого красного смещения далеких протогалактик.

блюдения галактик, к сожалению, нельзя. Обычно ядром галактики называют ее самую центральную область, отчетливо выделяющуюся по своей яркости. Но в зависимости от расстояния до галактики эта область будет иметь и различный размер. Если галактика близка, мы можем выделить (и назвать ядром) маленький яркий участок с размером в несколько десятков световых лет, а в далеких галактиках, имеющих, скажем, красное смещение $\Delta\lambda/\lambda_0=0,1$, вся центральная область размером в 10—20 тыс. св. лет будет едва отличима от точки. В этом случае ядро, по определению, включает в себя большую часть звездного населения галактик. У ядер галактик нет резко очерченных границ и поэтому нет и общепринятой договоренности относительно размера той части галактики, которую можно считать ядром (всю ее яркую центральную часть или похожую на звезду яркую точку в центре, если таковая имеется). Иногда эта неопределенность порождает путаницу и недоразумения.

Яркость почти у всех галактик увеличивается к центру. Не означает ли это, что центральная яркая область — ядро — существует у любой галактики? Наблюдения близких галактик показали, что это не так. Если у одних увеличение яркости происходит плавно до самого центра (например, в карликовых эллиптических галактиках), то у других выделяется резкая яркая область размером в сотни световых лет. В некоторых случаях в центре видна словно маленькая звездочка чуть расплывчатых очертаний. Одни называют ее ядром, другие — ядрышком («керном») ¹.

Вот в пределах этих небольших образований, в тысячи раз меньших по размеру, чем сами галактики, по видимому, и разворачиваются грандиозные процессы, которые могут влиять на галактику в целом. Первым ученым, который пришел к такому выводу, был советский астрофизик, академик В. А. Амбарцумян.

Спектр центральных областей галактик показывает, что ядра в основном состоят из звезд. И тем не менее поскольку ядра занимают привилегированное место, часто являясь центром спиральной структуры, мо-

¹ Были даже такие случаи, когда за ядро принимали самую настоящую слабую звездочку нашей Галактики, которая по игре случая проецировалась на самый центр далекой галактики.

жно было заподозрить в них нечто особенное. Английский астрофизик Дж. Джили еще в 1928 г., на заре внегалактической астрономии, писал: «Настойчиво заявляет о себе предположение, что центры туманностей имеют природу особенных точек, в которых в нашу Вселенную вливается вещество из каких-то совершенно неизвестных нам пространственных измерений...»

Конечно, представление о «влипании» вещества и сейчас представляется невероятным и несовместимым с существующими физическими представлениями, однако выделение из ядер колоссального количества энергии стало непреложным фактом.

Начиная с 1908 г., в научной литературе стали появляться все новые и новые сообщения о странных галактиках, в спектрах которых наблюдались нетипичные яркие линии излучения, напоминающие те, которые возникают в планетарных туманностях — разлетающихся газовых оболочек вокруг чрезвычайно горячих звезд:

К 1943 г. американский астроном К. Сейферт насчитал таких галактик двенадцать и, подробно исследовав половину, наглядно показал необычность их структуры и спектров: они имеют очень яркое ядро, выглядящее как звезда в центре галактики, и, что очень важно, яркие и чрезвычайно широкие линии излучения в спектре. Ни Сейферт, ни его предшественники не могли дать сколько-нибудь обоснованного объяснения наблюдаемым особенностям. Открытие таких галактик — их назвали сейфертовскими — было несколько преждевременным, и в течение 15 лет после выхода работы Сейферта ими никто не занимался.

Интерес возобновился лишь в конце 1950-х годов, когда оказалось, что одна из галактик Сейферта — NGC 1275 — является довольно мощным радиоисточником. Тогда наблюдениями этих галактик занялись всерьез. В конце 1960-х годов число исследованных сейфертовских галактик еще ограничивалось десятью спиральными (две из наблюдавшихся Сейфертом оказались обычными галактиками, зато было найдено четыре новых). Но ко второй половине 70-х годов их число составило уже около 200.

Столь бурный рост числа известных галактик с необычайными свойствами ядер обязан главным образом наблюдениям советского астронома Б. Е. Маркаря-

на ¹ а также других советских ученых главным образом из Бюраканской обсерватории, Государственного Астрономического института им. П. К. Штернберга, Крымской астрофизической обсерватории.

Необычные ядра этих галактик оказались центрами выделения колоссального количества энергии, по сравнению с которой энергия вспышек Сверхновых выглядит просто жалкой. Яркое ядро сейфертовской галактики говорит о потоке света гигантской мощности, выходящем из крошечной области в центре. Широкие спектральные линии указывают на движение газа в ядре галактики с относительными скоростями в несколько тысяч километров в секунду (до 13 тыс. км/с — такая скорость обнаружена в одной из галактик в созвездии Центавра в 1973 г.). Полная кинетическая энергия движущегося газа в ядре (не считая энергии, излучаемой ядром) составляет для сейфертовских галактик 10^{52} — 10^{54} эрг. Это в тысячи раз больше энергии, выделяемой при вспышках Сверхновых. При этом следует отметить, что на долю межзвездного газа в ядрах сейфертовских галактик приходится сравнительно небольшая часть полной энергии. Основная энергия, как выяснилось, выделяется при излучении инфракрасного света. Оказалось, что крошечное ядро в инфракрасных лучах часто имеет в 5—10 раз большую светимость, чем вся остальная галактика во всем спектральном диапазоне — от самых длинных до самых коротких волн.

Каждую секунду ядра некоторых сейфертовских галактик излучают энергию более 10^{45} эрг. Для сравнения укажем, что Солнце излучает такую энергию лишь за 10 тыс. лет!

¹ На метровом телескопе системы Шмидта Бюраканской обсерватории Маркарян начал фотографировать отдельные участки неба через гигантскую призму, укрепленную перед объективом. Спектры галактик, попадающих в поле зрения телескопа, получаются очень короткими (несколько миллиметров длины) и в них не видно никаких линий, но тем не менее оказалось возможным выбрать по спектру те галактики, фиолетовый конец спектра которых необычно ярко. Так появился термин «галактики Маркаряна» — галактики с «избыточным» ультрафиолетовым излучением.

Подробное изучение спектров этих галактик на других инструментах показало, что многие из них обладают всеми свойствами сейфертовских галактик. Этих галактик оказалось не так уж мало: несколько процентов от числа всех наблюдаемых спиральных галактик.

Есть предположение, что причиной подобной светимости в инфракрасном диапазоне служит межзвездная пыль в ядре сейфертовской галактики или вокруг него, которая, перехватывая энергию центрального источника, переизлучает ее в инфракрасном диапазоне¹.

Самое интересное то, что центральный источник, какова бы ни была его природа, очень мал по сравнению с галактикой. Об этом говорит открытие переменности радио- и оптического излучений ядер. Заметное изменение блеска, как оказалось, может произойти за несколько недель, а то и дней. Это говорит о том, что за это время свет успевает пройти расстояние, равное размеру источника. В противном случае из-за конечности скорости света потоки излучения, возникающие в различных местах источника, приходили бы к нам в разное время и гасили бы тем самым колебания блеска. Исследование спектров ядер показали, что центральный источник окружен клочковатой оболочкой газа размером уже в десятки или сотни световых лет. Плотность газа в ней сравнительно высокая — от нескольких миллионов атомов в 1 см^3 вблизи центрального источника до нескольких тысяч атомов в 1 см^3 вдали от него. Эта газовая среда находится в состоянии быстрого расширения или вращения.

Не менее удивительные примеры активности ядер некоторых галактик стали известны благодаря развитию радиоастрономии.

В 1950-х годах, когда радиоастрономия еще только делала свои первые шаги, а оптическая астрономия имела в своем распоряжении недавно введенный в строй 5-метровый телескоп обсерватории Маунт-Паломар, удалось надежно установить, что некоторые яркие радиоисточники совпадают по своему положению на небе с довольно далекими галактиками. Их называли радиогалактиками. Были основания заподозрить, что их характерная черта — двойственность. Так, галактика, отождествляемая с радионисточником Лебедь А (очень далекий объект, в 100 тыс. раз более слабый, чем самые слабые звезды, заметные невооруженным глазом),

¹ Не только в инфракрасной, но и в других областях спектра (в видимых лучах, в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах) ядра галактик Сейферта обладают удивительно большой светимостью по сравнению с ядрами «нормальных» галактик.

на фотографии выглядит как два почти слившихся пятна (см. рис. 3). Другой радиисточник — Персей А — оказался сейфертовской галактикой NGC 1275, в спектре которой линии излучения говорят о том, что часть газа удаляется от нас со скоростью, на 3000 км/с большей, чем скорость самой галактики.

Первое время считалось, что радиоизлучение возникает при столкновении отдельных галактик, точнее — их газовых масс. Советский астрофизик В. А. Амбарцумян показал необоснованность этой гипотезы и первым усмотрел в радиоизлучении галактик следствие активности их ядер.

Дальнейшие исследования подтвердили, что радиоизлучение действительно связано с потоками быстрых электронов, выбрасываемых вместе с плазмой в межзвездное и даже межгалактическое пространство из центра галактик (обычно одиночной, а не двойной). Двигаясь в магнитных полях, электроны постепенно тормозятся, или, как говорят, «высвечиваются», генерируя радиоволны. Очень часто области радиоизлучения располагаются не только в галактике, но и по бокам от нее, на довольно большом расстоянии от ядра — в десятки и сотни тысяч световых лет. Размеры этих областей часто во много раз превосходят размеры галактик, достигая несколько мегапарсек. Поражает колоссальная энергия, уносимая радиоволнами. Например, одна из самых мощных известных радиогалактик — Лебедь А — излучает в радиодиапазоне в несколько раз больше энергии, чем все ее звезды, вместе взятые, излучают в оптической области спектра. Эта галактика удаляется от нас со скоростью около 16 800 км/с. При постоянной Хаббла, равной 50 км/с · Мпс, такая скорость соответствует расстоянию около 340 Мпс, или немногим более 1 млрд. св. лет! И с такого колоссального расстояния от Лебеда А на Землю непрерывно идет поток радиоволн, который в диапазоне метровых волн лишь в несколько раз уступает потоку от Солнца. Трудно представить, какую фантастическую энергию аккумулирует в себе ядро такой галактики.

Сейчас известно много десятков радиогалактик. Среди них почти нет спиральных и неправильных, но много эллиптических с очень большой массой и светимостью. Почему это так? Возможно, как предложил советский астрофизик И. С. Шкловский, активные ядра

галактик энергетически «подпитываются» газом, сбрасываемым старыми звездами сфероидальной составляющей и падающим на галактический центр.

Вскоре после того как началось изучение радиогалактик, в 1958 г. на международной конференции в Брюсселе В. А. Амбарцумян сформулировал и обосновал идеи об особой, космогонической роли ядер галактик и выбросов вещества из них. Правда, некоторые сделанные им выводы представляются спорными и сейчас — например, о том, что целые галактики могут образовываться из ядер путем их деления. Но вывод об активности ядер галактик, о выбросе больших масс вещества из них — не только быстрых частиц, но и газа (а может быть, и сравнительно плотных образований) — оказался правильным. Исключительно важное значение имели наблюдения небольшой и сравнительно близкой к нам галактики М 82, обратившей на себя внимание потому, что она оказалась заметным радиоисточником. Американские астрономы А. Сендидж и Б. Линдс, анализируя полученные особым образом фотографии галактики, запечатлевшие излучение горячего газа в ней, и получив спектр этого газа, пришли к выводу о том, что несколько миллионов лет назад (если не учитывать время распространения света от галактики) в ядре М 82 произошел мощный взрыв. В результате этого взрыва, по их мнению, большие массы газа приобрели такую энергию, что вылетели или вылетают из галактики со скоростью до 1500 км/с. Правда, в настоящее время существует и другое объяснение, которое не требует наличия большого взрыва в ядре галактики. Однако ядро в ней бесспорно находится в очень активном состоянии — об этом говорит хотя бы мощное инфракрасное излучение, выходящее из маленькой области в центре. Изучение М 82 способствовало открытию большого числа галактик, в которых можно было заподозрить активность ядра.

Оказалось, что активность ядер галактик может иметь много проявлений. Это выбросы вещества и быстрых электронов, это мощное «незвездное» излучение в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, это, наконец, и рентгеновское излучение ядра (часто также очень мощное). Причем нет резкой границы, между активными и «спокойными» ядрами галактик — мы наблюдаем не только разнообразие форм ак-

тивности; но и разнообразие энергетических масштабов. Типичным примером галактик со «спокойными» ядрами можно считать туманность Андромеды и нашу Галактику. В последней, правда, мы ядра не видим — оно закрыто от нас непроницаемой завесой пылевых облаков. Но инфракрасные лучи и радиоволны пробиваются к нам через пыль, и мы наблюдаем в этих диапазонах волн сложную структуру ядра, маленький компактный источник в центре и быстродвижущие газовые облака вблизи него. Так, радиоастрономические наблюдения в линии 21 см показали, что в центральной части Галактики наблюдаются радиальные скорости движения газа с полной массой около 10^7 масс Солнца, говорящие о том, что он выбрасывается из ядра. Полная энергия, сообщенная газу, составляет более 10^{54} эрг¹.

Несравненно большие масштабы выделения энергии у квазизвездных объектов. С их открытием важность и актуальность изучения природы ядер галактик стала особенно очевидной. Эти чрезвычайно далекие и мощные источники инфракрасных лучей, видимого света, радиоволн и коротковолновой радиации напоминают по всем своим свойствам изолированным активные ядра галактик только с масштабом выделения энергии, в сотни раз большим, чем в последних.

Массы ядер галактик не велики. Это можно установить, наблюдая скорости движений звезд вокруг центра галактики. В туманности Андромеды, например, в пределах 25 св. лет от центра содержится не более тысячной доли массы всей галактики. Никаких новых галактик из таких ядер не создать. Но удивительная способность аккумулировать и выделять чудовищную энергию настойчиво требует своего объяснения.

Что же собой представляют источники колоссальной энергии ядер? Каков механизм ее генерации? Как эволюционируют ядра? Достаточен ли объем наших физических знаний, чтобы понять, что в них происходит? Нет пока такого человека, который мог бы ответить на эти вопросы.

Секрет хранит маленький яркий источник в центре ядра, окруженный обычным газом, — именно там в не-

¹ Эта энергия достаточна для того, чтобы полностью можно было разрушить 1 млн. таких звезд, как наше Солнце, и раскидать их вещество по всей Вселенной!

большом объеме аккумулирована колоссальная энергия, иногда превышающая 10^{59} — 10^{60} эрг. Большинство исследователей сходятся на том, что запасы ядерной энергии вещества недостаточны для объяснения такого энерговыделения в ядрах галактик. Единственный известный источник энергии, который может «работать» в галактических ядрах, — гравитационное сжатие или падение вещества в гравитационном поле. По энергетической эффективности эти процессы могут в десятки раз превзойти любые ядерные реакции.

Было предложено много моделей источника. Согласно одним предположениям это очень компактное звездное скопление, где происходят частые вспышки Сверхновых, или столкновения отдельных звезд, или падение газа на компактные звезды. Согласно другим источник — единое тело, в качестве которого предлагалось и гигантское образование из намагниченной плазмы или очень массивная «черная дыра», захватывающая межзвездный газ.

Но, однако, от построения модели или моделей источника до объяснения всех проявлений активности ядер галактик — дистанция большого размера и она еще далеко не пройдена. Нет даже полной уверенности, что мы на правильном пути. Ясно одно: в ядрах галактик могут существовать необычные, «экзотические» объекты, изучение которых крайне важно не только для объяснения активности ядер, но и для понимания более широкого круга астрофизических проблем. И кто знает, какой толчок развитию физики и астрофизики дадут исследования галактик — систем, в которых отражено настоящее и прошлое Вселенной.

Заключение

В некотором смысле нам удивительно повезло. Из всех несчетных поколений, сменившихся на Земле, наше поколение первое, которому известно, хотя бы в общих чертах, как устроена Вселенная и каковы пространственно-временные масштабы ее наблюдаемой части. Конечно, людям далекого будущего уровень наших знаний об устройстве Вселенной покажется невысоким, наши представления — отрывочными, подчас и ошибочными. Но подобно тому как сейчас для нас не потеряли ценности наблюдения небесных явлений, за-

фиксированные учеными древности, как и не устарели добытые в прошлые века ценой большого труда и мужества истины о месте нашей Земли среди других планет, так и не грозит устареть многому из того, к чему пришли ученые нашего века. Только один раз и навечно можно открыть звездную природу галактик, обнаружить красное смещение (свидетельство нестационарности Вселенной), узнать о разнообразных проявлениях активности ядер галактик, открыть существование таинственных квазизвездных объектов, измерить мощные потоки реликтового излучения... Все это еще совсем недавно было неизвестно людям. Еще в конце прошлого и в начале нынешнего века представление о размерах обозримого участка Вселенной было весьма скромным. Известный немецкий популяризатор астрономии А. Клейн в то время писал: «Исполинский телескоп Гершеля не мог проникнуть в небесное пространство дальше тех звезд, свет которых достигает нашей планеты за 12 000 лет. Можно даже утверждать, что и в будущем никакой телескоп не в состоянии будет проникнуть за эту грань на значительное расстояние. Здесь — предел не для Вселенной, а для нашего зрения, какими бы телескопами мы ни пользовались».

Самые дальние мировые тела входят в состав Млечного Пути. Чем сильнее телескоп, направленный на это таинственное образование, тем больше звезд выступает перед глазами наблюдателя... Здесь берег, с которого глаз напрасно старается разглядеть противоположную границу. С той стороны не светит ни одна звезда, и мы никогда не узнаем, что там находится».

А сейчас? Хотя разглядеть, что находится «по другую сторону» Млечного Пути действительно нельзя (мешает межзвездная пыль), зато в других направлениях, оказалось, видны объекты, в десятки тысяч раз более далекие, чем самые удаленные от нас звезды Млечного Пути.

Но дело не только в расстоянии до границ наблюдаемой части Вселенной. На протяжении нашей жизни человек фактически в первый раз смог во всех подробностях «увидеть» небо, далекие миры, в лучах, к которым не чувствителен глаз. Наблюдения в инфракрасном и ультрафиолетовом свете, радиоастрономия, рентгеновская и гамма-астрономия — все это рождается или родилось на наших глазах. А на очереди — регистра-

ция нейтринного излучения и, может, гравитационных волн... Люди словно взглянули на небо, сняв повязку со своих глаз. Совсем не очевидно, что будущий век, несмотря на стремительное развитие науки и техники, будет богаче нынешнего по фундаментальным открытиям в астрономии, по количеству обнаруженных неизвестных ранее явлений и небесных тел.

Мы ничего не говорили ни о группах или скоплениях галактик, ни о возможности существования сверхгалактик — систем, объединяющих скопления галактик, ни о горячем межгалактическом газе, найденном по рентгеновскому излучению, ни о многом другом, что нельзя охватить в небольшой брошюре.

Вселенная бесконечно сложна, с каждым годом все новые и новые задачи ставит она перед учеными. Внегалактической астрономии не грозит остаться без трудно разрешенных проблем. Работа над их решением необходима для того, чтобы понять тот мир, в котором нам привелось жить, узнать, как он устроен, возник, развивается и какими законами управляется. К этим «вечным» вопросам человек не был и не будет равнодушен ни в какие исторические эпохи.

Литература

(звездочкой отмечена литература повышенной трудности)

- 1 Азимов А. Вселенная. М., «Мир», 1969.
- 2 Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика. М., «Наука», 1970.
- 3 Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. М., «Наука», 1973.
- 4 Уитни Ч. Открытие нашей Галактики. М., «Мир», 1975.
- 5* Воронцов-Вельяминов Б. А. Внегалактическая астрономия. М., «Наука», 1972.
- 6* Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. М., «Наука», 1975.

11 коп.

Индекс 70101