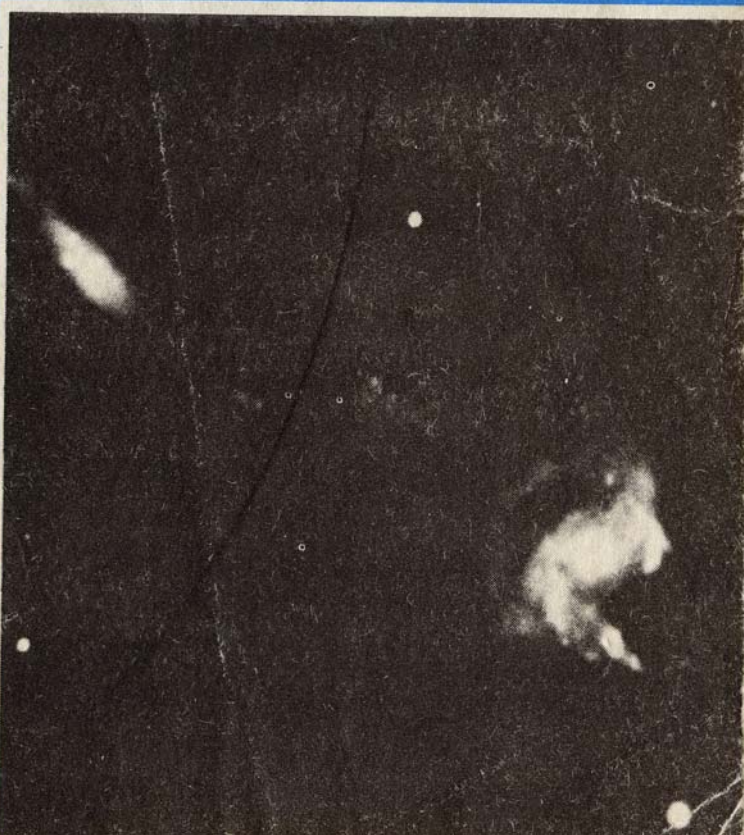


П
Н
Т
П

А.А. СУЧКОВ

ГАЛАКТИКИ ЗНАКОМЫЕ И ЗАГАДОЧНЫЕ



ББК 22.67

С 91

УДК 524.6(023)

Рецензент

доктор физико-математических наук Ю. Н. Ефремов

Сучков А. А.

С 91 Галактики знакомые и загадочные — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988 (Пробл. науки и техн. прогресса). — 192 с. — 70 к.

ISBN 5-02-013871-1

Гигантские звездные системы — галактики — хорошо известны астрономам вот уже более полувека. Но в последние 10—15 лет поразительные открытия новейшей астрономии превратили их в объекты, полные глубоких тайн и загадочных явлений. Есть ли черные дыры в активных ядрах галактик? Что представляет собой «скрытая» масса? Откуда в скоплениях галактик рентгеновский газ с его фантастически высокой температурой и невероятно большой энергией? Как они возникли? Об этом рассказывается в книге.

Для учащихся десятых классов, студентов, преподавателей, лекторов.

С 1705060000—075
053 (02)-88 153-88

ББК 22.67

Сучков Анатолий Александрович

ГАЛАКТИКИ ЗНАКОМЫЕ И ЗАГАДОЧНЫЕ

Серия «Проблемы науки и технического прогресса»

Редактор И. Е. Рахлин.

Художественный редактор Т. Н. Кольченко.

Технический редактор Е. В. Морозова. Корректор Г. И. Сирова.

ИБ № 32275

Сдано в набор 06.08.87. Подписано к печати 10.03.88. Т-09527. Формат 84×108/32. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,4. Уч.-изд. л. 10,89. Тираж 80000 экз. Заказ № 1361. Цена 65 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
113054 Москва, Воровая, 28

Отпечатано во 2-й типографии издательства «Наука»,
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6, Заказ 1493

ISBN 5-02-013871-1

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1988

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Некоторые физические константы и астрономические величины	6
Введение	7
Глава 1. Звезды и межзвездная среда	10
1. Карлики и гиганты, сверхгиганты и сверхновые	10
2. Межзвездная среда: газ, пыль, космические лучи	16
Глава 2. Почему галактики разные?	22
1. Классификация Хаббла: галактики спиральные, эллиптические, irregулярные	23
2. Масса, светимость, компактность, или: почему галактики разные?	31
3. «Ленивые» и «новорожденные» галактики	38
4. Соотношения Фабер — Джексона и Тулли — Фишера	40
Глава 3. Наша Галактика	42
1. Звездные населения и подсистемы	43
2. Дискретность подсистем и активные фазы эволюции	46
3. Звездные волны	54
Глава 4. Химический состав и эволюция галактик	58
1. Эллиптические галактики: зависимость химического состава от массы	60
2. Химический состав и взрывы галактик	62
3. Эллиптические галактики: где старое население с дефицитом металлов?	65
4. Irregулярные галактики: взрывы или «простая» модель?	66
Глава 5. Рентгеновский газ	69
1. Рентгеновский газ в скоплениях галактик	70
2. Происхождение рентгеновского газа: взрывы галактик?	76
3. Рентгеновские короны галактик	81
4. Загадка диффузного фона рентгеновских лучей	84
	3

Глава 6. Скрытая масса	85
1. Горячие короны и плоские «хвосты» кривых вращения	87
2. Одинаковы ли темные гало спиральных и эллиптических галактик?	91
3. Скрытая масса внутри звездных галактик	93
4. Может ли скрытая масса быть обычным веществом?	94
Глава 7. На краю Вселенной, или 10 миллиардов лет до нашей эры	98
1. Пространственно-временная структура Вселенной	98
2. Галактики на краю Вселенной	106
3. Спектры поглощения квазаров, или по пути к окраинам Вселенной	114
Глава 8. Активные ядра, квазары, лацертиды	120
1. Сейфертовские галактики и радиогалактики: две формы активности ядер	120
2. Квазары и лацертиды	127
3. Спектральные «портреты» галактик, квазаров, лацертид	131
4. «Пушинки» вокруг квазаров — галактики?	134
5. Химический состав квазаров	138
6. Релятивистские струи — джеты	141
7. Что скрывают инфракрасные галактики?	149
Глава 9. Главный «двигатель» активных ядер: черная дыра?	151
1. Сфера Шварцшильда, дыра Керра, процесс Пенроуза	152
2. Аккреционные диски	155
3. Как рождаются джеты	159
4. Подсчеты квазаров	162
5. Что происходит в области формирования широких линий?	164
Глава 10. Протогалактики и крупномасштабная структура Вселенной	169
1. Теория «блинов»	170
2. Горячая, теплая и холодная скрытая масса	172
3. Образование структуры во Вселенной со скрытой массой	176
Глава 11. Рождение галактик	180
1. «Горячая» модель и активные фазы эволюции	181
2. Рождение звездной галактики	187
3. Размеры галактик, и еще раз о скрытой массе	189

Писать в наши дни о галактиках — и просто и сложно одновременно. Просто — потому, что современная эра астрономии и астрофизики — это эра галактик, и буквально каждый год приносит массу поразительных открытий, массу неожиданностей, нередко кардинально меняющих наши представления о том, как устроен мир. А сложно потому, что новые факты, которые сегодня ставят нас в тупик и представляются крайне загадочными, под напором того же потока открытий завтра будут выглядеть вполне понятными, объяснимыми и даже очевидными. При этом, несомненно, уже завтра появятся другие факты, еще более интригующие и увлекательные, а с ними — новые темы для разговора о галактиках и Вселенной в целом.

Для автора этой книги есть еще одна проблема. Ему, наверное, не удалось сохранить беспристрастность ни в выборе тем, ни в отношении к ним. Это можно объяснить: он сам занимается многими вопросами, затронутыми в книге. Но читатель, возможно, скажет, что суждения о каких-то объектах или процессах излишне категоричны, что надо было бы подождать, пока у всех не будет полной уверенности в интерпретации того или иного явления. И, вероятно, в чем-то он будет прав. Тем не менее надо иметь в виду еще следующее. Действительно, для автора скрытая масса, черные дыры, горячие протогалактики, активные фазы эволюции — это почти стопроцентная реальность. Но это не голые умозрительные построения, догадки, привлеченные для объяснения двух-трех явлений. За ними огромное количество наблюдательных данных, вполне конкретных фактов, которые в своей совокупности практически однозначно приводят к этим экзотическим понятиям. Конечно, то, что удалось вместить в небольшой объем книги, — лишь верхушка гигантского «айсберга» конкретных результатов современной астрономии и астрофизики. А не видя всего «айсберга», несомненно, трудно проникнуться такой же, как у автора, убежденностью в том, что темное,

невидимое вещество или грандиозные взрывы галактик 10 миллиардов лет назад — вещи в достаточной степени доказанные.

Автор благодарен Ю. Н. Ефремову, прочитавшему рукопись книги и сделавшему много ценных замечаний, а также П. Д. Насельскому, сделавшему ряд важных замечаний по главе 10.

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

(в системе CGS)

$c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света

$k = 1,4 \cdot 10^{-16}$ эрг/К — постоянная Больцмана

$G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ дин·см²/г² — гравитационная постоянная

$m_H = 1,7 \cdot 10^{-24}$ г — масса атома водорода

$c_2 = 7,57 \cdot 10^{-15}$ эрг/(см³·К⁻⁴) — постоянная излучения

$L_\odot = 4 \cdot 10^{33}$ эрг/с — светимость Солнца

$M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца

1 парсек (пк) = $3 \cdot 10^{18}$ см = 3,26 светового года

1 Мпк = 10^3 кпк = 10^6 пк

$H_0 = (50 - 100)$ км/(с·Мпк) — постоянная Хаббла

1 кэВ = 10^3 эВ = $1,6 \cdot 10^{-9}$ эрг соответствует температуре $1,16 \cdot 10^7$ К

Связь между абсолютной звездной величиной M_V и светимостью L_V

$\lg (L_V/L_\odot) = -0,4 (M_V - 4,83^m)$

ВВЕДЕНИЕ

В начале 20-х годов нашего столетия в обсерватории Маунт Вилсон (США) вступил в строй крупнейший по тем временам телескоп с диаметром зеркала 2,5 м. И уже первые наблюдения принесли открытие фундаментального значения. В 1924 г. Эдвин Хаббл по фотографиям, полученным на этом телескопе, установил, что хорошо известная астрономам туманность Андромеды, которая еще в прошлом веке была занесена в каталог туманностей Мессье под номером М 31, на самом деле образована невероятно большим числом звезд, сливающихся из-за огромной удаленности в сплошное туманное пятнышко. Точно так же большинство других известных туманностей оказались чрезвычайно удаленными гигантскими системами, состоящими из миллионов и миллиардов звезд.

До открытия Хаббла *) единственной звездной системой, известной астрономам, был Млечный Путь — Галактика, в которой среди сотен миллиардов звезд находится и наше Солнце со своими планетами; это наш «звездный дом» во Вселенной.

Хаббл «заполнил» Вселенную бесчисленным множеством других звездных систем — галактик с маленькой буквы. Довольно быстро выяснилось, что галактики являются главными структурными элементами Вселенной, и стали говорить, что Вселенная «сделана» из галактик.

*) Открытие мира галактик оказалось не единственным фундаментальным вкладом Э. Хаббла (1889—1953) в современную картину мира. Он обнаружил также явление разбегания галактик, которое легло в основу теории расширяющейся Вселенной. Сейчас одно из основных астрономических понятий — хаббловский тип галактик; расширение Вселенной называют хаббловским; постоянной Хаббла названа одна из мировых констант, характеризующих Вселенную; имя Хаббла носит двухметровый телескоп космической обсерватории, который будет работать на орбите вокруг Земли. Так научный мир увековечил имя выдающегося астронома, открытия которого стали фундаментом современных представлений о Вселенной.

В течение длительного времени, по существу вплоть до 60-х годов, галактики представлялись сравнительно простыми системами; ничего особенно загадочного, никаких особых тайн в них не виделось. Чуть ли не главной наукой о галактиках была звездная динамика, которая изучает движение звезд в звездных системах, а наиболее волнующие проблемы были связаны с вопросом о происхождении распределения звезд по скоростям (оно почему-то похоже на распределение скоростей молекул в газе) и с вопросом о природе спиральной структуры галактик.

Конечно, было известно, что помимо звезд в галактиках есть межзвездный газ, межзвездные магнитные поля, космические лучи. Но они «не делали погоды» в физике галактик и были фактически совершенно отдельными разделами астрофизики и наблюдательной астрономии.

Все радикально изменилось в последние 15—20 лет. Поразительные открытия новейшей астрономии превратили простые и хорошо знакомые нам звездные системы в объекты, полные глубоких тайн и загадочных явлений, указывающих на существование новых, еще неизвестных форм материи, на неизвестные нам физические процессы. Возникли новые, несравненно более фундаментальные проблемы и вопросы, причем решающие для всего нашего миропонимания. Некоторые из них рассматриваются в этой книге.

Что такое активные ядра галактик и квазары? Что представляет собой скрытая масса? Откуда взялся в скоплениях галактик рентгеновский газ с его невероятно большой массой, фантастически высокой температурой и нормальным химическим составом? Откуда галактики «знают», какой у них должен быть химический состав? Как, в конце концов, возникли галактики и почему они именно такие, какими мы их видим? Эти вопросы стали по сути центральными во всей современной астрофизике и наблюдательной астрономии.

Окончательных ответов на них еще нет. Но уже сейчас огромное количество наблюдательных фактов, принесенное исследованиями галактик, оставляет мало сомнений в том, что удивительные явления в ядрах активных галактик и в квазарах — самое мощное во Вселенной энерговыделение, релятивистские струи (джеты) длиной в миллионы световых лет, рождение и аннигиляция антивещества — связаны с все еще таинственными черными дырами. Данные наблюдений указывают на то, что скрытая масса спиральных и эллиптических галактик не может быть обычной формой материи, и потому гипотетические элементарные час-

тицы — аксионы, фотино, гравитино — имеют большие шансы перейти в разряд реально существующих, обеспечивая необходимую скрытую массу, а также возможность создания самих галактик в первоначально однородной Вселенной. Становится все яснее, что рентгеновский газ в скоплениях галактик и химический состав галактик говорят о поражающих воображение явлениях на заре рождения звездной Вселенной — о взрывах галактик, при которых раскаленный до десятков миллионов кельвинов газ с массой, равной массе сотен миллиардов звезд, с огромной скоростью извергался в межгалактическое пространство!

Новейшая астрономия — оптическая и радиоастрономия на Земле, рентгеновская, ультрафиолетовая, инфракрасная и гамма-астрономия в космосе — открыла нам в последние годы фантастически бурную и во многом непонятную жизнь галактик. Уже в 80-е годы мы впервые увидели рождающиеся галактики на краю звездной Вселенной, впервые достигли этого края и остановились на границе, за которой нам пока не видно, что там дальше, где нет еще ни звезд, ни галактик; впервые столкнулись с инфракрасными галактиками, в которых инфракрасное излучение в десятки и сотни раз превышает энергию излучения сотен миллиардов звезд; впервые увидели, что звездные галактики «одеты» в «шубы» сверхгорячего вещества с температурой в многие миллионы кельвинов.

Обо всем этом и рассказывается в нашей книге.

Глава I

ЗВЕЗДЫ И МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

Галактики — это, в первую очередь, звездные системы. Поэтому, чтобы их понять, надо начинать со звезд.

Но чтобы понять, откуда взялись галактики, как они возникли и почему они именно такие, какие есть, нужно разобраться в свойствах разреженного газа. Ведь дозвездная Вселенная состояла из газа, из газа и сейчас рождаются звезды, газ и сейчас определяет важнейшие особенности разных типов звездных систем. Поэтому вслед за звездами необходимо обратиться к межзвездной среде, где мы наблюдаем разреженное вещество в самых разных формах.

1. Карлики и гиганты, сверхгиганты и сверхновые

Изучение звезд началось намного раньше, чем исследование галактик, и сегодня мы знаем о них почти все самое существенное, хотя нерешенных проблем и загадок здесь еще предостаточно.

Основные наблюдаемые характеристики звезд — спектр, цвет, светимость — зависят от массы, возраста и химического состава, причем главную роль не только в структуре, но и во всей судьбе звезды играет масса. Эти зависимости практически полностью объясняют все многообразие мира звезд и позволяют уложить его в довольно простую схему. Такая схема идеально представляется *диаграммой Герцшпрунга — Рассела* (рис. 1, 2).

Диаграмма Герцшпрунга — Рассела отражает связь между абсолютной звездной величиной и спектральным классом или между другими величинами, которые сводятся к этим двум. Часто вместо звездной величины используют светимость, а вместо спектрального класса — температуру, показатель цвета, массу.

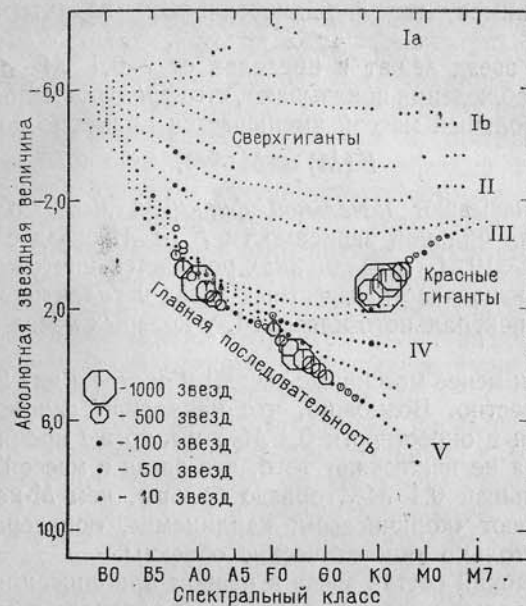


Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела для звезд, включенных в Мичиганский спектральный каталог

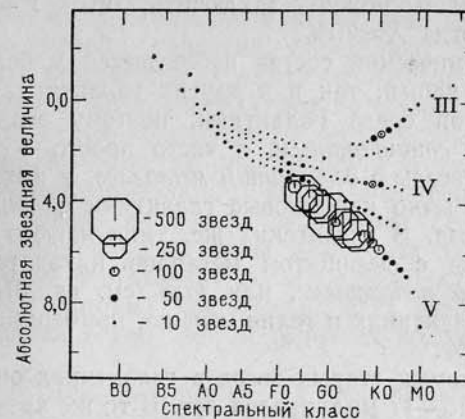


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но взяты звезды только в пределах 100 пк от Солнца

Остановимся на фундаментальных характеристиках звезд.

Массы звезд лежат в пределах от $\sim 0,1 M_{\odot}$ до $50-100 M_{\odot}$. Наблюдения показывают, что вероятность появления звезды с большей массой уменьшается примерно по закону

$$F(M) \propto M^{-2,35},$$

который называют *начальной функцией масс* Солпитера. Из-за столь сильной зависимости F от M звезд с массой, скажем, $M \geq 10 M_{\odot}$ в галактиках рождается ничтожно мало, и подавляющая часть известных звезд в галактиках — это карлики спектрального класса M , у которых масса порядка $0,1 M_{\odot}$.

Есть ли менее массивные звезды и сколько их? Это пока плохо известно. Возможно, что начальная функция масс обрывается в окрестности $0,1 M_{\odot}$, и в то же время наблюдения пока не исключают того, что звезд с массой существенно меньшей $0,1 M_{\odot}$ гораздо больше, чем M -карликов. Их называют «коричневыми карликами», «юпитерами», но пока это только гипотетические объекты.

Химический состав звезд в первом приближении характеризуют тремя числами: доля массы водорода в звезде X , доля массы гелия Y и доля всех остальных элементов (их называют для краткости тяжелыми элементами или условно «металлами») Z . Очевидно, $X+Y+Z=1$. У нашего Солнца $Z=Z_{\odot} \approx 2\%$ (точнее, $Z_{\odot} \approx 1,5-1,6\%$). Сколько гелия — неизвестно (в спектре фотосферы нет линий гелия, по данным о которых можно определить его содержание), но по другим звездам можно заключить, что $Y=Y_{\odot} \approx 28\%$ ($\sim \pm 3\%$); тогда $X \approx 70\%$.

Такой химический состав наблюдается у большинства звезд как в нашей, так и в других галактиках, а также в межзвездной среде Галактики, поэтому его называют *нормальным, стандартным*, а часто просто — *солнечным*.

Но есть звезды с *дефицитом металлов*, у них $Z \approx (0,1-0,01)Z_{\odot}$. Обычно карликовые галактики сплошь состоят из таких звезд. В гигантских же, типа нашего Млечного Пути, звезды с дефицитом металлов находятся только в *сферической подсистеме*, или *гало* (см. гл. 3). В таких звездах и галактиках и гелия меньше, примерно в полтора раза: $Y \approx 20\%$.

Возраст самых старых звезд в галактиках оценивается примерно в 15—17 миллиардов лет. В то же время во многих звездных системах процесс звездообразования продолжается и в наши дни, на наших глазах появляются только

что родившиеся звезды (сейчас инфракрасная астрономия позволила увидеть даже «эмбриональную» стадию звезд).

Как и почему масса, возраст и химический состав связаны с многообразием звезд? И что вообще представляет собой это многообразие? Обратимся к диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Большая часть звезд в галактиках укладывается на ней в узкую полосу, которая называется *главной последовательностью*. Для этих звезд, таким образом, существует почти однозначное соответствие между светимостью L (или абсолютной звездной величиной M_V) и массой M (или температурой T , спектральным классом Sp , показателем цвета, например, $B-V$; величина $B-V$ представляет собой разность звездных величин в голубом участке спектра B и желто-зеленом V).

Звезды в верхней части главной последовательности называют звездами ранних спектральных классов — это классы O, B, A . Ниже идут звезды поздних спектральных классов F, G, K, M ; их называют *карликами*.

Чем к более позднему классу относится звезда, тем меньше температура ее поверхности, тем она краснее. Последнее соответствует большему показателю цвета $B-V$; рост $B-V$ отражает тот факт, что с уменьшением температуры падает доля энергии, излучаемая в более коротковолновом, голубом участке спектра. Соответствие разных параметров звезд видно из таблицы 1.

От звезд главной последовательности резко отличаются красные гиганты, гиганты горизонтальной ветви и сверхгиганты. Их относительная численность в галактиках невелика, но из-за огромной яркости они дают основной вклад в светимость галактик, определяют их цвет.

Главным итогом многих десятилетий исследования звезд стала теория их внутреннего строения и эволюции, которая была завершена во всех основных деталях, пожалуй, в 50—60-е годы. По существу она является фундаментом всей современной астрофизики. А самым впечатляющим ее результатом стало объяснение диаграммы Герцшпрунга — Рессела, объяснение природы различных типов звезд.

Оказалось, что главная последовательность образована звездами, в которых светимость, т. е. энерговыделение, обеспечивается термоядерным горением водорода в центре звезды.

По мере выгорания водорода и превращения его в гелий у звезд постепенно растет и температура и светимость. Эта фаза (время жизни на главной последовательности) длится от сотен тысяч лет у самых ранних, массивных звезд (звезды

Таблица 1

Параметры звезд главной последовательности с нормальным химическим составом

M/M_{\odot}	τ (10^8 лет)	$\lg(L/L_{\odot})$	M_V	$\lg T$	$B-V$	Sp
0,25	—	—2,0	12,0	3,52	1,60	M5
0,4	—	—1,4	10,0	3,57	1,48	M1
0,8	25	—0,4	6,0	3,70	0,88	K1
1,0	10	0,0	4,9	3,76	0,64	G2
1,4	2,5	0,7	3,0	3,86	0,36	F2
2	0,75	1,3	1,4	3,98	0,00	A0
20	0,008	4,7	—4,3	4,48	—0,30	B0
60	0,003	5,7	—6,2	4,58	—0,32	O5

Пояснения к таблице 1: 1) τ — время жизни звезды на главной последовательности; 2) M_V — абсолютная звездная величина; 3) в середине выделена строчка, относящаяся к звездам с параметрами, как у Солнца.

классов O, B) до десятка миллиардов лет у звезд с массой Солнца (см. таблицу 1). Но на какой-то стадии рост светимости резко увеличивается, а температура начинает падать — звезда уходит с главной последовательности и превращается в красного гиганта. В это время в ней происходит внутренняя перестройка — термоядерные реакции из центра перемещаются в слой вокруг ядра, которое теперь состоит уже исключительно из гелия; центральные области в звезде сжимаются, а внешние — сильно расширяются, и звезда «распухает».

В стадии красного гиганта звезда живет примерно 200 миллионов лет. В конце концов в ней «загорается» гелиевое ядро — начинаются термоядерные реакции превращения гелия в углерод и кислород. Теперь в звезде уже две области энерговыделения — в центре горит гелий, а в слое вокруг ядра — водород. Структура звезды опять резко меняется, она покидает область красных гигантов и становится гигантом так называемой горизонтальной ветви. Это более горячие, более голубые гиганты.

Когда в центре сгорает гелий и образуется углеродно-кислородное ядро, термоядерные реакции идут в двух слоях — в одном горит гелий, в другом водород. Здесь звезда опять попадает в область красных гигантов. В конце

концов, если ее масса не больше, чем $\sim 1,4 M_{\odot}$, она сбрасывает внешнюю оболочку (это стадия планетарной туманности), а центральный остаток мы наблюдаем затем как белый карлик.

До сих пор речь шла о звездах, масса которых не очень значительно превышает массу Солнца. Если же масса в несколько раз больше солнечной, то звезда на диаграмме Герцшпрунга — Рассела очень быстро уходит с главной последовательности в область сверхгигантов. Это самые яркие звезды в галактиках, их светимость иногда более чем в сто тысяч раз превышает светимость Солнца.

Дальнейшая судьба сверхгигантов зависит от того, насколько быстро они сбрасывают массу (в виде звездного ветра). Но если их начальная масса превышает примерно $5M_{\odot}$, то, вероятно, все они заканчивают свою жизнь взрывом, который мы наблюдаем как вспышку *сверхновой*. Энергия взрыва сверхновой достигает 10^{50} — 10^{52} эрг, а светимость — порядка $10^{10}L_{\odot}$! После взрыва остается ядро из нейтронного вещества — нейтронная звезда. Масса такой звезды превышает критический предел для белых карликов, $M=1,4M_{\odot}$, а радиус составляет около 10 км; они были обнаружены в 1968 г. в виде объектов, названных *пульсарами*. В Галактике сейчас их известно несколько сотен.

Но если масса ядра превышает второй критический предел — $2M_{\odot}$, то оно становится *черной дырой* (см. гл. 9). Возможно, такие черные дыры мы наблюдаем в виде компонент некоторых двойных звезд; эти компоненты невидимы в оптическом диапазоне, но сильно излучают в рентгеновском диапазоне. В нашей Галактике несколько рентгеновских источников являются весьма обещающими кандидатами в черные дыры.

Основную часть своей жизни звезда проводит на главной последовательности. Время жизни на главной последовательности быстро уменьшается с увеличением массы. И если для звезд типа Солнца, т. е. с $M \approx 1M_{\odot}$, это время порядка десятка миллиардов лет (кстати, возраст Солнца примерно $5 \cdot 10^8$ лет), то у звезд с массой всего лишь в десять раз большей оно уже в тысячи раз меньше. Для звезд классов O и B, масса которых $M \geq 10M_{\odot}$, оно составляет миллионы лет. Поэтому яркие голубые звезды галактик — это всегда молодые, массивные звезды; старые же с такой массой давно проэволюционировали и стали белыми карликами, нейтронными звездами (и, возможно, черными дырами), а звезды с массой $M \leq 1M_{\odot}$ до сих пор являются нормальными карликами.

И когда мы видим голубую галактику, то сразу можем сказать, что в ней активно идет звездообразование, в ней много молодых звезд классов О, В, А — они-то и определяют цвет. В то же время красные системы — это галактики, в которых звезды давно уже не образуются и цвет их обусловлен старыми звездами (в основном — красными гигантами спектральных классов G, K, M).

Ни с чем не сравнима в истории формирования галактик, в эволюции вещества во Вселенной в целом роль сверхновых. Их образуется вряд ли больше десятка на каждую тысячу рождающихся звезд, но именно они «создали» почти всю таблицу Менделеева — и в этом их главная роль для нас. Сейчас не вызывает сомнений, что догалактическая, дозвездная Вселенная состояла исключительно из водорода и гелия — кроме первых двух клеток, таблица Менделеева была пуста. Углерод, кислород, железо и все остальное, из чего образована Земля, планеты, 2% массы Солнца, — все это рождено взрывами сверхновых. Таким образом, мы с Вами, дорогой читатель, также сделаны из вещества, которое более пяти миллиардов лет назад было кусочком недр взрывающейся сверхновой, где при температуре в миллиарды кельвинов за считанные минуты и секунды образовалось не только железо, но и золото, уран и даже, вероятно, множество трансурановых элементов, не доживших до наших дней. К сверхновым, их роли в судьбе галактик и звезд мы еще не раз будем возвращаться в этой книге.

2. Межзвездная среда: газ, пыль, космические лучи

«Космическая пустота» в пространстве между звездами в галактиках оказалась отнюдь не пустой. Уже в 30-е годы было хорошо известно, что там много пыли. Это было заметно по покраснению и ослаблению (поглощению) света звезд. В нашей Галактике уже давно известен ряд пылевых облаков, которые находятся сравнительно недалеко от Солнца. Они полностью поглощают свет лежащих за ними звезд, поэтому представляются нам черными «кляксами» на фоне звездного неба.

Обычно пыль расположена в плоскости симметрии галактик (рис. 3). Поскольку Солнце находится в нашей Галактике в плоскости симметрии в ее диске и далеко от центра, то слой пыли в диске полностью скрывает от нас центральную, наиболее загадочную область Галактики — правда, только в оптическом диапазоне. Для инфракрас-

ного и радиоизлучения пыль прозрачна, и это позволяет нам все же заглянуть в сильно «запыленные» места звездной системы.

Покраснение звезд связано с тем, что пыль рассеивает и поглощает разные кванты по-разному: сильнее поглощается коротковолновое (голубое и ультрафиолетовое) излучение, а длинноволновое (красное) — слабее; почти нет поглощения в инфракрасном диапазоне.

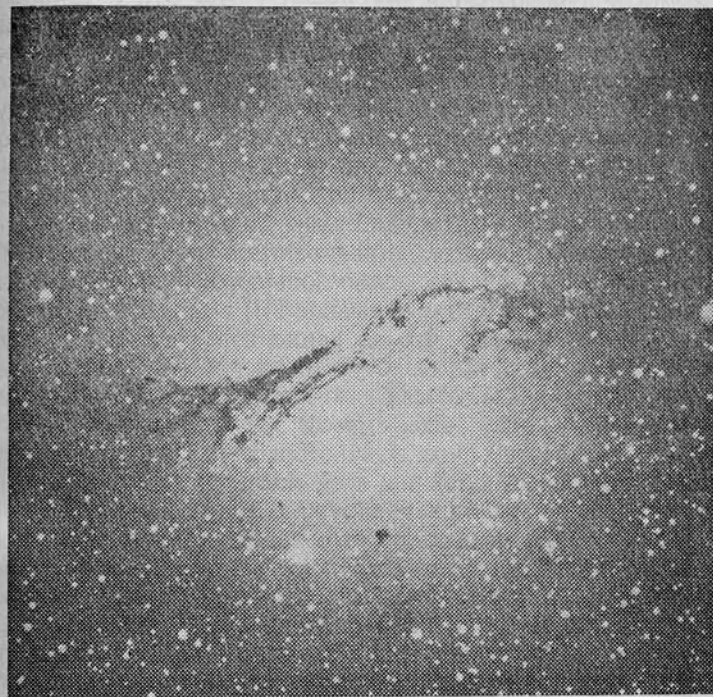


Рис. 3. Галактика NGC 5128 (Центавр А) с мощным слоем пыли (темные полосы на фоне яркой звездной компоненты). Она является также мощным источником радиоизлучения и рентгеновского излучения

На фотографиях галактик пыль часто видна в виде черных узких полос, окаймляющих спиральные ветви, — это область фронта галактической ударной волны, где межзвездный газ вместе с пылью подвергается сильному сжатию в спиральной волне плотности (см. гл. 3). Пыль вызывает общее покраснение галактик. Обычно ее много там, где

много молодых голубых звезд, и этот эффект покраснения иногда ощутимо конкурирует с эффектом «поголубения», обусловленным активным звездообразованием.

Но основной компонентой межзвездной среды оказался газ — межзвездный водород. В начале 40-х годов голландец ван ден Хюлст показал, что в атоме водорода, самом распространенном элементе во Вселенной, возможен квантовый переход из состояния, когда спин электрона и спин протона параллельны, в состояние, когда они антипараллельны; при этом в радиодиапазоне излучается квант электромагнитного поля с длиной волны 21 см. Через несколько лет выдающийся советский астрофизик И. С. Шкловский сделал расчет этого перехода и пришел к выводу, что можно обнаружить космическое радиоизлучение от межзвездного водорода на длине волны 21 см. Это были годы рождения радиоастрономии, и предсказание И. С. Шкловского незамедлительно подтвердилось.

Уже в начале 50-х годов радиоастрономические исследования привели к обнаружению большого количества нейтрального водорода (его обозначают HI) в нашей Галактике, причем было найдено, что он концентрируется в спиральные ветви (кстати, так было установлено, что наша Галактика — спиральная). Масса газа оказалась всего лишь раз в двадцать меньше общей массы звезд.

Сейчас известно, что в некоторых галактиках на газ приходится более половины всей массы системы, в других его вообще не удается обнаружить.

Исследование межзвездного водорода стало важнейшим разделом наблюдательной астрономии, и не только на длине волны 21 см. На волне 2,6 мм излучает молекула окиси углерода CO. В галактиках она связана с молекулярным водородом H_2 , и наблюдения в линии 2,6 мм привели к открытию огромной массы облаков H_2 . Были открыты, помимо CO (и H_2), и другие молекулы в межзвездном пространстве, каждая по своим линиям радиоизлучения, по своему «радиоголосу». В их числе — более десятка сложных органических молекул.

Исключительно интересным и важным для понимания галактик оказалось физическое состояние межзвездного газа. Значительная часть газа заключена в *облаках нейтрального водорода HI* и в *молекулярных облаках H_2* .

Облака H_2 — самые холодные области в Галактике. Их температура всего лишь чуть выше абсолютного нуля, $T \approx 10$ К; они весьма плотные (сотни частиц в кубическом сантиметре), а масса гигантских облаков достигает значе-

ний $M \approx 10^4 - 10^5 M_\odot$. Это — идеальное место для рождения звезд. И действительно, молекулярные облака часто связаны с областями звездообразования.

Атомарный водород образует облака HI с температурой $T \approx 100$ К и плотностью $n \approx 10$ см $^{-3}$; их размеры — порядка десятков парсек. Между облаками находится разреженный ($n \approx 10^{-1}$ см $^{-3}$) горячий ($T \approx 10^4$ К) газ, препятствующий разлету облаков под действием внутреннего давления; давление в облаках и в межоблачном газе одинаково.

Столь сложная структура межзвездной среды связана с ее необычными тепловыми свойствами, с особенностями процессов нагрева и охлаждения. В дисках галактик она нагревается релятивистскими электронами космических лучей, которые рождаются в остатках сверхновых звезд. Когда такая частица сталкивается с атомом водорода, она выбивает из него электрон, сообщая ему большую энергию. Электрон сталкивается с другими атомами, передавая уже им энергию, в результате кинетическая энергия атомов растет, т. е. газ греется. Скорость этого процесса пропорциональна, очевидно, интенсивности космических лучей и плотности газа.

Охлаждение же происходит за счет лучеиспускания. Свободные «тепловые» электроны, сталкиваясь с атомами, могут переводить их в возбужденное состояние, отдавая часть своей энергии. При переходе в основное состояние атом освобождается от энергии возбуждения путем излучения кванта. Такой квант свободно уходит из межзвездной среды, поскольку из-за большой разреженности она прозрачна для излучения. В итоге кинетическая (тепловая) энергия частицы (электрона) превращается в квант света и покидает систему — тепловая энергия уменьшается. Скорость этого процесса пропорциональна уже не первой степени плотности, как в случае нагрева космическими лучами, а квадрату плотности, поскольку возбуждение атома требует столкновения двух частиц газа. При увеличении плотности скорость потерь энергии, таким образом, быстро возрастает. Коэффициент пропорциональности $\Lambda(T)$, называемый эффективностью охлаждения, определяется средней вероятностью возбуждения атома при столкновениях.

Эффективность охлаждения сложным образом зависит от температуры T , и именно это обстоятельство существенно для понимания структуры межзвездной среды и даже более фундаментальных проблем, таких как формирование галактик и звездообразование. Поэтому небезынтересно разобраться с функцией $\Lambda(T)$ (рис. 4).

При температурах ниже 10^4 К электроны не в состоянии возбуждать атомы водорода; для этого требуется энергия E не менее 10 эВ (энергия первого возбужденного состояния; она соответствует энергии кванта Лайман-альфа). Электронов с такой энергией при $T < 10^4$ К почти нет. Поэтому охлаждение идет через возбуждение атомов углерода, кислорода, железа, молекулы H_2 , у которых есть уровни с меньшей энергией возбуждения. При $T \geq 10^4$ К появляется

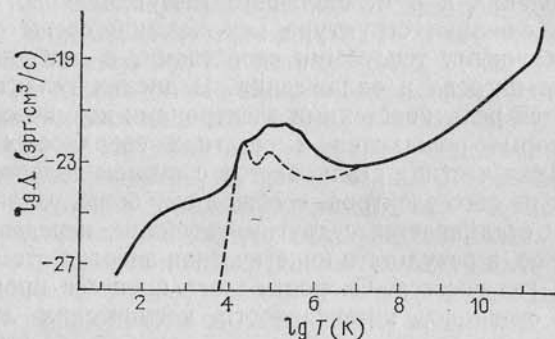


Рис. 4. Эффективность охлаждения (функция охлаждения) разреженной межзвездной среды с нормальным химическим составом; штриховая линия соответствует среде с первичным (космологическим) химическим составом (водород + гелий)

достаточно много электронов с энергией $E \geq 10$ эВ — «включается» охлаждение на атомах водорода с излучением квантов Лайман-альфа. Поскольку водорода в десятки раз больше, чем других элементов, эффективность охлаждения в области $T \approx 10^4$ К резко возрастает. В результате температура $T \approx 10^4$ К оказывается выделенной: до $T \approx 10^4$ К газ очень легко нагреть, так как он слабо охлаждается, а выше этого значения — чрезвычайно трудно.

Это объясняет, во-первых, почему с температурой $T \approx 10^4$ К астрономы так часто сталкиваются в самых разных ситуациях: в межоблачной среде Галактики, в ионизованных газовых оболочках вокруг О и В-звезд (зоны НII), в ядрах активных галактик, квазарах и т. д.

Во-вторых, столь специфическая зависимость $\Lambda(T)$ приводит к тому, что в области температур от $T \approx 10^2$ К до $T \approx 10^4$ К газ не может долго существовать, даже если скорости нагрева и охлаждения равны. Оказывается, что здесь с увеличением плотности n давление P не увеличивается, как в обычном газе, а падает (рис. 5). Нетрудно

сообразить, что система с такой зависимостью P от n неустойчива, и это хорошо известно в термодинамике газа. В результате межзвездный газ устойчив только при $T \lesssim 10^2$ К и при $T \geq 10^4$ К.

Так находит объяснение облачная, а точнее — двухфазная структура межзвездного газа: облака с $T \lesssim 10^2$ К и межоблачный газ с $T \geq 10^4$ К. Чтобы фазы находились в равновесии, должны быть одинаковы давления, $P = nkT$, т. е. $n_1 T_1 = n_2 T_2$. Поэтому плотность в межоблачной среде примерно в сто раз меньше, чем в облаках.

Если газ попадает в промежуточную область температур, то развивается тепловая неустойчивость, которая приводит к появлению холодных, плотных облаков. Полагают, что эта неустойчивость играет решающую роль в формировании галактик и в звездообразовании.

В особых условиях находится газ вокруг звезд с мощным ультрафиолетовым излучением — звезд О и В. Здесь он греется и сильно ионизируется этим излучением — возникают зоны ионизованного водорода — зоны НII (рис. 6). Они ярко светят в эмиссионных линиях атома водорода H_α , H_β и т. д., в линиях других элементов. Имея огромные по сравнению со звездами размеры, зоны НII хорошо видны даже в далеких галактиках.

Динамика газа в дисках галактик тесно связана с межзвездными магнитными полями. Газ является электропроводным (из-за наличия свободных электронов), поэтому магнитное поле «вморожено» в газ. В результате газ может двигаться только вместе с силовыми линиями поля. При этом «упругость» линий препятствует движениям газа.

Очень важно следующее. Из-за «вмороженности» поле сильнее обычно там, где больше плотность газа. В свою очередь в поле «вморожены» космические лучи — релятивистские электроны и протоны (известно, что заряд не может покинуть силовую линию; если его не столкнуть, то он вращается вокруг нее под действием силы Лоренца). Движение релятивистских электронов по криволинейным тра-

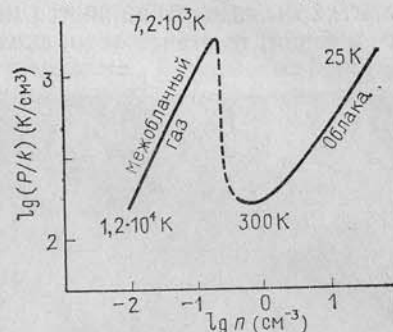


Рис. 5. Связь между давлением и плотностью в равновесной межзвездной среде (кривая равновесия). Пунктирная часть кривой соответствует неустойчивому равновесию

екториям в магнитных полях обязательно сопровождается излучением электромагнитных волн. Это излучение называют *синхротронным*. Если теперь учесть, что многие галактики и квазары являются мощными источниками такого излучения, то станет ясно, сколь много информации о газе,



Рис. 6. Галактика NGC 7793. Яркие узлы в спиральных ветвях — гигантские области ионизованного водорода (зоны H II)

о магнитных полях и о частицах сверхвысоких энергий мы можем получить из наблюдений «синхротрона», зная, что эти три компоненты межзвездной среды столь тесно связаны друг с другом.

Глава 2

ПОЧЕМУ ГАЛАКТИКИ РАЗНЫЕ?

Как уже упоминалось во введении, в 1924 г. Эдвин Хаббл установил, что спиральная туманность Андромеды, так же как и Млечный Путь, состоит из отдельных звезд. Он обнаружил среди них 12 переменных звезд — цефеид, по которым определил расстояние до этой туманности — 900 000 световых лет (позже расстояние было уточнено;

оно равно примерно $2,5 \cdot 10^6$ световых лет). Так было установлено, что туманность Андромеды находится невероятно далеко за пределами Млечного Пути и представляет собой гигантскую звездную систему (даже более массивную, чем наша Галактика). При этом стало ясно, что и другие спиральные и эллиптические туманности, которые астрономы наблюдали до этого, являются не газовыми туманностями внутри нашей Галактики, как это считалось ранее, а звездными системами, подобными Млечному Пути (газовые туманности оказалось нетрудно отделить от звездных систем). Астрономам, которые до этого изучали только звезды и планеты, открылся новый, несравненно более грандиозный мир — мир галактик.

1. Классификация Хаббла: галактики спиральные, эллиптические, irregулярные

В 1925 г. Хаббл предложил первую классификацию галактик. С тех пор, вплоть до наших дней, рассматривалось много разных способов разложить галактики по «полочкам», разделить их по тому или иному признаку. Все

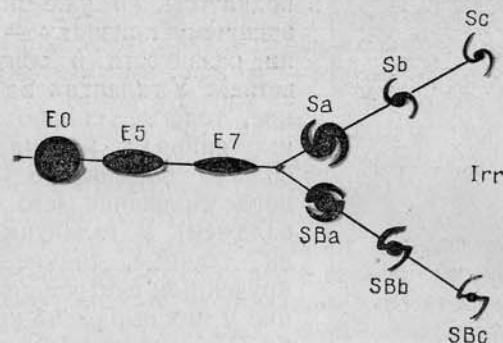


Рис. 7. Схема классификации галактик по Хабблу

они имеют определенный смысл, и в той или иной степени используются астрономами. Но классификация Хаббла не только не потеряла своего значения, но с течением времени становилась все более весомей, фундаментальней, что ли. Сейчас галактики различают в первую очередь по хаббловским типам, и чем дальше, тем яснее, что признаки, которые Хаббл положил в основу своей классификации, определяются самыми глубинными свойствами и самыми важными аспектами формирования и эволюции галактик. Даже

такие, казалось бы, «модерные» типы галактик, как сейфертовские, радиогалактики и, в конце концов, квазары и лацетиды (см. гл. 8), оказались связанными в конечном итоге с классификацией Хаббла.

Хаббл разделил галактики по чисто внешнему признаку, по их внешнему виду, на три больших класса: эллиптические, спиральные, иррегулярные. Эллиптические галактики представляют собой, на первый взгляд, бесструктурные системы эллипсоидальной формы. По степени сплюснутости они делятся на подклассы; самые круглые обозначаются E0, самые уплощенные — E7 (рис. 7).

Характерной чертой спиральных галактик, как следует из названия, являются спиральные ветви, простирающиеся от центра по всему звездному диску. Эти галактики также делятся на подклассы, но уже по другому внешнему признаку — по степени развитости и общему виду ветвей. У галактик Sa — короткие, толстые, сильно закрученные спирали, начинающиеся в области массивного центрального утолщения (его называют балджем). У галактик Sc — ветви длинные, тонкие, слабо закрученные; центральное утолщение у них выражено крайне слабо. Промежуточный тип — спирали Sb (рис. 8).

Кроме того, отдельно выделен тип галактик, промежуточный между спиралями и эллиптическими системами, — галактики S0. У них чрезвычайно толстый диск, мощный балдж и не видно спиральных ветвей.

Кстати, обозначив этот тип галактик буквой S, несмотря на отсутствие спиралей (S — Spiral, E — Elliptical), Хаббл тем самым подчеркнул, что главным в различии спиральных и эллиптических систем является звездный диск. Сегодня многое убеждает, что в этом действительно есть глубокий

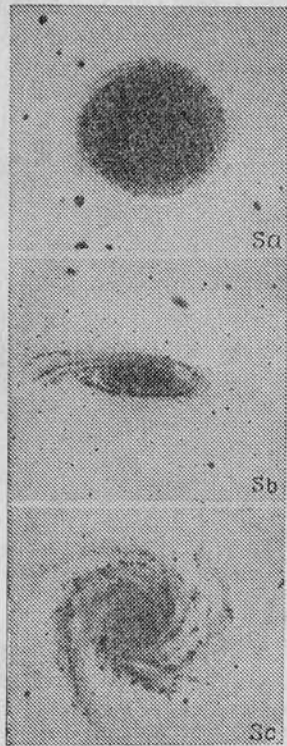


Рис. 8. Спиральные галактики разных хаббловских типов: Sa, Sb, Sc

смысл. Часто S-галактики коротко называют дисковыми, а отдельно Sa, Sb, Sc-галактики — просто спиралями.

Особая разновидность спиральных галактик имеет еще одну структурную деталь — центральную перемычку, или бар, который обычно переходит собственно в спиральные рукава (рис. 9—12). Иногда спирали выходят под прямым углом к перемычке. Галактики с перемычками обозначают SB (подклассы SBa, SBb, SBc).

Наконец, третий хаббловский тип — иррегулярные галактики, обозначаемые Iгг. Они выделяются внешне хаотической, клочковатой структурой и не имеют какой-то определенной формы.

С этими чисто внешними различиями, определяющими хаббловскую последовательность галактик — от E0 через Sa, SBa до Iгг, связано множество других различий, среди которых астрономы ищут самое главное — тот фактор, который и обусловил разделение галактик на разные типы.

Галактики типа E называют ранними, а S — поздними, и часто говорят о поздних и ранних системах, о поздних и ранних свойствах. Какие же это свойства (в дополнение к тем, о которых мы уже сказали)? С точки зрения наблюдателя в первую очередь надо отметить цвет. Ранние системы имеют красный цвет, спирали уже значительно голубее, причем наиболее голубые — галактики Sc, т. е. самые поздние. Но самые голубые — иррегулярные галактики, поэтому их можно считать экстремально поздними.

Цвет отражает долю молодых горячих звезд в галактике, поскольку они имеют голубые цвета; это звезды спектральных классов A, B, O. Тем самым цвет отражает современную скорость звездообразования: чем голубее галактика, тем больше вклад таких звезд в общую светимость, тем больше, следовательно, доля только что родившихся звезд. Значит, в поздних галактиках сейчас интенсивно идет звездообразование. В то же время исследование цвета (и спектра) эллиптических галактик показало, что здесь звездообразование закончилось практически полностью не менее чем 5—7 миллиардов лет назад. Лишь у некоторых из них подозревается (но не более!) присутствие молодых звезд.

Другое важное различие ранних и поздних галактик — количество межзвездного газа. В E-галактиках доля массы нейтрального водорода HI совершенно ничтожна, часто его вообще не удается обнаружить. В спиралях она уже достигает десятка процентов, а в иррегулярных галактиках иногда даже большая часть массы заключена в нейтральном водороде.

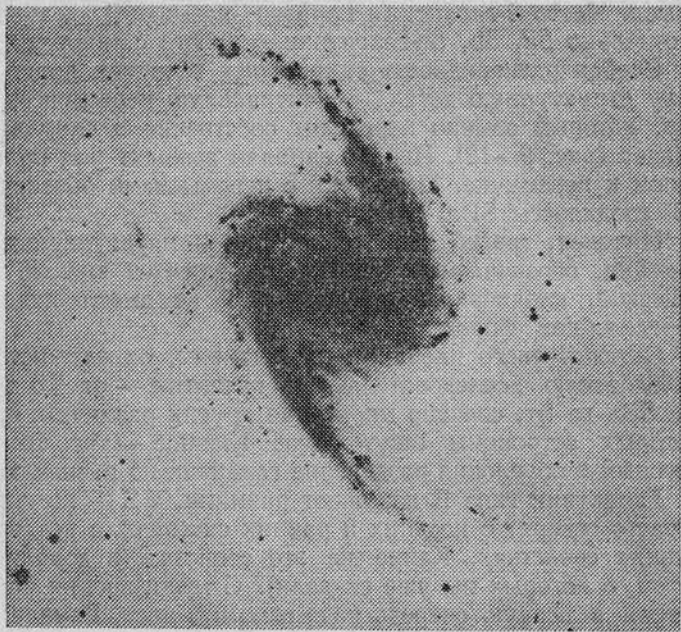


Рис. 9. Спиральная галактика NGC 1365 с перемычкой, видима «плашмя» (тип SBc)

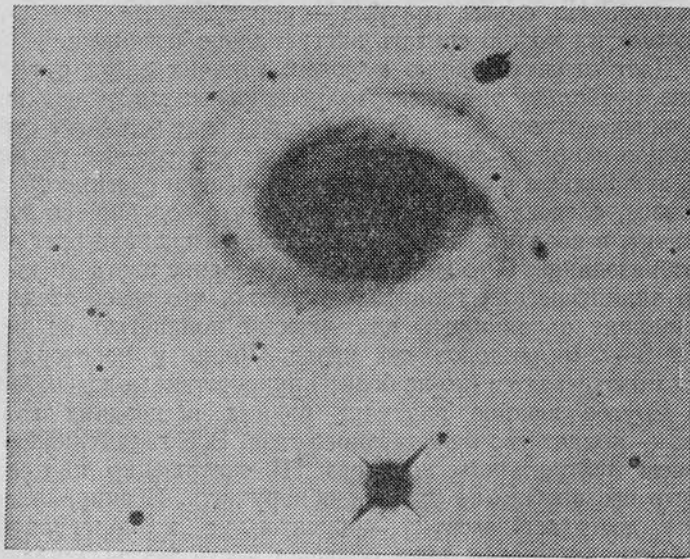


Рис. 10. Спиральная галактика NGC 53 с перемычкой



Рис. 11. Галактика с перемычкой NGC 253, видимая под углом к лучу зрения

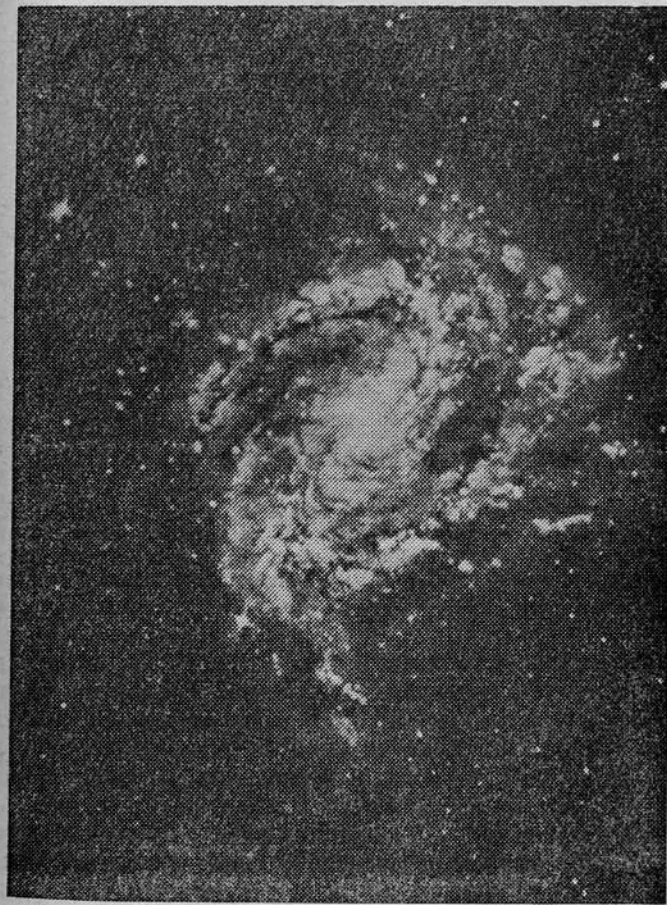


Рис. 12. Близкая спиральная галактика М 83 (тип SBc)

Основной параметр галактики — масса (а вместе с нею и количество звезд, полная светимость) — слабо зависит от хаббловского типа. Правда, самые массивные и яркие галактики — это эллиптические, но среди них же есть и такие, которые на порядки «легче» и «тусклее», чем спиральные. Масса эллиптических галактик лежит в огромном диапазоне — примерно от $10^{12} M_{\odot}$ до $10^6 M_{\odot}$ (речь идет о звездной, «видимой» массе); у спиралей массы по порядку величины в основном равны 10^{10} – $10^{11} M_{\odot}$; irregулярные, как правило, имеют меньшую массу, порядка $10^{10} M_{\odot}$ и ниже.

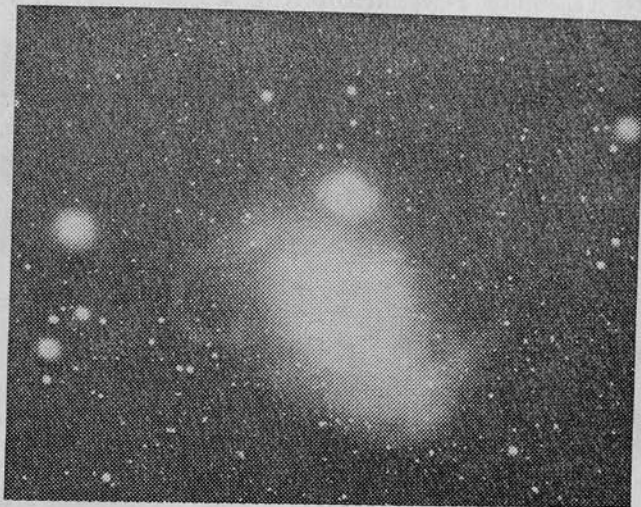


Рис. 13. Центральная галактика скопления в Печи NGC 1316; тип D или cD (радиогалактика Печь А). Ее диаметр более 200 кпк, на краю видны «петли», образованные старыми звездами, видна и галактика-спутник NGC 1317, находящаяся на периферии звездной оболочки NGC 1316

Эллиптические галактики более компактны; даже у гигантских систем основная часть массы заключена обычно внутри радиуса не более 5 кпк. В то же время для звездных дисков гигантских галактик типичны радиусы порядка десятка килопарсек, а иногда и нескольких десятков. Карликовые галактики могут иметь размер менее 1 кпк.

Возвращаясь опять к внешнему виду галактик, надо отметить, что, наряду с «классическими» представителями спиральных, эллиптических и irregулярных систем, нередко галактики столь причудливой формы, что трудно

решить, к какому типу следует их отнести. Классификация Хаббла часто кажется слишком ограниченной, чересчур простой, чтобы найти в ней место всем галактикам. Однако гораздо большее изумление должен вызывать тот факт, что, если отвлечься от не слишком существенных с точки зрения глобальной структуры деталей, то почти всегда проблему определения типа галактики удастся решить!

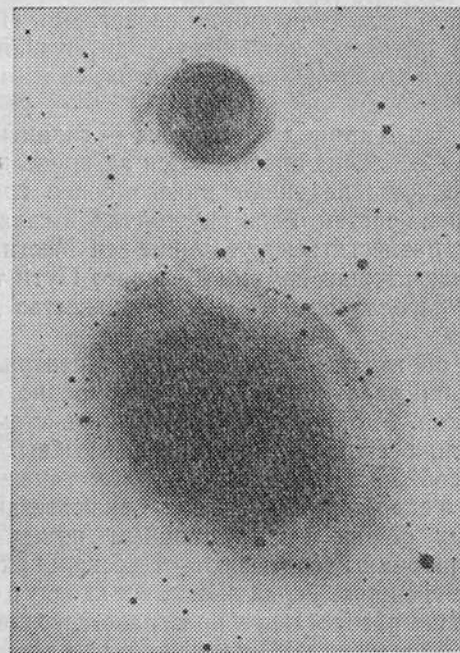


Рис. 14. То же, что на рис. 13, но фотография сделана с меньшей экспозицией. Это позволяет отчетливо увидеть спиральную галактику NGC 1317 — спутник галактик NGC 1316

И все же есть ряд систем, которые заслуживают того, чтобы их рассматривали отдельно. В числе первых следует назвать эллиптические галактики, которые стали обозначать как тип cD (рис. 13, 14). Это самые крупные галактики Вселенной, их звездная масса нередко превышает значение $10^{12} M_{\odot}$. Обычные, не cD-галактики не «дотягивают» до значения $10^{12} M_{\odot}$, и даже крупнейшие из них практически не выходят по массе за пределы $(1-3) \cdot 10^{11} M_{\odot}$.

Особенности имеет и структура cD-систем. Наряду с центральной звездной компонентой, чрезвычайно компакт-

ной и не отличающейся по существу от обычных Е-галактик, они имеют гигантскую разреженную (диффузную) звездную оболочку, размеры которой могут составлять десятки килопарсек и больше. Галактики сD крайне редки. Ближайшей и наиболее изученной системой подобного рода является галактика М 87 (до нее примерно 20 Мпк, тогда как до туманности Андромеды, галактики М 31—0,7 Мпк). Строго говоря, она не подпадает под исходное определение сD-галактик, но обладает многими их свойствами. При радиусе 6—8 кпк ее основной компоненты, диффузная оболочка прослеживается до 50—60 кпк от центра, ее звездная масса $\sim 10^{12} M_{\odot}$.

Поразительный пример сD-системы — галактика А 1413. Ее диффузная оболочка простирается за пределы 2 Мпк от центра! Астрономы не знают ничего более грандиозного в мире звездных систем. Ведь внутри такой галактики свободно может разместиться чуть ли не вся Местная система галактик, включающая помимо Млечного Пути туманность Андромеды, Магеллановы Облака и множество других галактик!

Так вот, сD-галактики — это всегда центральные системы скоплений галактик; отсюда, несомненно, их выдающиеся свойства. М 87 — это центральная система ближайшего скопления галактик — скопления Девы.

Кстати, свойства обычных галактик также связаны с положением в скоплениях — группировках звездных систем, удерживаемых общим гравитационным полем (рис. 15). Такие группировки насчитывают от нескольких единиц до десятков тысяч систем. Галактики не все входят в скопления; многие свободно разбросаны в пространстве, живут сами по себе (их называют галактиками поля). Галактики поля в большинстве своем — спиральные. В скоплениях же в большом количестве находятся эллиптические галактики; обычно они доминируют в центре, а спирали тяготеют к периферии скопления (вообще же среди ярких галактик преобладают спиральные, их примерно в два раза больше, чем эллиптических). Таким образом, на хаббловский тип влияет положение галактик в скоплениях. Оно определяет также ряд других свойств галактик (см. рис. 15).

Важнейшими объектами современной астрофизики стали галактики с активными ядрами. Их разделили на два существенно разных типа: сейфертовские и радиогалактики. И что же? Оказалось, что сейфертовские галактики — спиральные, а радиогалактики — эллиптические. Значит, хаббловский тип определяет даже характер активности ядра —

характер активности черной дыры, которая, по всей видимости, является «главным двигателем» в ядре!

В чем же природа хаббловской последовательности и как хаббловский тип связан со свойствами галактик?

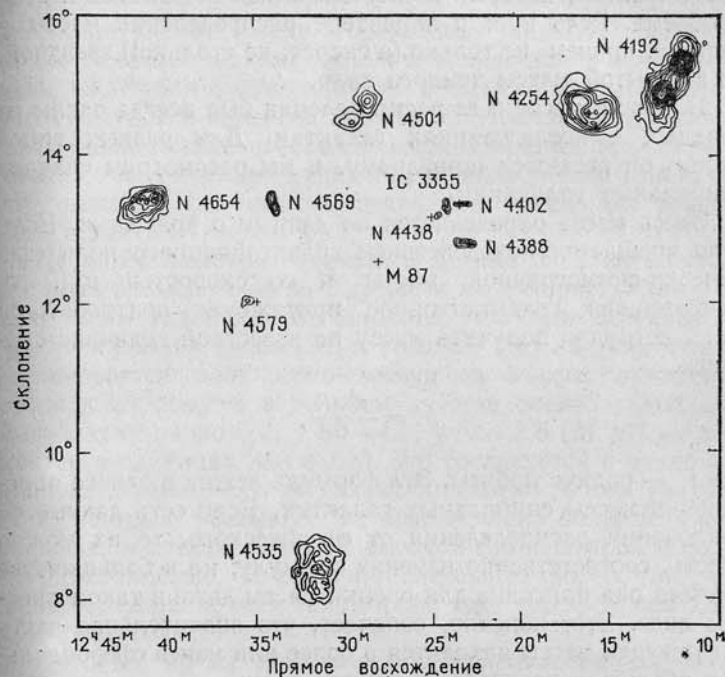


Рис. 15. Скопление галактик в Деве. В центре отмечена галактика М 87. Изображено распределение нейтрального водорода НI вокруг спиральных галактик. Видно, что на периферии скопления галактики имеют мощные газовые оболочки, а вблизи центра — слабые

В этом коротком вопросе — почти все основные проблемы современной астрофизики.

2. Масса, светимость, компактность, или: почему галактики разные?

Почему галактики разные? По какой причине одни имеют вид быстровращающихся тонких дисков со спиральями, другие не вращаются и имеют эллипсоидальную форму, третьи вообще бесформенны? Почему одна галактика является системой типа Sa, другая Sb, третья Sc? Есть

какая-то одна общая фундаментальная причина, обуславливающая многообразие типов и свойств галактик? Эти вопросы давно волнуют астрономов. Но лишь в наши дни в море наблюдательных данных начал прорисовываться некий фактор, который может оказаться решающим в этой проблеме. Речь идет о характере распределения массы в системе, причем не только (а скорее, не столько!) звездной, но и скрытой массы темного гало.

Вопрос о массе и ее распределении был всегда одним из главных в исследованиях галактик. Для разных типов систем он решается по-разному, и мы рассмотрим сначала спиральные галактики.

Здесь масса определяется по данным о вращении. Если тело вращается под действием гравитационного поля сферически-симметричной массы M со скоростью v_{rot} , то, приравнявая гравитационное притяжение центробежной силе, нетрудно получить массу по известной величине скорости:

$$M = \frac{v_{\text{rot}}^2 R}{G},$$

где R — радиус орбиты. Эта формула лежит в основе определения массы спиральных галактик. Если есть данные об отклонении распределения от сферического, то их можно учесть, соответственно изменив формулу; но в большинстве случаев она пригодна для оценки массы даже в таком простом виде. Это, конечно, означает, что значительная часть тяготеющей массы находится в более или менее сфероидальном объеме, а не просто в тонком диске.

Скорость вращения v_{rot} в галактиках определяют по смещению линий в спектре излучения, используя формулы эффекта Доплера. Если мы наблюдаем вращающуюся галактику «с ребра», то с одного края ее вещество (звезды, газ) движется к нам, поэтому линии смещаются в «синюю» сторону; на противоположном крае вещество удаляется от нас, и линии смещаются в красную сторону. Расстояние между смещенными линиями дает по формуле Доплера удвоенную скорость вращения на данном расстоянии от центра системы. Если получить спектры разных областей галактики, находящихся на разных расстояниях R от центра, то можно таким образом установить зависимость v_{rot} от R , которую называют кривой вращения. По ней можно судить о распределении массы в системе, т. е. о зависимости $M(R)$. Если же сфотографировать спектр всей галактики, то вращение проявится просто в уширении спектральных линий.

Для измерения кривых вращения используют как оптические спектры излучения звезд и ионизованного газа и спектры поглощения межзвездной среды, так и спектры радиоизлучения, в основном излучения линии водорода 21 см.

Большую программу определения кривых вращения по оптическим спектрам выполнила, начиная с конца 70-х годов, В. Рубин с сотрудниками в США. Были промерены более полусотни галактик Sa, Sb, Sc. Главным результатом стало обнаружение плоских «хвостов» кривых вращения в областях за пределами видимых звездных дисков галактик; по существу, это явилось открытием массивных темных гало галактик (см. гл. 6).

Не менее важными оказались данные о связи массы в пределах звездного диска с другими характеристиками разных типов галактик. Выяснилось, что при переходе от галактик ранних типов (Sa) к поздним (Sc) систематически увеличивается доля ярко-светящейся массы: отношение массы к светимости в голубом участке спектра, M/L_B , у Sa-галактик равно 6,2, у Sb—4,5, у Sc—2,6 (M и L_B измеряются в единицах M_\odot и L_\odot). Это согласуется с давно известным фактом, что Sc-галактики имеют более голубой цвет, который указывает на относительно большее число молодых, массивных звезд с высокой температурой и большой светимостью, и говорит, следовательно, о том, что звездообразование в Sc-галактиках идет быстрее, чем в Sa- и Sb-галактиках.

В то же время динамическая (гравитационная) масса у галактик всех типов одинаковым образом связана с полной звездной массой. Основная группа звезд в галактиках имеет возраст порядка десятка миллиардов лет, т. е. это очень старые объекты. Основной вклад в светимость среди таких объектов дают красные гиганты. Они сильно излучают в инфракрасном диапазоне, в котором вклад молодых горячих звезд ничтожен. Поэтому считается, что инфракрасная светимость галактик пропорциональна полной звездной массе системы. Так вот, оказалось, что отношение массы к инфракрасной светимости $L_{\text{ИК}}$ для Sa-, Sb- и Sc-галактик одинаково и равно $M/L_{\text{ИК}}=2$.

Перейдем к причине различия спиралей разных типов. Галактики ранних типов в среднем более массивны и компактны, о чем ясно говорит различие в максимальной скорости вращения v_{max} : у Sa она равна в среднем 300 км/с, у Sb—220 км/с, у Sc—175 км/с. С этим обстоятельством связаны глубокие различия в динамике системы, так что,

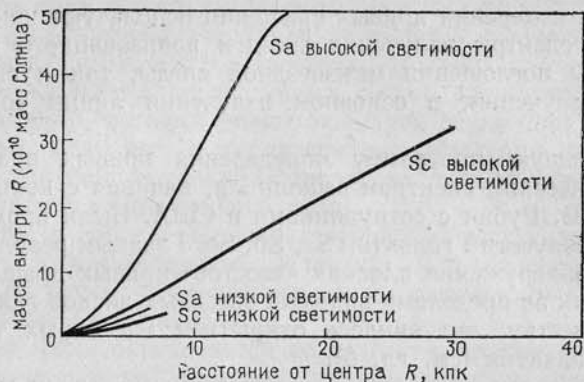


Рис. 16. Распределение массы внутри поздних (Sc) и ранних (Sa) спиральных галактик по В. Рубин

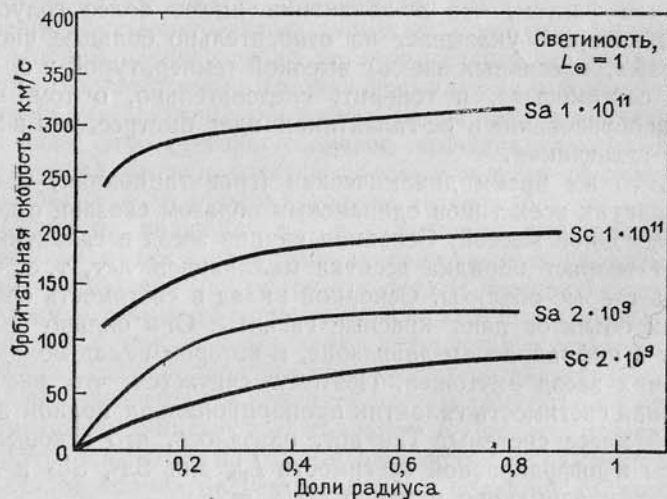


Рис. 17. Скорости вращения (кривые вращения) поздних и ранних спиральных галактик по данным В. Рубин

похоже, именно оно обусловило разделение галактик на разные типы (рис. 16 и 17).

Но каким образом оно затянуло на длительное время звездообразование в поздних галактиках? Каким образом оно определяет различия в спиральной структуре (напомним, что именно эти различия лежат в основе классификации спиральных галактик на разные типы по Хабблу)? Эти вопросы еще нужно решать, но уже сейчас можно сказать, что здесь главным оказывается, по-видимому, не столько масса, сколько степень ее компактности. Действительно, среди Sa-галактик известны системы с незначительной массой, а среди Sc — гигантские системы, которые превосходят по массе многие Sa-галактики. Другими словами, масса сама по себе еще не определяет тип галактики. В то же время, как показал американский астроном Р. Кенникут в начале 80-х годов, степень закрученности ветвей у галактик разных типов, но с одинаковой голубой светимостью L_B , одинакова. Значит, угол «закрутки» ветвей более массивной Sa-галактики такой же, как у менее массивной Sc-галактики (при одинаковых L_B масса у Sa-систем больше). А вот от скорости вращения, которая определяется параметром «компактности» M/R ($v_{\text{rot}}^2 = GM/R$), этот угол обнаруживает отчетливую зависимость. Он меняется от значения $i \approx 20^\circ$ при $v_{\text{rot}} \approx 150$ км/с до $i \approx 5-10^\circ$ при $v_{\text{rot}} \approx 300$ км/с. В целом поэтому можно думать, что изменение свойств галактик при переходе от Sa к Sb и Sc определяется в первую очередь этим параметром.

Обратимся к эллиптическим галактикам. Оценку их массы можно получить на основе дисперсии скоростей звезд, пользуясь теоремой вириала. Согласно этой теореме, если система находится в стационарном состоянии, то ее потенциальная энергия U (в данном случае это гравитационная энергия) равна по модулю удвоенной внутренней кинетической энергии

$$|U| = 2E_k,$$

Для сфероидальной системы гравитационная энергия равна по порядку величины $U \approx -GM^2/R$. Кинетическая энергия складывается из энергий движений отдельных звезд, поэтому ее можно записать так:

$$E_k \approx M\sigma_v^2/2,$$

где σ_v — среднеквадратичная скорость (дисперсия скоростей). Из этих соотношений находим, что

$$M \approx \sigma_v^2 R/G.$$

Если здесь заменить σ_v на v_{rot} , то мы получим формулу, которую уже рассматривали для случая спиральных галактик. Это понятно: во вращающейся системе кинетическая энергия заключена в круговых движениях звезд, поэтому применение теоремы вириала дает тот же результат, что и рассмотрение баланса центробежных и гравитационных сил.

Дисперсию скоростей измеряют, как и скорость вращения спиральных галактик, по эффекту Доплера. Представим себе, что мы смотрим в направлении на центр галактики. В этом направлении одна половина звезд в своем колебательном движении относительно центра галактики с разными скоростями удаляется от нас, вторая половина — приближается к нам. Если сфотографировать их суммарный спектр, то спектральные линии первых будут смещены на разную величину в красную сторону, у вторых — в синюю. В целом это приведет к уширению, размытию линии, причем ее ширина будет пропорциональна, очевидно, среднеквадратичной скорости звезд σ_v . Так по ширине линий находят величину σ_v .

Результаты определения масс эллиптических галактик показывают, что у них отношение массы к светимости больше, чем у спиральных, $M/L_B = 7-13$. Многие авторы приходят к выводу, что величина M/L_B не зависит от светимости, но некоторые полагают, что такая зависимость все же существует.

Сравнивая распределение массы у спиральных и эллиптических галактик, нетрудно увидеть, что у эллиптических выше степень компактности, т. е. больше величина M/R . При одинаковых массах их размеры могут быть в два-три раза меньше, чем у спиральных. Таким образом, во-первых, изменение отношения M/L_B при переходе от галактик ранних типов к поздним захватывает и самый «ранний» конец хаббловской последовательности, т. е. Е-галактики; во-вторых, вдоль всей этой последовательности систематически меняется параметр компактности M/R !

Не менее, а может даже более важным обстоятельством оказывается то, что у эллиптических галактик величина скрытой массы M_v в пределах одного и того же радиуса в 10 раз больше, чем у спиральных с той же звездной массой (см. подробнее в гл. 6). Значит, не только звездная компонента, но и массивное «темное» гало скрытой массы у ранних галактик существенно компактнее, чем у поздних. И поскольку этот параметр имеет явное отношение к «растягиванию» процесса звездообразования у поздних систем, то можно предположить, что он минимален

у иррегулярных и голубых компактных галактик, которые наиболее ярко демонстрируют «поздние» свойства: голубой цвет, большое количество газа и молодых звезд.

Представляется, что такая зависимость от параметра M/R вполне естественна. По сути, это гравитационный потенциал системы ($\varphi \approx GM/R$), следовательно, именно он (а, например, не просто масса) определяет, насколько интенсивно система стягивает и сжимает газ в своем гравитационном поле, насколько быстро она увеличивает, таким образом, его плотность и уменьшает температуру (при сжатии разреженный газ сильнее охлаждается из-за усиления лучеиспускания), т. е. создает благоприятные условия для превращения газа в звезды (при этом главную, первичную роль играет, вероятно, не видимая, а скрытая масса галактики; именно ее гравитационное поле «управляет» стягиванием газа в область звездообразования, в область формирования звездной компоненты галактики).

Сейчас есть и другие точки зрения на то, какой фактор определяет хаббловский тип галактик. Например, было обнаружено, что отношение интенсивностей в голубом и инфракрасном участках спектра, которое отражает отношение количества молодых и старых звезд, у спиральных галактик в целом коррелирует со светимостью. Отсюда делается вывод, что чем больше масса, тем меньше доля молодых звезд, следовательно, тем к более раннему типу относится спиральная галактика.

Но мы уже видели, что только масса сама по себе в целом не определяет, какой должна быть галактика. В самом начале этой главы мы говорили, что диапазон масс эллиптических галактик полностью перекрывает диапазон масс спиральных и иррегулярных галактик. Что касается отдельно спиралей, то здесь очень похоже, что чем больше величина M/R , тем больше в среднем и масса. Это может объяснить статистическую связь массы, следовательно, и светимости с типом спирали.

Добавим, что теория формирования галактик, рассматриваемая в последней главе, приводит к выводу, что компактность звездной компоненты M_s/R_s действительно связана с массой, $M_s/R_s \propto M_s^{1/2}$, и, кроме того, она тем больше, чем больше компактность темного гало скрытой массы M_v/R_v .

Интереснейший вопрос — почему галактики разные — пока открыт. К нему имеют безусловное отношение три фундаментальных характеристики — масса, угловой мо-

мент, компактность. Но какие из них главные? Независимы ли они? Какова роль самой массивной компоненты галактики — темного гало? Эти вопросы должны найти ответ в будущих исследованиях, которые наверняка преподнесут еще массу неожиданностей.

3. «Ленивые» и «новорожденные» галактики

В начале 60-х годов Ф. Цвикки отдельно выделил самые голубые галактики небольших размеров. Оказалось, что у многих из них излучение обусловлено только что родившимися горячими, яркими звездами. У одной из таких галактик ESO 338-IG 04 (она открыта в Южно-Европейской обсерватории, находящейся в Чили) показатель цвета $B-V = -0,08$ — такой же, как у звезд спектрального класса В, которые в 100 раз ярче Солнца и существуют всего лишь около двухсот миллионов лет!

Системы этого типа привлекли к себе большое внимание, и вот почему. Как правило, они исключительно богаты газом (иногда масса газа превышает видимую массу звезд) и имеют недостаток элементов тяжелее водорода и гелия; нередки случаи, когда в них не удается увидеть даже следов старых звездных населений, с возрастом, скажем, порядка миллиарда лет. В результате возникло подозрение, что, в отличие от других галактик, где всегда есть и даже доминирует старое звездное население с возрастом порядка десять-пятнадцать миллиардов лет, здесь мы впервые столкнулись с объектами, в которых звездообразование только что началось, т. е. на наших глазах происходит рождение звездной галактики. Это настоящие «новорожденные» Вселенной!

Впрочем, астрономы — народ все же осторожный; поэтому даже в этом, почти очевидном случае они оговариваются примерно так: старое население, может быть, и есть, но оно малочисленно и потому не видно в свете большого количества ярких молодых звезд. Если это действительно так, то получается, что такие галактики вплоть до нашего времени почему-то «ленились» делать себе звезды из газа, обогащать себя тяжелыми элементами, что тоже крайне любопытно.

К объектам этого рода принадлежат также системы, которые первоначально были названы гигантскими внегалактическими областями III. Их спектр мало чем отличается от спектра оболочек ионизованного газа вокруг

горячих звезд О, В — зон III, которые наблюдаются в тех областях галактик, где рождаются звезды.

Спектр внегалактических зон III как раз и говорит о том, что в этих системах доминируют молодые звезды с мощным ультрафиолетовым излучением, способным ионизовать гигантские массы газа.

Откуда же берутся в «трудолюбивом» семействе галактик «ленивые»? По какой причине появление на свет нынешних «новорожденных» задержалось на десяток миллиардов лет? Ключ к этим вопросам лежит, несомненно, в ряде общих для всех систем этого типа свойств. Во-первых, все они имеют исключительно малую массу, все они карликовые. Во-вторых, у наиболее близких можно увидеть, что многие из них очень разрежены, т. е. для своей малой массы имеют довольно большие размеры (замечательный пример — галактика Секстан А, расположенная примерно в одном мегапарсеке от нас; на ее фотографии, полученной с высоким разрешением, отчетливо видны редко разбросанные голубые и красные сверхгиганты, и совсем нет красных гигантов, т. е. более старых звезд; возраст же сверхгигантов — 10^6 — 10^8 лет). В то же время эти системы проявляют экстремально «поздние» свойства: у них самый голубой цвет, наибольшее количество газа и молодых звезд, иногда вообще не видно старых звезд. Все это говорит о том, что здесь, скорее всего, действует тот же фактор, обуславливающий разделение галактик на поздние и ранние, который мы рассматривали выше — степень компактности M/R . Возможно, определенную роль играет и масса M , причем главным, вероятно, является скрытая масса, степень ее компактности.

Не исключено, что «ленивые» и «новорожденные» галактики — это такие системы, у которых, в отличие от других, скрытой массы вообще нет.

Кстати, у карликовых эллиптических галактик подозревается существование массивных «темных» гало скрытой массы. Их нынешняя малая масса и дефицит тяжелых элементов обусловлены, в отличие от «ленивых» и «новорожденных», тем, что в результате бурного звездообразования много миллиардов лет назад они потеряли большую часть массы протогалактического облака (до 99%), поэтому не смогли пройти весь эволюционный путь, положенный галактикам. В заключение отметим, что «ленивые» галактики обнаруживаются только потому, что они переживают сейчас вспышку звездообразования; их должно быть гораздо больше в труднонаблюдаемой «спокойной» фазе.

4. Соотношения Фабер — Джексона и Тулли — Фишера

Массовые определения различных характеристик галактик, особенно широко развернувшиеся к середине 70-х годов, позволили установить чрезвычайно важные эмпирические закономерности, неизвестные ранее.

Оказалось, что у эллиптических галактик ширина спектральных линий тем больше, чем ярче галактика, чем больше ее светимость. Поскольку ширина линии, как мы уже знаем, пропорциональна дисперсии скоростей звезд, $\Delta\lambda \propto \sigma_v$, то это означает, что светимость и дисперсия связаны друг с другом; эта связь имеет вид

$$L_B \propto \sigma_v^4.$$

Аналогично у спиральных галактик была обнаружена корреляция между светимостью в голубом участке спектра и шириной линии излучения нейтрального водорода на волне 21 см. Ширина линии, как уже говорилось, пропорциональна скорости вращения галактики, точнее, максимуму этой скорости; рассматриваемую связь можно записать в виде

$$L_B \propto v_{\max}^3.$$

Эти формулы, названные по именам их авторов соответственно соотношением Фабер — Джексона и соотношением Тулли — Фишера, исключительно важны по крайней мере в двух отношениях. Во-первых, они дали весьма эффективный метод измерения расстояний, т. е. метод решения одной из главнейших задач внегалактической астрономии и наблюдательной космологии (достаточно сказать, что к этой задаче сводится определение постоянной Хаббла H_0 , следовательно, определение возраста Вселенной). Действительно, даже для чрезвычайно удаленных, скажем, спиральных галактик в наши дни удастся проводить хорошие измерения ширины линии 21 см. Ширина линии дает нам светимость, или абсолютную звездную величину M_V , а дальше уже совсем просто вычислить расстояние r , зная видимую звездную величину m : $\lg r = 1 + 0,2(m - M_V)$, где r измеряется в парсеках (величина m — это первое, с чего начинают астрономы при исследовании любого объекта).

Во-вторых, соотношения Фабер — Джексона и Тулли — Фишера, по существу, показывают, что между звездной массой галактик и их размерами имеется вполне определенная количественная связь, причем однозначная для каждого типа галактик. Это крайне важно для понимания

того, как рождались галактики; наши представления о формировании этих систем будут правильны только в том случае, если они дадут связь между массой и размером, вытекающую из соотношений Фабер — Джексона и Тулли — Фишера.

Но почему мы говорим о массе и размерах, когда в этих соотношениях фигурируют светимость и скорости? Вспомним теорему вириала, которая записывалась для эллиптической галактики в виде $\sigma_v^2 \approx GM/R$. Из нее следует, что $\sigma_v^4 \propto M^2/R^2$. Если учесть, что у эллиптических галактик отношение L/M является константой, т. е. $L \propto M$, то $L \propto \sigma_v^4$ переходит в $M \propto M^2/R^2$. Таким образом, размер эллиптических галактик пропорционален корню квадратному из массы:

$$R \propto M^{1/2}.$$

Надо отметить, что фактически эта зависимость была открыта лет на десять раньше соотношения Фабер — Джексона, в середине 60-х годов. В форме связи между гравитационной энергией и массой системы она известна как соотношение Фиша:

$$U \propto M^{3/2}.$$

Обратимся к спиральным галактикам. Из соотношения Тулли — Фишера и выражения $v_{\text{rot}}^2 = GM/R$ получается

$$R \propto M^{1/3},$$

если отношение M/L_B не зависит от L_B . Мы видели, что, согласно Рубин и ее коллегам, величина M/L_B действительно постоянна для каждого хаббловского типа спиралей. Но до сих пор здесь остаются разногласия. Другие авторы находят, что инфракрасная светимость $L_{\text{и}}$, в отличие от голубой L_B , у всех спиральных галактик связана со скоростью вращения соотношением

$$L_{\text{и}} \propto v_{\max}^4,$$

аналогичным соотношению Фабер — Джексона. Поскольку $M/L_{\text{и}}$ одинаково для всех типов спиралей и не зависит от $L_{\text{и}}$ ($M/L_{\text{и}} \approx 2$), то отсюда вытекает та же связь между R и M , что и для эллиптических галактик, т. е. $R \propto M^{1/2}$.

В пользу последней зависимости говорит результат, полученный в 1983 г. Ф. Маттеучи и Ч. Чиоси (Италия) для иррегулярных галактик:

$$\left(\frac{R}{1 \text{ кпк}}\right) \approx \left(\frac{M}{10^8 M_{\odot}}\right)^{1/2},$$

т. е. между R и M та же зависимость, что и у эллиптических галактик! Это заставляет думать, что она носит универсальный характер, и спиральные галактики, по-видимому, также следуют ей. Однако нужны дальнейшие исследования.

Глава 8

НАША ГАЛАКТИКА

Лучше всего нам известно устройство Млечного Пути — той звездной системы, в которой мы живем. Это понятно; здесь мы можем подметить огромное множество таких деталей, таких тонкостей, которые совершенно недостижимы для нас даже в ближайших галактиках — сказываются огромные расстояния между звездными системами. Поэтому неудивительно, что изучение строения Галактики дало ключи к пониманию того, как возникли галактики вообще, как они рождаются и развиваются, как они устроены и почему именно так, а не иначе.

Наша Галактика — спиральная, типа Sbc по классификации Хаббла. Ее нельзя назвать заурядной — в мире галактик она занимает место среди гигантских и даже сверхгигантских систем. Полная звездная масса Галактики превышает $10^{11} M_{\odot}$, а радиус звездного диска составляет около 15 кпк (хотя отдельные звезды и звездные скопления наблюдаются и на больших расстояниях от центра). По-видимому, как и другие гигантские звездные системы, она находится в центре протяженного, возможно, до 100 кпк, «темного» гало; это облако невидимого вещества, «скрытая» масса, величина которой раз в десять больше массы звездной компоненты.

Солнце вместе со своей планетной системой расположено почти точно в плоскости звездного диска Галактики на расстоянии $R=(8-9)$ кпк от ее центра (часто эту величину округляют до 10 кпк). На этом расстоянии диск вращается со скоростью примерно 220 км/с.

В ближайшей окрестности Вселенной насчитывается не слишком много звездных систем, подобных нашей, т. е. гигантских спиральных галактик. Ближайшая из них — туманность Андромеды, или M 31. Она находится на расстоянии 0,7 Мпк от нас. Дальше расположены M 81 (3 Мпк), M 83 (3 Мпк), M 101 (3,8 Мпк), M 51 (3,8 Мпк). Почти с каждой из таких галактик связана система карликовых галактик-спутников, обычно эллиптических или иррегу-

лярных. Похоже, что они удерживаются гравитационным полем массивного темного (невидимого) гало вокруг центральной галактики. В окрестности Галактики насчитывается около двух десятков таких спутников, среди которых Большое Магелланово Облако и Малое Магелланово Облако.

Если наблюдать Галактику со стороны, то она окажется голубой системой (показатель цвета $B-V=0,53$). Светимость в голубом участке спектра B у нее $L_B \approx 1,6 \cdot 10^{10} L_{\odot} \approx 6 \cdot 10^{43}$ эрг/с, а полная светимость составляет примерно 10^{44} эрг/с. Абсолютная звездная величина $M_V \approx -20,5^m$.

1. Звездные населения и подсистемы

Изучая туманность Андромеды с помощью 2,5-метрового рефлектора, В. Бааде (США) в начале 40-х годов обратил внимание на то, что в этой гигантской звездной системе, похожей на нашу Галактику, у разных звезд есть свои излюбленные места. Так, центральная часть галактики заселена преимущественно красными звездами, тогда как яркие голубые звезды предпочитают спиральные рукава и избегают центральных областей. Возникло представление о типах звездных населений: население I — это звезды, обычно встречающиеся в спиральных рукавах и вообще в дисковой компоненте галактик, население II — звезды центральной части и в целом сфероидальной компоненты.

Концепция звездных населений оказалась необычайно плодотворной для понимания строения и эволюции галактик, и в послевоенные годы она стала быстро развиваться. С увеличением знаний о типах звезд, о связи положения звезд в галактике с различными их свойствами стало ясно, что простое разделение на два типа звездных населений и в туманности Андромеды, и в нашей Галактике явно недостаточно. Одновременно все глубже осознавался тот факт, что Галактика образована несколькими существенно разными подсистемами. С этим понятием связывалась форма геометрического объема, занимаемого тем или иным типом звездных населений. Так, сферическая подсистема (или гало) образована звездами населения II, население I образует звездный диск (рис. 18). Чтобы разобраться в этих проблемах, в 1958 г. в Риме собрались крупнейшие астрономы мира на симпозиум, который так и назывался: «Звездные населения». Он стал важным событием в истории астрономии. К этому времени теория звездной эволюции позволила установить главные причины различия звезд разных

типов, теория происхождения химических элементов объяснила причину различия химического состава звезд, большое количество новых наблюдательных данных в деталях обрисовали связь физических и химических характеристик звезд с характеристиками их движения и пространственного распределения в Галактике. Этим достижениям обязан один из главных результатов симпозиума: многокомпонентная модель Галактики, связавшая в единое целое

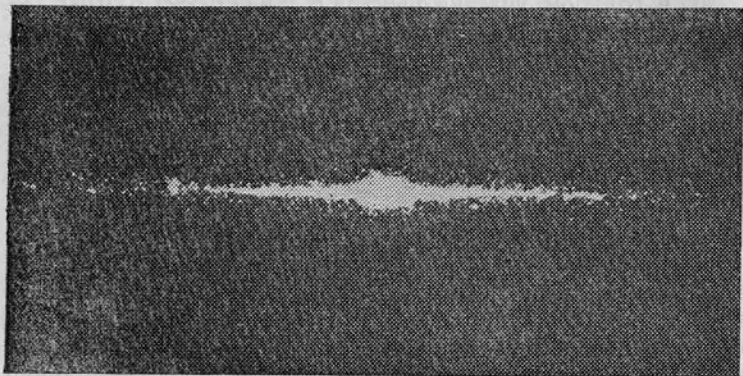


Рис. 18. Распределение инфракрасных источников в Галактике (по данным орбитальной обсерватории ИРАС). В основном это молодые горячие звезды, окруженные пылью с температурой $T \approx 400$ К; пыль перензлучает свет звезд в инфракрасном диапазоне. Источники хорошо обрисовывают диск и балдж Галактики, которые в оптическом диапазоне не видны из-за поглощения света слоем пыли в диске Галактики

возраст, физические и химические свойства звезд, их пространственное распределение и кинематику. Вместо двух типов населения Бааде было выделено уже пять подсистем, и наряду со сферической, промежуточной и плоской подсистемами появились экстремально плоская подсистема и дисковая.

Структура Галактики оказалась сложнее, чем представлялось ранее. Но в то же время стала вырисовываться простая и красивая картина формирования Галактики и ее звездных населений, которая объясняла, почему самые разнообразные характеристики звезд оказываются связанными друг с другом. И в этом, пожалуй, заключается самый важный результат исследования звездных населений и подсистем Галактики.

А картина возникала вот такая. В сферической подсистеме Галактики, как оказалось, находятся самые старые

звезды, возраст которых не менее полутора десятков миллиардов лет. Это звезды шаровых скоплений, субкарлики, красные гиганты, переменные звезды типа RR Лиры. Наряду с большим возрастом и сферическим распределением в Галактике, у них чрезвычайно низкое содержание тяжелых элементов (в десятки раз меньше, чем на Солнце), сильно вытянутые, почти радиальные орбиты; при этом вся подсистема в целом практически не вращается. А вот у звезд диска и плоской подсистемы орбиты круговые, и подсистемы как целое быстро вращаются вокруг центра Галактики; у них нормальное, т. е. близкое к солнечному, содержание тяжелых элементов. Возраст диска как минимум в два раза меньше возраста гало, а в плоской подсистеме до сих пор продолжают рождаться звезды. Основная масса звезд здесь — это карлики, красные гиганты с нормальным химическим составом; кроме того, здесь же находятся рассеянные звездные скопления, пульсары, облака межзвездного газа.

Почему Галактика оказалась устроенной именно таким образом? Ответ на этот вопрос подсказывает факт различия возраста подсистем. Он означает, что свойства подсистем обусловлены эволюцией Галактики, изменением характеристик того вещества, из которого сформировались в конце концов все ее звездные населения.

Примерно 15—18 миллиардов лет назад во внутренней области медленно вращающегося протогалактического газового облака родились шаровые скопления и звезды поля (т. е. не принадлежащие к скоплениям), которые образовали сферическую подсистему. В это время в веществе протогалактики было мало тяжелых элементов, поэтому звезды скоплений и поля бедны металлами. Затем наиболее массивные звезды, быстро эволюционируя до стадии сверхновой, взрывались и обогащали созданными в процессе взрыва тяжелыми элементами газ протогалактики. Поэтому более поздние поколения звезд формировались уже из вещества с большим содержанием металлов. Они в свою очередь добавляли металлы в межзвездный газ (при вспышках сверхновых), и в результате самые молодые подсистемы имеют наибольшее содержание тяжелых элементов.

Одновременно с обогащением происходило сжатие газа под действием гравитационного поля галактики. Родившаяся ранее звездная компонента также сжимается; но она сохраняет энергию, получаемую от гравитационного поля, поэтому ее сжатие быстро останавливается, подсистема достигает стационарного состояния, в котором кинети-

ческая энергия движения звезд становится равной примерно половине гравитационной энергии подсистемы. В результате звездная компонента имеет размеры лишь немногим меньше тех, которые она занимала в момент формирования. Газ же при сжатии теряет энергию: при взаимодействии атомов и ионов газа внутренняя энергия превращается в конечном итоге в излучение и уходит из системы (см. подробнее об этом в гл. 1). Теряя энергию, газ не может достичь равновесного состояния в гравитационном поле и сжимается безостановочно. Значит, последующие поколения звезд будут рождаться ближе к центру системы, и образуемая ими подсистема будет иметь меньшие размеры.

При этом надо учесть еще одно обстоятельство. Протогалактика имеет угловой момент и вначале медленно вращается. Но в процессе сжатия газ движется к центру системы, следовательно, в силу закона сохранения углового момента скорость вращения нарастает. Вместе с ней растет центробежная сила, которая в конце концов останавливает сжатие в плоскости вращения. В то же время вдоль оси вращения ничто не препятствует газу сжиматься дальше. В итоге на этой стадии эволюции разреженного вещества, не успевшего ранее войти в звезды, образуется тонкий, быстровращающийся диск. Таким образом, размеры газового облака вращающейся протогалактики уменьшаются неодинаково вдоль и поперек оси вращения. Это и объясняет, почему старые звезды, родившиеся до того, как стали существенны центробежные силы, образовали сферическую, почти не вращающуюся подсистему, и почему звезды, которые родились позже всех, образовали очень тонкий, быстровращающийся звездный диск.

Вот такая чрезвычайно убедительная и красивая картина формирования Галактики, в высшей степени логично и непротиворечиво объясняющая все главные характеристики подсистем и свойства населяющих их звезд, сложилась к началу 60-х годов. В последующие годы она не претерпела сколько-нибудь существенных изменений. И лишь с середины 70-х годов были получены качественно новые сведения о свойствах подсистем Галактики, а вместе с этим картина их формирования приобрела новые черты. Об этом и пойдет речь ниже.

2. Дискретность подсистем и активные фазы эволюции

Подводя итоги обсуждению свойств звездных населений на симпозиуме 1958 г., американский астроном М. Шварцшильд заключил, что деление Галактики на ряд отдельных

подсистем несколько условно в том смысле, что переход от одной к другой происходит непрерывно. Непрерывно меняется возраст, содержание тяжелых элементов, толщина, и если взять другие границы этих параметров, то мы получим подсистемы с другими характеристиками, если взять более мелкое деление их значений, то мы получим большее число подсистем, и т. д. Этой точке зрения в то время возразить было нечего. Более того, она казалась довольно естественной, поскольку соответствовала убеждению в том, что процессы звездообразования и обогащения тяжелыми элементами идут в Галактике непрерывно: при таком характере этих процессов параметры звездных населений, очевидно, должны меняться непрерывно.

В середине 70-х годов автор вместе со своими коллегами начал в деталях исследовать распределение тяжелых элементов среди звездных населений Галактики. К этому времени объем и качество данных о химическом составе звезд существенно возросли, поэтому можно было надеяться увидеть новые закономерности, связанные с химическим составом. И уже первые объекты, которые были изучены — а это были шаровые скопления, — принесли неожиданный результат. Все скопления разделились на две или даже на три группы, каждая из которых имела выделенное значение величины металличности $[Fe/H]$, при этом скопления с промежуточными значениями $[Fe/H]$ практически отсутствовали (металличностью обычно называют относительное содержание элементов группы железа; в первом приближении она однозначно связана с общим содержанием тяжелых элементов соотношением $[Fe/H] \approx \lg(Z/Z_{\odot})$, так что эта величина определяет содержание тяжелых элементов относительно их содержания на Солнце $Z_{\odot} \approx 2\%$). Анализ распределения металличности у других объектов гало — наиболее старых звезд Галактики: у субкарликов, переменных типа RR Лиры — подтвердил этот результат: во всех случаях выделялись группы со средним значением $[Fe/H] \approx -1,5$ и $[Fe/H] \approx -0,7$ (рис. 19). Это соответствует $Z \approx 0,01\%$, и $Z \approx 0,5\%$, если $Z_{\odot} = 2\%$. В то же время относительное количество звезд со значениями $[Fe/H] \approx -1,0$ и $[Fe/H] \approx -0,5$ оказалось чрезвычайно малым, и даже это незначительное количество можно было объяснить неизбежными случайными ошибками в определении химического состава.

Аналогичное исследование молодых, наиболее многочисленных в окрестности Солнца звезд — звезд диска и плоской подсистемы — показало, что они в свою очередь

делятся на две группы, так что большинство звезд имеет металличность $[Fe/H] \approx -0,3$ ($Z \approx 1\%$) и $[Fe/H] \approx 0$ ($Z \approx 2\%$).

Эти исследования были повторены уже в 1985 г. американскими астрономами Дж. Джилмором и Р. Уайз. Они получили те же выводы о разделении населения Галактики по металличности на четыре группы, пришли к тем же выводам о том, что содержание тяжелых элементов в Галактике меняется при переходе от одних звездных населений к другим не непрерывно, а скачком, дискретно.

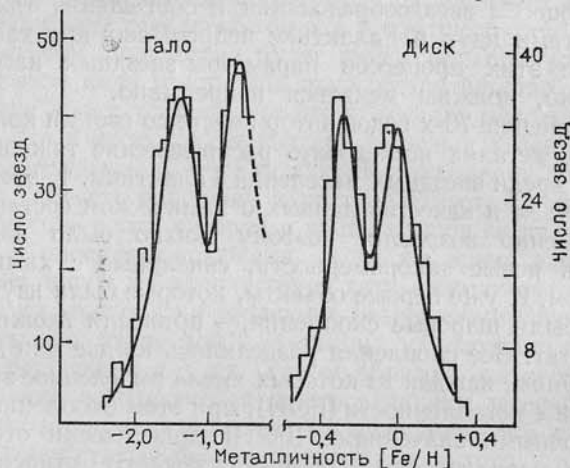


Рис. 19. Распределение металличности звезд гало (выборка субкарликов и звезд типа RR Лиры) и звезд диска (выборка карликов класса G) в окрестности Солнца. Видно, что по металличности выделяются четыре группы звезд

Для шаровых скоплений такой же результат независимо получил американский астроном Р. Зинн.

Уже в первых работах мы пришли к выводу, что скачкообразный характер изменения химического состава в Галактике дает важнейшую информацию об истории формирования ее подсистем, истории процессов звездообразования и обогащения тяжелыми элементами. Была предложена гипотеза, согласно которой эти процессы, вопреки общепринятому мнению, протекали дискретным образом, так что периоды интенсивного звездообразования — *вспышки звездообразования* — прерывались длительными периодами, когда звездообразование почти прекращалось. Это относится и к процессу обогащения. Во время вспышки звездообразования сверхновые выбрасывают в окружающую среду большое количество тяжелых элементов, кото-

рые в следующем цикле звездообразования войдут в звезды нового поколения и обеспечат у них значительно более высокое содержание тяжелых элементов. Характерные вспышки звездообразования и обогащения тяжелыми элементами, сопровождающиеся большим энерговыделением, мы назвали *активными фазами* эволюции Галактики.

С активными фазами автор в 1977 г. связал само существование подсистем Галактики, предположив, что каждая подсистема рождалась при очередной вспышке звездообразования. Эта точка зрения диаметрально противоположна идее М. Шварцшильда об условности и произволе в выделении подсистем из-за непрерывности образования звездных населений и непрерывности обогащения. Дискретный на самом деле характер этих процессов приводит к дискретности характеристик подсистем, которая устраняет произвол в выборе количества этих структурных единиц Галактики и в выборе их параметров.

Таким образом, новый элемент, который внесла теория активных фаз эволюции в картину формирования Галактики, состоял в том, что образование большей части звезд и основное обогащение тяжелыми элементами произошло в четырех циклах, разделенных большими интервалами времени, и именно это обстоятельство отчетливо выделило четыре подсистемы Галактики: сферическую, промежуточную, диск и плоскую.

Из этой теории следовало, что между подсистемами должен быть разрыв в возрасте, что при переходе от одной подсистемы к другой скачком должны меняться характеристики их пространственного распределения и кинематики. И такие свойства действительно обнаружились!

Еще в 1970 г. известный американский исследователь звездных населений О. Эгген увидел, что звезды с металличностью $[Fe/H] \geq -0,1$ в заметных количествах наблюдаются на расстояниях вплоть до $z \approx 400$ пк над плоскостью симметрии диска Галактики. За этой границей их численность сразу же падает практически до нуля. В то же время звезды с меньшей металличностью, но превышающей значение $[Fe/H] = -0,5$, встречаются в изобилии вплоть до расстояний $z \approx 800$ пк; но за этой границей их численность точно так же почти скачком падает до нуля. Позже такие же скачки величины z мы обнаружили для звезд с еще меньшим содержанием металлов, а также для шаровых скоплений: объекты с $[Fe/H] > -1,0$ быстро исчезают за границей $z = 2$ кпк, а объекты с $[Fe/H] < -1,0$ встречаются вплоть до $z = 25$ кпк и дальше. У шаровых скоплений подобные скачки

z-координаты отметил в середине 70-х годов московский астроном А. С. Шаров и почти через 10 лет — американец Р. Зинн.

Это именно тот эффект, который следует ожидать, если формирование подсистем происходило в результате вспышек звездообразования. После очередной вспышки рождение звезд практически останавливается, и когда снова возникнут условия для звездообразования, газ успеет заметно сжаться, так что рождающиеся из него звезды будут находиться в гораздо более тонком слое, чем предшествующие поколения звезд. При этом у них будет больше металлов, так как сверхновые обогатили газ тяжелыми элементами во время предыдущего цикла звездообразования.

Так же скачкообразно меняется характер галактических орбит звезд. В частности, обнаружилось, что у звезд с большим содержанием металлов эксцентриситет орбит близок к нулю, т. е. орбиты почти круговые; у группы с меньшим содержанием металлов, например, у субкарликов, эксцентриситет близок к 1, орбиты почти радиальные. А вот звезд с эксцентриситетом 0,5 чрезвычайно мало.

С точки зрения теории активных фаз это объясняется следующим. Субкарлики и другие звезды гало рождались в то время, когда протогалактическое газовое облако еще не успело сжаться и потому вращалось очень слабо. Газ сжимался к центру, и образовавшиеся из него звезды сохранили это радиальное движение. Следующая вспышка звездообразования произошла тогда, когда протогалактика сжалась в тонкий быстровращающийся диск, в котором центробежная сила уравнивала гравитационное притяжение к центру системы. Поэтому звезды этого поколения имеют круговые орбиты. Остановка звездообразования во время промежуточной стадии сжатия привела к тому, что звезд с промежуточными орбитами оказалось чрезвычайно мало.

Длительный перерыв в звездообразовании, во время которого первоначально огромное сфероидальное газовое облако протогалактики успело сжаться более чем в десять раз и превратилось в тонкий диск, не могло не проявиться в свойствах распределения звезд в пространстве. Но как убедиться, что существуют две (или больше) сильно различающиеся размерами и геометрической формой звездные компоненты? Как отличить это от возможности того, что на самом деле звезды заполняют все промежуточные формы между диском и протяженным сфероидом? Решение было получено в 80-х годах в работах американских астрономов

Дж. Бакола, М. Шмидта и Р. Сонейры. Они стали анализировать подсчеты звезд разных цветов и разных светимостей в направлении полюса Галактики, т. е. в направлении, перпендикулярном ее плоскости. Взяв предельно слабые звезды, т. е. с очень большими видимыми звездными величинами ($m_V \approx 20^m - 22^m$), они увидели, что среди них оказалось много голубых (показатель цвета $B-V \approx 0,5$) и красных звезд ($B-V \approx 1,5$), а звезд промежуточного цвета (желтых) было удивительно мало (рис. 20). Этот результат они объяснили следующим образом. Известно, что голубые звезды — это обычно очень яркие сами по себе объекты, их светимость в десятки и сотни раз больше, чем светимость красных звезд (карликов). Но голубых звезд во

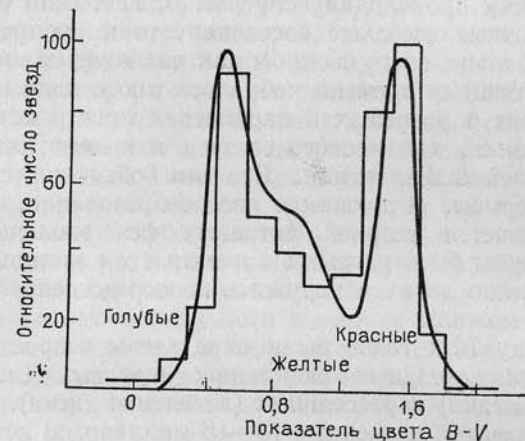


Рис. 20. Распределение показателя цвета выборки визуально слабых звезд ($m_V = 20^m - 22^m$) в направлении Северного галактического полюса. Избыток голубых и красных звезд (звезды гало и диска соответственно) выявляет скачкообразный переход от диска к гало и отсутствие промежуточных между гало и диском подсистем (Дж. Бакол, М. Шмидт, Р. Сонейра)

много раз меньше, чем красных. Поэтому, когда мы смотрим перпендикулярно плоскости Галактики, то среди слабых объектов мы не обнаружим голубых звезд населения диска. Из-за большой светимости они видны как слабые объекты только на больших расстояниях, а на таких расстояниях их в данном направлении нет, они все находятся вблизи плоскости Галактики. Поэтому слабые звезды диска в полюсе Галактики — это главным образом тусклые красные карлики, находящиеся в огромном количестве вблизи

Солнца (напомним, что Солнце находится практически в плоскости симметрии диска Галактики).

Иную картину дают звезды гало. Размеры гало в направлении полюса на порядок больше толщины диска, поэтому среди слабых объектов мы увидим много далеких голубых звезд большой светимости. В то же время в окрестности Солнца звезд гало в сотни раз меньше, чем звезд диска, поэтому доля красных и желтых карликов гало будет гораздо меньше, чем таких же звезд диска. Отсюда и возникает в общем распределении по цвету избыток голубых объектов (звезды гало) и красных (звезды диска) и недостаток промежуточных желтых звезд.

И вот здесь главное: если бы в Галактике переход от гало к диску происходил непрерывно, т. е. если бы были промежуточные звездные населения, то в распределении по цвету больше всего было бы как раз желтых звезд!

К настоящему времени набралось много данных, которые говорят о разрывах в параметрах пространственного распределения, химического состава и кинематики звездных населений Галактики. Все они объясняются, если были перерывы, остановки в звездообразовании, как это предсказывается теорией активных фаз эволюции. Но тогда должны быть разрывы и в возрастах звездных населений! Можно ли их обнаружить непосредственно? Оказалось, что можно!

К концу 70-х годов были определены возрасты большого числа звездных скоплений: шаровых (население гало Галактики) и рассеянных (население диска). Возраст первых оказался не меньше 13—15 миллиардов лет, а вторых — не больше 6—8 миллиардов лет. При этом среди звезд поля, т. е. не входящих в скопления, по существу не было найдено таких, у которых был бы промежуточный возраст. Отсюда был сделан вывод, что после эпохи рождения шаровых скоплений, т. е. эпохи формирования гало, прошло не менее пяти миллиардов лет, прежде чем звезды стали рождаться вновь — но теперь уже в диске. Этот результат стал важнейшим звеном в цепочке фактов, которые показывают, что образование подсистем Галактики обусловлено дискретным характером звездообразования.

Что же происходило в Галактике в течение этих пяти миллиардов лет? Почему вдруг начавшийся процесс звездообразования был остановлен и как он снова стал возможен спустя столь длительное время? Весьма правдоподобной представляется следующая картина. Активная фаза, во время которой родилось звездное население гало, заверши-

лась сильным разогревом протогалактического газового облака. Под действием всплеск сверхновых его температура поднялась до десятков миллионов градусов — протогалактика стала «горячей». При таких температурах, конечно же, никакое звездообразование невозможно. Кроме того, давление газа становится столь высоким, что происходит по существу взрыв, и сжатие (коллапс) сменяется разлетом протогалактического облака. Его внешние слои уходят в межгалактическое пространство, а внутренняя часть облака, затормозившись гравитационным полем системы, снова начинает сжиматься. Через некоторое время она остывает, и в ней начинается второй цикл звездообразования. В этом цикле рождается звездное население диска. Расчеты показывают, что условия для звездообразования возникают действительно через несколько миллиардов лет после предыдущей активной фазы.

Эта картина, которую автор назвал «горячей» моделью формирования галактик, более подробно описана в заключительной главе книги. Она не является чисто умозрительной, голой догадкой о том, как могли развиваться события при формировании звездных галактик. К ней ведут вполне определенные наблюдательные данные о свойствах нашей Галактики, о химическом составе других галактик (см. гл. 4), о свойствах межгалактической среды (см. гл. 5), которые в своей совокупности делают ее почти необходимой.

Сейчас дискретность структуры спиральных галактик установлена для многих других систем. Целенаправленную работу по этой проблеме выполнил в Нидерландах в начале 80-х годов П. ван дер Круит совместно с Л. Сирлом. Вывод из своих работ на эту тему он кратко выразил так: «Дело в том, что между диском и сфероидом нет гладкого перехода». Это заключение основано на результатах, свидетельствующих, по его словам, об «...отчетливом разрыве в (пространственном — А. С.) распределении, металличности и кинематике между внешними частями сфероида (т. е. гало — А. С.) и старого населения диска».

В заключение этого раздела — небольшое отступление. В 1976—1977 годах автор совместно со своим коллегой В. А. Марсаковым опубликовал серию работ, в которых было указано существование разрывов в металличности и кинематике по данным о шаровых скоплениях, субкарликах и карликах старого населения диска, звездах типа RR Лиры. В этих же работах было предложено объяснение этим фактам, заключающееся в том, что звездообразование и обогащение тяжелыми элементами в Галактике проходило

не непрерывно, как принято было считать, а дискретно; была сформулирована идея, что подсистемы Галактики образуют дискретную последовательность, которая вызвана дискретностью звездообразования. Эти результаты и выводы были повторены спустя шесть-семь лет за рубежом в работах разных авторов. С них сейчас чаще всего и начинают хронологию новых представлений о структуре галактик и истории их формирования. Приведем только один пример. П. ван дер Круит в 1983 г. указывает: «Аналогичный разрыв (имеется в виду разрыв в характере распределения массы в подсистемах — А. С.) можно увидеть в обзорах (пространственного — А. С.) распределения и металличности звезд типа RR Лиры (Батлер и др., 1979, 1982) и субкарликов (Сэндидж, 1982)». И далее: «Ван дер Круит и Сирл (1982) приводят аргументы в пользу того, что эти две основные структурные компоненты (гало и диск — А. С.) свидетельствуют о двух дискретных эпохах звездообразования».

3. Звездные волны

Самое впечатляющее и завораживающее в галактиках — спиральная структура; по крайней мере это то, что мы видим глазом в телескопы и на фотографиях, это то, что вызывает в нас эстетические ощущения и переживания. Неудивительно, что спиральная структура стала первой проблемой (кстати, и сегодня полная загадка), над которой стали ломать голову астрономы.

Нам повезло в том, что наша Галактика также оказалась спиральной. Возможность наблюдать вблизи и даже «изнутри» спиральную структуру значительно способствовала уяснению природы этого удивительного явления.

С самого начала главная проблема состояла вот в чем. Галактики вращаются дифференциально, т. е. с разной угловой скоростью на разных расстояниях от центра. Если представить себе теперь спиральное сгущение звезд, газа и пыли, которое вращается вместе с диском галактики, то нетрудно увидеть, что пока внешняя часть спирали совершит один оборот (вместе с диском), внутренние успеют сделать несколько оборотов. Спираль сильно «закрутится» или «намотается», и начальное сгущение полностью «растается» таким дифференциальным вращением.

Попытки решить проблему выживаемости спиралей в условиях дифференциального вращения долгое время ни к чему не приводили. Лишь в середине 60-х годов дело

быстро двинулось вперед. Ц. Лин и Ф. Шу (США) разработали теорию, согласно которой спиральные ветви — это не постоянные сгущения, конгломераты одного и того же вещества, а звездные волны спиральной формы, которые бегут по вращающемуся диску галактики. То, что мы сейчас видим как спиральный рукав, это на самом деле область диска, куда подошел фронт волны, где вещество в данный момент уплотнилось. Через какое-то время максимум волны уйдет дальше, а здесь возникнет разрежение.

Вся соль идеи о звездных волнах заключается в том, что их распространение можно рассматривать как вращение спирального фронта вокруг центра галактики, причем с одинаковой на всех расстояниях угловой скоростью — несмотря на дифференциальное вращение звездного диска!

Любопытен механизм упругости звездного диска — ведь волны возникают и распространяются только в упругих средах. В обычной газе, где возможны звуковые волны, упругость обусловлена столкновениями частиц — атомов, молекул. В диске же звезды «чувствуют» только общее гравитационное поле, а друг с другом попарно не взаимодействуют — слишком далеки они друг от друга. Поэтому «столкновительная» упругость здесь невозможна. Упругость здесь связана с вращением, точнее, с действием кориолисовой силы. Когда мы в газе возбуждаем волну, возмущая его состояние, то возмущенная, «стронутая с места» частица не уйдет далеко — ее остановят столкновения, — и в этом лежит механизм упругости. Если мы во вращающемся диске проследим за «стронутой с места» звездой, то она тоже не уйдет далеко — под действием силы Кориолиса она станет вращаться вокруг начального положения. Здесь и лежит природа «кориолисовой» упругости.

В 1972 г. Л. С. Марочник, Ю. Н. Мишуров и автор разработали теорию волновой спиральной структуры, которая, в частности, предсказывала, что в нашей Галактике угловая скорость вращения волны Ω_p близка к скорости вращения $\Omega(R)$ звездного диска в окрестности Солнца, т. е. на расстоянии $R \approx 10$ кпк от центра: $\Omega_p \approx 20-25$ км/(с · кпк). Ранее Ц. Лин и Ф. Шу предложили другой вариант волновой модели спиральной структуры, в которой Ω_p в два раза меньше. Возникшая дилемма заключалась не только в том, какая модель на самом деле соответствует структуре нашей звездной системы (обе, кстати, одинаково хорошо описывают геометрическую форму спиралей в Галактике), но и в том, как из нескольких возможностей, предоставляемых теорией звездных волн, выбрать правильную. Неоднозначность же

теории обусловлена, в частности, неоднозначностью исходной модели основного состояния Галактики. Ведь Галактика сложна, состоит из нескольких подсистем, с которыми в теории «разделаться» совсем не просто.

Ответ можно было найти, определив скорость волны Ω_p , т. е. скорость вращения спирального узора; впрочем, параметр этот интересен и сам по себе, и его важно знать.

В 1976—1977 годах Е. Д. Павловская (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга), Ю. Н. Мишуров и автор в Ростовском университете определяли параметры спиральной структуры Галактики по данным о поле скоростей звезд в пределах до 5 кпк от Солнца. В числе параметров была и величина Ω_p . Она оказалась равной 23 ± 3 км/(с·кпк). Это совпадало с предсказанным нами ранее значением. Тем самым решался вопрос, какие подсистемы определяют свойства звездной волны в нашей Галактике и каковы параметры этих подсистем.

Но, возможно, более важным результатом этих исследований, как и некоторых более ранних работ других авторов, было другое. Как убедиться в том, что спиральная структура — действительно волновой процесс? Ведь период колебаний в звездной волне — не доли секунды, как в звуковой волне в воздухе, и даже не часы, не годы, а сто-двести миллионов лет! И для нас этот процесс — как бы застывший, мгновенный снимок волны. Как же установить, что здесь что-то колеблется? На самом деле надо вспомнить, что волна — это процесс не только во времени, но и в пространстве, что в волне параметры системы — плотность, гравитационное поле и, главное, скорость — должны иметь в пространстве периодическую структуру, причем ее геометрическая форма должна быть спиральной.

Оказалось, что поле скоростей звезд действительно имеет периодическую структуру спиральной формы; более того, она полностью соответствует структуре расположения спиральных рукавов в окрестности Солнца, обнаруженных еще в начале 50-х годов!

Поле скоростей дает решающий аргумент в пользу идеи о звездных волнах. Ни одна другая гипотеза о природе спиралей не предсказывает периодические изменения скорости в пространстве (и во времени), причем повторяющие форму спиральных ветвей, форму сгущений ярких звезд и газа. В последние годы, например, широко обсуждается идея о том, что видимая спиральная структура есть следствие «стохастического» звездообразования; предполагается, что достаточно большие области звездообразования, хао-

тически разбросанные по диску галактики, растягиваются дифференциальным вращением, образуя обрывки спиралей из молодых звезд и создавая в целом картину спиральности галактики. Однако этот процесс совершенно не затрагивает поле скоростей; здесь оно представляет собой чистое вращение вокруг центра галактики, как и в «довольной» концепции, когда спирали считали сгущениями звезд и газа, вращающимися вместе с диском галактики. Не объясняет такая теория и чисто газовые спиральные ветви, которые у многих галактик тянутся далеко за пределами звездного диска.

Впрочем, периодическое поле скоростей — не единственное доказательство существования звездных волн. Если такая волна движется по диску галактики со скоростью больше скорости звука в межзвездном газе, то в газе возникает ударная волна. Вот такие *галактические ударные волны* были обнаружены и в нашей, и в других галактиках. Они проявляются как узкие области сильно сжатого газа и пыли, тонкой спиралью протягивающиеся вдоль широкой звездной спиральной ветви. Во многих галактиках очень отчетливо видны эти узкие полосы пыли, а из области сильно сжатого газа идет мощное синхротронное радиоизлучение — ведь с газом сжимается и «вмороженное» в него магнитное поле вместе с космическими лучами, которые вызывают синхротронное радиоизлучение галактик. Из этих областей идет еще и сильное гамма-излучение, возникающее при столкновениях протонов космических лучей с протонами межзвездного водорода. Вместе с синхротронным излучением оно дало в последние годы ценную информацию о спиральной структуре нашей Галактики.

Галактические ударные волны выполняют одну важную функцию. Тепловые свойства межзвездной среды таковы, что при достаточно сильном сжатии в ней развивается тепловая неустойчивость, и среда «разваливается» на отдельные холодные, плотные облака. Эти облака превращаются в звезды, поэтому в галактической ударной волне идет интенсивное звездообразование. Оно объясняет, почему в спиральных ветвях большое количество молодых звезд.

Есть прямое доказательство того, что звездообразование действительно связано с галактической ударной волной. Непосредственно в области ударной волны мы должны видеть самые молодые звезды. За ней, в той массе, которая уже прошла через фронт волны, звезды успели постареть, их возраст должен быть больше. Чем дальше от фронта, тем старше должно быть звездное население. И такое рас-

пределение возрастов звезд по ширине спирального рукава (градиент возраста) действительно было обнаружено и в нашей, и в других галактиках!

Не слишком много в астрофизике теорий, даже среди общепризнанных, которые бы предсказали столь много подтвердившихся явлений — спиральное поле скоростей, градиент возрастов звезд, усиленное синхротронное и гамма-излучение и т. д. Поэтому несмотря на сложную видимую картину спиральной структуры галактик, несмотря на большие, не до конца решенные проблемы в теории, сегодня не остается сомнений в том, что главное в феномене спиральности галактик — звездные волны.

Глава 4

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Как стало особенно ясно в последние годы, химический состав галактик подобно зашифрованной летописи хранит почти всю историю жизни этих систем. Поэтому проблемы химического состава заняли чрезвычайно важное место в современных исследованиях. Вопрос о содержании химических элементов в галактиках очень непрост. Каким образом можно составить представление о химическом составе звездной системы, о его особенностях, о его связи с другими характеристиками системы? Для эллиптических галактик этот вопрос решается сейчас в основном двумя методами. Прежде всего, в спектрах звездных систем есть сильные линии поглощения кальция, магния, железа. Сравнивая интенсивности линий, можно судить об относительном содержании элементов в разных галактиках.

Другая возможность связана с тем, что основной вклад в излучение галактики дают красные гиганты, а цвет этих звезд зависит от содержания тяжелых элементов Z : чем больше Z , тем краснее звезды. Поэтому более красные цвета галактик обычно указывают на большую величину содержания тяжелых элементов, или металлов.

Несмотря на кажущуюся простоту, в обоих случаях, однако, есть «подводные камни», о которых стараются не забыть при анализе спектра или цвета галактики. Например, цвет зависит не только от Z , но и от возраста галактики. Более старые звезды имеют более красный цвет, поэтому, столкнувшись с красной галактикой, мы, вообще говоря, сразу не можем сказать, почему она такая: то ли

она слишком старая, то ли в ней очень много тяжелых элементов. Выход из этой ситуации обычно находят в предположении, что эллиптические галактики имеют примерно одинаковый (и притом очень большой) возраст, так что различия в их цвете все же обусловлены в основном различиями химического состава.

При изучении irregулярных галактик необходим другой подход. В этих системах, как правило, много газа и молодых ярких звезд, которые имеют сильное ультрафиолетовое излучение. Ультрафиолетовое излучение ионизует и нагревает газ, приводит к образованию светящихся облаков ионизованного газа, облаков HII. В их спектре наблюдаются эмиссионные линии кислорода, азота, гелия и других элементов, и по ним можно определить химический состав. В спектрах этих галактик есть, конечно, и звездные линии поглощения металлов; они также используются для анализа химического состава.

Наиболее сложная ситуация в спиральных галактиках. Здесь значительный, зачастую подавляющий вклад в излучение дают, как и в irregулярных галактиках, молодые яркие звезды ранних спектральных классов: в спиральных галактиках до сих пор продолжается звездообразование. Но подавляющая доля массы заключена не в этих звездах, а в старом звездном населении, примерно таком же, как в эллиптических галактиках. Цвет спиральной галактики зависит поэтому не от химического состава (и возраста), как у эллиптических систем, а от доли молодых голубых звезд: более красные системы имеют просто меньше молодых голубых звезд. Кроме того, в спиральных галактиках много пыли, и чем ее больше, тем краснее цвет; это обусловлено тем, что пыль сильнее поглощает излучение в голубой, коротковолновой части спектра. В результате цветковые характеристики спиральных галактик мало пригодны для анализа химического состава, и приходится обращаться к более трудоемкой работе — к получению и анализу спектров.

Исследования химического состава звездных систем выявили ряд интригующих загадок, причем у галактик разного типа свои тайны. Астрономы убеждены, что с ними связаны самые интимные моменты формирования и эволюции этих систем, самые глубокие вопросы происхождения химических элементов. Поэтому имеет смысл подробнее рассказать об особенностях галактик разных типов и о связи свойств химического состава галактик с их эволюцией.

1. Эллиптические галактики: зависимость химического состава от массы

У этих систем была обнаружена любопытная закономерность: чем больше светимость, чем ярче система, тем она краснее (рис. 21). Это свойство привело к открытию наиболее замечательной особенности химического состава Е-галактик. Поскольку для них более красный цвет означает большее содержание тяжелых элементов, а большая яркость — большую массу, то получается, что чем больше

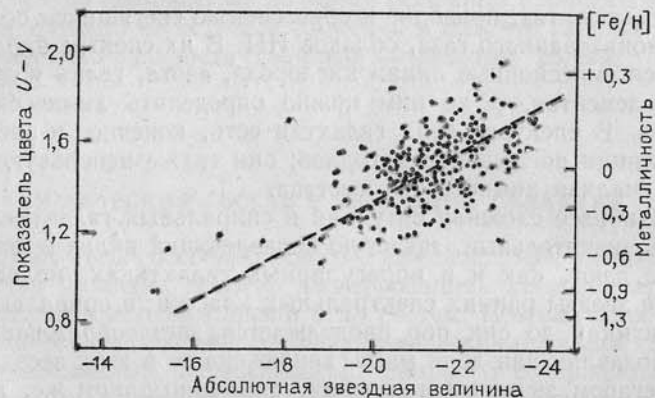


Рис. 21. Связь между цветом и яркостью (абсолютной звездной величиной) эллиптических галактик. Она отражает зависимость химического состава галактик (металличности) от их массы

масса галактики, тем больше в ней доля тяжелых элементов Z , тем больше металлов содержат звезды такой системы. Приблизительно эта зависимость имеет вид

$$Z \propto M^{0.4}.$$

Факт чрезвычайно любопытный: как звезда может «знать», какая масса у галактики, в которой она живет? Почему звезды «чувствуют» эту массу своим химическим составом?

Практически общепризнанный ответ на эти вопросы, который дал в середине 70-х годов английский астрофизик Р. Ларсон, вскрыл радикально новые, поражающие воображение обстоятельства ранней истории жизни галактик, истории, которая скрыта от нас толщей времен в миллиарды лет. И вот в чем она заключается.

На самых ранних этапах эволюции галактик, когда в них рождаются первые поколения звезд и взрываются первые поколения сверхновых, обогащая газ тяжелыми

элементами, происходит сильный разогрев и турбулизация газа вспышками сверхновых. В результате обогащенный металлами газ может оказаться выброшенным из родительской галактики. Если у галактики изначально мала масса, то у нее слабое гравитационное поле, и оно неспособно удерживать этот газ; он безвозвратно уходит в межгалактическое пространство. Поэтому в такой галактике останутся только первые поколения звезд, родившихся из вещества с малым содержанием тяжелых элементов до стадии сброса массы. В более массивных системах гравитационное поле сильнее, и оно удержало значительную часть вещества, обогащенного тяжелыми элементами. Из него и сформировалось затем богатое металлами звездное население галактик. Чем больше масса, тем большую долю такого вещества удерживала галактика, тем больше в ней оказывалась в итоге доля звезд с большим содержанием металлов; в гигантских системах они вообще доминируют, и на их фоне трудно обнаружить даже следы звезд первых поколений с дефицитом металлов, т. е. похожих на звезды карликовых галактик.

Таким образом, по-видимому, впервые вырисовалась картина потери массы рождающимися галактиками. Она представляет собой, по существу, грандиозную картину взрывов галактик. К ней мы еще неоднократно будем возвращаться, поскольку сейчас без нее невозможно объяснить огромное количество новых фактов, касающихся галактик и их скоплений, о которых мы узнали в недавнее время. А сейчас вернемся к зависимости между массой и химическим составом Е-галактик и рассмотрим еще один весьма многозначительный факт.

Подозревают, что в количественном отношении связь между массой и металличностью различна у эллиптических галактик двух типов: диффузных и «классических». По своей структуре эти галактики различаются тем, что у диффузных чем больше общая яркость, тем меньше яркость единицы поверхности — поверхностная яркость; обычно это карликовые галактики, например, спутники нашей звездной системы: NGC 185, галактики в созвездиях Скульптора, Дракона. У классических Е-галактик чем больше общая яркость, тем больше поверхностная (рис. 22). Такими системами являются гигантские эллиптические галактики, но есть среди них и карликовые, например, галактика М 32 — спутник туманности Андромеды. В целом все они отличаются от диффузных систем тем, что при одинаковой абсолютной звездной величине имеют более красный цвет.

Это означает, что при одинаковой массе «классические» Е-галактики содержат больше тяжелых элементов.

Этот факт чрезвычайно важен. Во-первых, он говорит в пользу картины «взрыва» галактик в результате энерговыделения при вспышках сверхновых первых поколений звезд. Действительно, при одинаковой массе гравитационное поле у более компактной системы сильнее; такая система удержит больше обогащенного вещества, следовательно,

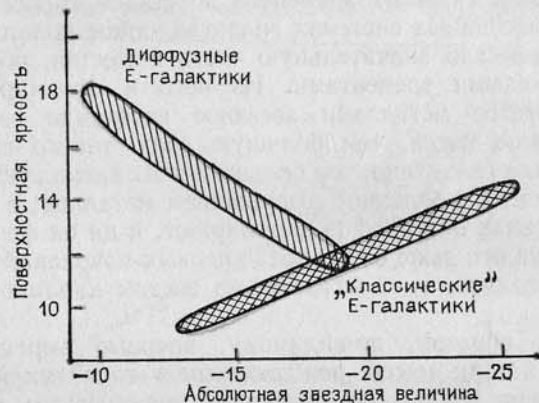


Рис. 22. Связь между поверхностной яркостью и абсолютной звездной величиной эллиптических галактик. Она выявляет два класса систем этого типа: «классические» и диффузные (по Дж. Галлагеру)

в ней образуется больше звезд с большим содержанием тяжелых элементов. Поэтому компактные, «классические» Е-галактики имеют больше металлов, чем диффузные с такой же массой. Во-вторых, возникает вопрос, почему вообще существуют два разных типа Е-галактик? Что обусловило различие в характере распределения массы, в характере распределения светящегося вещества в системах, которые в остальных отношениях вроде бы мало чем отличаются друг от друга? Вряд ли приходится сомневаться, что ответ на этот вопрос приоткроет новые, возможно, решающие детали процесса формирования галактик, прояснит роль скрытой массы в этом процессе и роль взаимодействия галактик друг с другом. Но пока вопрос открыт.

2. Химический состав и взрывы галактик

Если галактики на ранних стадиях эволюции взрывались и теряли массу, то нельзя ли оценить масштабы этого явления, величину массы, выброшенной из системы? Ока-

зывается, можно, если известно содержание тяжелых элементов. Пусть в среднем для звезд галактики эта величина равна Z_s , а вся масса звезд равна M_s . Если начальная масса протогалактического газового облака была M_0 , то можно довольно легко показать, что доля оставшейся в конечном итоге массы, т. е. величина M_s/M_0 , равна

$$\frac{M_s}{M_0} \approx \frac{Z_s}{y} \approx 25 Z_s.$$

Эта формула получается на основе представлений об обогащении системы тяжелыми элементами при взрывах сверхновых; она представляет собой важный результат теории химической эволюции галактик. Величина y , входящая в формулу, называется *эффективным выходом* тяжелых элементов, или просто металлов. Это есть отношение массы тяжелых элементов, выброшенных сверхновыми данного поколения звезд, к той части массы этого поколения, которая не участвует в обогащении (звезды, не становящиеся сверхновыми, и возможные компактные остатки самих сверхновых, например, нейтронные звезды). Если галактика удерживает всю начальную массу, то из определения величины y следует, что приблизительно средняя металличность галактики равна этой величине, т. е. $Z_s \approx y$ (наша формула согласуется с этим выводом: если $M_s = M_0$, то из этой формулы также следует $Z_s \approx y$). Есть основания думать, что более массивные галактики как раз и смогли сохранить всю свою начальную массу. Тогда по их металличности можно оценить эффективный выход металлов. Поскольку у самых массивных галактик $Z_s \approx 2Z_\odot$, а $Z_\odot \approx 0,02$, то $y \approx 0,04$ (отсюда и появился коэффициент 25 в приведенной выше формуле).

Теперь нетрудно вычислить, сколько массы потеряли разные галактики. У нашей звездной системы $Z_s \approx 0,8Z_\odot$, поэтому Галактика потеряла более половины своей начальной массы.

Ошеломляющий вывод получается для карликовых галактик, у которых металличность в десятки раз меньше солнечной. Если например, $Z_s = 0,0004$, т. е. если металличность в 50 раз меньше солнечной, то $M_s/M_0 \approx 0,1$. Это означает, что в такой галактике сохранилось лишь 10% начальной массы, а подавляющая часть, т. е. 90% массы, была безвозвратно потеряна!

Вывод о сбросе большого количества обогащенного металлами газа в межгалактическое пространство независимо вытекает из свойств горячего разреженного вещества в скоп-

лениях галактик, обнаруженного в 70-х годах космическими рентгеновскими обсерваториями. Об этом рассказано в гл. 7. А здесь мы еще расскажем, как данные о химическом составе галактик совершенно неожиданно дали ценнейшую информацию о связи «обычной» и «скрытой», или «темной» материи.

Если сопоставить формулы $Z_S \propto M_S^{0.4}$ и $M_S/M_0 \propto Z_S$, то, во-первых, получается, что $M_S/M_0 \propto M_S^{0.4}$. Другими словами, доля вещества, которая перешла в звезды, пропорциональна примерно корню квадратному из звездной массы галактики, а сама величина этой массы пропорциональна квадрату начальной массы газа протогалактики, точнее,

$$M_S \propto M_0^{5/3}.$$

Это уже вполне определенная количественная зависимость, которая должна найти объяснение в теории формирования и ранней эволюции галактик. А что можно сказать о скрытой массе системы M_V ? На первый взгляд разумно предположить, что при формировании галактик газовая масса протогалактики должна быть пропорциональна величине скрытой массы системы, т. е. $M_0 \propto M_V$. Тогда из $M_S \propto M_0^{5/3}$ следует, что $M_S \propto M_V^{5/3}$. В таком случае система, у которой в сто тысяч раз меньше звезд, чем, например, в нашей Галактике, будет иметь скрытую массу всего лишь в тысячу раз меньшую, чем в Галактике. Поэтому карликовая галактика в созвездии Льва, у которой $M_S \approx 10^6 M_\odot$, должна иметь скрытую массу $M_V \approx 10^9 M_\odot$, если в нашей Галактике $M_V \approx 10^{12} M_\odot$. Но это кажется маловероятным, а значит, по-видимому, неверно предположение, что пропорция «обычного» и «невидимого» вещества вначале одинакова у всех систем.

С другой стороны, сейчас все чаще повторяется заключение, что отношение «видимой» и «скрытой» масс и в спиральных, и в эллиптических галактиках и даже в целом у скоплений галактик близко к 10%, т. е. $M_V \approx 10 M_S$, $M_V/M_S \approx \text{const}$. Если это так, то из $M_S \propto M_0^{5/3}$ следует, что

$$\frac{M_0}{M_V} \propto M_V^{-0.4}.$$

Это очень любопытный результат. Он означает, что при формировании протогалактик из космологического субстрата смесь «обычного» и «темного» вещества, в разных масштабах оказалась неодинаковой: чем больше масштаб, чем больше величина M_V , тем меньше здесь доля обычного

вещества. Это тоже с первого взгляда кажется странным.

Истину еще предстоит установить. Возможно, она лежит посередине между рассмотренными вариантами. Но в любом случае она нетривиальна, в любом случае она становится серьезной проблемой для всех теорий происхождения и формирования галактик.

3. Эллиптические галактики: где старое население с дефицитом металлов?

Пример нашей Галактики и туманности Андромеды показывает, что в богатых металлами спиральных системах основная масса тяжелых элементов находится в ярком диске. Но при этом легко обнаруживается бедное металлами население, находящееся в сфероидальном гало: это в первую очередь шаровые скопления, в которых содержание тяжелых элементов Z примерно в сто раз меньше, чем у Солнца. Существование таких объектов оказалось чрезвычайно важным для понимания эволюции химического состава вещества галактик. Стало ясно, что тяжелые элементы, которые сейчас находятся в звездах диска, были «изготовлены» поколением звезд (точнее, сверхновыми этого поколения), которое имело в десятки раз меньшее содержание металлов.

Можно было ожидать, что в гигантских эллиптических галактиках, богатых металлами, к старому населению с дефицитом тяжелых элементов в первую очередь принадлежат, как и в нашей Галактике, шаровые скопления. И вдруг оказывается, что на самом деле шаровые скопления там имеют гораздо большую металличность, чем у нас! Даже максимально удаленные от центра галактики (т. е. там, где металличность должна быть наименьшей) скопления все же значительно краснее, следовательно, богаче металлами, чем в нашей Галактике; в галактике M 87 даже самые голубые скопления примерно в 10 раз богаче металлами, чем у нас. Но где тогда население, которое «изготовило» эти металлы? Куда девались звезды, аналогичные старым звездам нашей Галактики, звездам гало? Вопрос открыт. Он усугубляется тем, что вплоть до самых далеких окраин в гигантских эллиптических галактиках шаровые скопления имеют более голубой цвет, чем звезды поля. Это означает, что надежда найти среди звезд поля бедное металлами население (а оно должно иметь голубой цвет) также пока не оправдывается. Несомненно одно: количест-

во звезд с дефицитом металлов в этих системах невероятно мало по сравнению с числом звезд, имеющих нормальный химический состав.

4. Иррегулярные галактики: взрывы или «простая» модель?

Иррегулярные галактики имеют много газа и молодых звезд и характеризуются нерегулярным, часто клочковатым распределением яркости, чем являют прямую противоположность эллиптическим галактикам. Отличаются они и проблемами, которые возникают в связи с наблюдаемыми у них свойствами химического состава.

Поскольку в иррегулярных галактиках много газа, то можно изучить взаимосвязь химического состава с содержанием газа. Эта задача оказалась чрезвычайно интересной в связи с проблемой химической эволюции галактик в целом.

Все началось с *простой модели* химической эволюции. Если считать, что с самого начала газ в галактике превращается постепенно в звезды, не покидая ее и не притекая извне, и если обогащение тяжелыми элементами происходит при вспышках сверхновых, причем доля сверхновых в каждом поколении звезд одна и та же, то мы как раз и приходим к простой модели. Она предсказывает вполне определенную связь между содержанием тяжелых элементов в газе Z_g и содержанием газа $\mu_g = M_g/M$ (M_g — масса газа, M — масса галактики):

$$Z_g = y \ln(1/\mu_g)$$

(о параметре y см. с. 63). Одновременно эта модель предсказывает определенное соотношение между количеством звезд с разной металличностью.

Модель представлялась совершенно естественной, поэтому, когда в начале 60-х годов С. ван ден Берг (Канада), а затем М. Шмидт (США) обнаружили, что в нашей Галактике количество G-карликов с дефицитом металлов на самом деле во много раз меньше, чем предсказывает простая модель, это обстоятельство было расценено как удивительный парадокс.

Но можно обратиться к другим системам, и тут очень удобными оказались иррегулярные галактики. У них в широких пределах меняется значение μ_g , сравнительно хорошо определяется из наблюдений; так же довольно хорошо определяется величина Z_g (ее находят по спектрам

ярких зон HII, излучающих эмиссионные линии тяжелых элементов). Поэтому иррегулярные галактики идеальны для проверки закона $Z_g = y \ln(1/\mu_g)$, вытекающего из простой модели.

Любопытно, что возможность проверить этот закон для многих астрономов странным образом трансформировалась в убежденность, что найдены системы, где «работает» простая модель!

«Провал» простой модели химической эволюции, выжившийся в парадоксе дефицита малометаллических G-карликов, в аналогичном дефиците звезд с малым содержанием тяжелых элементов вообще в спиральных и гигантских эллиптических галактиках, в 70-х годах стал настоящим «скандалом», поскольку на самом деле он означал провал устоявшихся, общепринятых представлений о формировании и эволюции галактик (в «непростых» моделях уже отказываются от того, что газ не покидает или не втекает в галактику, что доля сверхновых среди звезд всех поколений была одинаковой и т. д.). Поэтому «открытие» систем, где простая модель верна, резко подняло общий интерес к изучению иррегулярных галактик. Это естественно для психологии исследователей, и «скандалы» в научной теории нередко привлекают внимание к какому-то направлению; часто это приводит к замечательным результатам. Так произошло и в данном случае.

Иррегулярные галактики, так же как эллиптические и спиральные, не подтвердили простую модель. Однако бурный «натиск» на эти системы дал много новых удивительных фактов, которые более чем компенсируют разочарование от очередной неудачи модели. Важным является уже сам по себе факт, что иррегулярные системы развиваются гораздо сложнее, чем это представлялось.

Справедливости ради надо отметить, что все же некоторая зависимость Z_g от μ_g прослеживается: бедные металлами системы имеют больше газа. Но в значительной степени это правило обусловлено просто селекцией, т. е. теми критериями, по которым галактики отбирались в программу наблюдений. Еще важнее то, что правилом являются скорее исключения из этого правила! В качестве примера часто приводят хорошо изученную галактику IZw 18; в ней содержание кислорода в десять раз меньше, чем предсказывает простая модель!

Если не от содержания газа, то от чего же зависит химический состав иррегулярных галактик? Или он вообще произволен? Оказывается, что галактика все же «знает», какой

должен быть у нее химический состав, и он не случаен. Его определяет масса галактики — так же, как и у эллиптических систем! Обнаружилось, что величина Z_g больше у более массивных систем, и эта связь выражена гораздо сильнее, чем связь между Z_g и содержанием газа μ_g . А раз так, то следует полагать, что эти системы, по-видимому, также теряли массу в процессе эволюции.

И еще о психологических мотивах в научных исследованиях. Хотя уже в начале 80-х годов было ясно, что связь между Z_g и μ_g плохая и, казалось бы, следует искать новые идеи в проблеме химического состава иррегулярных галактик, большинство астрономов продолжало связывать свои работы по химическому составу этих систем с проблемой простой модели химической эволюции, с соотношением между Z_g и μ_g . В то же время вызывающе яркая зависимость Z_g от массы галактики M почему-то не привлекала к себе внимания!

Американский астроном Б. Дж. Галлагер назвал этот факт «озадачивающим». По-видимому, объяснение состоит в том, что большую роль в науке играет мода, мода на те или иные идеи. Например, ясно, что если связать свое конкретное исследование с какой-то модной идеей, пусть даже неверной, но известной широкому кругу ученых, то можно надеяться, что работа привлечет внимание многих специалистов и конечные результаты работы станут широко известны. Если же идея малознакомая, то большинство людей не удосужится вникнуть в смысл полученных в работе фактов. О простой модели химической эволюции много писалось и говорилось, с ней связаны ясные физические представления, изящная математическая теория, поэтому она широко известна. У нее единственный недостаток — она не подтверждается наблюдениями (кстати, для астрономии он как раз и стал главным достоинством простой модели, так как именно он оказался главным катализатором идей в современных теориях эволюции химического состава галактик). В то же время картина потери массы галактиками, к которой приводит связь между массой и химическим составом, гораздо сложнее и пока неопределеннее как в астрофизическом, так и в математическом отношении, и потому вообще гораздо менее известна астрономам. В результате они реже задерживают свое внимание на фактах, которые важны для этой картины и на самом деле имеют фундаментальное значение для понимания формирования и эволюции галактик, эволюции их химического состава. Впрочем, сейчас здесь все становится на свои места.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ГАЗ

В 1978 г. на орбиту вокруг Земли была выведена космическая рентгеновская обсерватория «НЕАО-2», сокращенное название которой в переводе с английского означает астрофизическая обсерватория высоких энергий. Через год мир отмечал 100-летие со дня рождения А. Эйнштейна, и обсерватории дали его имя.

Она работала около двух лет — срок, ничтожный не только по меркам истории оптической астрономии, но даже по меркам истории радиоастрономии. Тем удивительнее, сколько ею сделано. По результативности она превзошла многие, даже крупнейшие наземные обсерватории, с их многолетним стажем работы, и ее данные на много лет стали источником мощного потока научных исследований.

Но главное, в общем-то, не в количестве информации. Рентгеновские телескопы, выносимые на ракетах за пределы атмосферы, открыли совершенно новый мир — мир вещества сверхвысоких температур и связанных с ним самых грандиозных в истории Вселенной процессов энерговыделения. Он столь неожиданно и столь стремительно ворвался в астрономию, что даже сейчас мы вряд ли до конца осознали все последствия его существования для наших представлений о том, как возник современный мир звезд и галактик.

Рентгеновская астрономия — это прежде всего высокие температуры и высокие энергии. Энергия квантов рентгеновского излучения в сотни и тысячи раз превосходит энергию привычных для астрономов квантов видимого света, поэтому и рождаться они могут только в высокоэнергичных процессах. При этом, если излучение возникает в результате столкновений заряженных частиц (так называемые тормозные процессы излучения), то должны быть велики скорости частиц. В газе, жидкости или твердом теле скорости частиц — атомов, молекул, ионов — определяют температуру, поэтому большие скорости означают высокую температуру.

Вообще, хорошо известно, что всякое тело с ненулевой температурой излучает кванты электромагнитного поля, причем их энергия в среднем тем выше, чем выше температура. При комнатных температурах тела излучают в основном инфракрасные кванты, поэтому инфракрасная астрономия — это в первую очередь астрономия сравнительно холодных тел. При температурах порядка нескольких ты-

сяч кельвинов максимальное количество квантов излучается в оптическом диапазоне спектра. Такие температуры имеют поверхности большинства наблюдаемых звезд, и оптическая астрономия — это астрономия звезд и звездных систем — галактик.

Аппаратура «Обсерватории им. Эйнштейна» регистрировала кванты с энергией в диапазоне 0,2—4 кэВ. Эта энергия соответствует температурам $T \approx 10^7$ К. Отсюда ясно, почему именно рентгеновская астрономия открыла нам совершенно неожиданный мир сверхгорячего вещества во Вселенной, вещества с температурой многие миллионы кельвинов.

Рентгеновская астрономия развивается поразительно быстро. С 1962 г., когда были проведены первые наблюдения рентгеновских источников, и до 1978 г., когда была запущена «Обсерватория им. Эйнштейна», чувствительность рентгеновских «телескопов» и разрешающая способность возросли настолько, что стали сравнимы с характеристиками, которые достигнуты в оптической и радиоастрономии (например, разрешающая способность аппаратуры этой обсерватории лучше 0,1 минуты дуги). Появилась возможность провести детальные спектральные измерения, из которых была получена информация о температуре, массе и химическом составе сверхгорячего газа, была изучена пространственная структура излучающих областей.

К числу важнейших результатов рентгеновской астрономии относятся три фундаментальных открытия: рентгеновского газа в скоплениях галактик, рентгеновских гало галактик и диффузного фона рентгеновских лучей. Несомненно, что с ними связаны наиболее существенные детали возникновения звездных галактик и скоплений, в них лежит ключ к ранней истории Вселенной.

1. Рентгеновский газ в скоплениях галактик

Еще в начале 70-х годов обсерватория «НЕАО-1» установила, что многие скопления галактик являются источниками рентгеновского излучения. Оно имеет диффузный характер, т. е. исходит из всей области скопления, а не из отдельной точки. Большое разрешение аппаратуры уже следующего поколения, установленного на «НЕАО-2», позволило в деталях вырисовать картину излучающей области (рис. 23). Были измерены также светимость, температура и химический состав многих скоплений.

Рентгеновская светимость в диапазоне энергий квантов $E_x = 0,5—3,0$ кэВ меняется у разных скоплений в пределах $L_x = 10^{42}—10^{45}$ эрг/с. Так, светимость центральной области

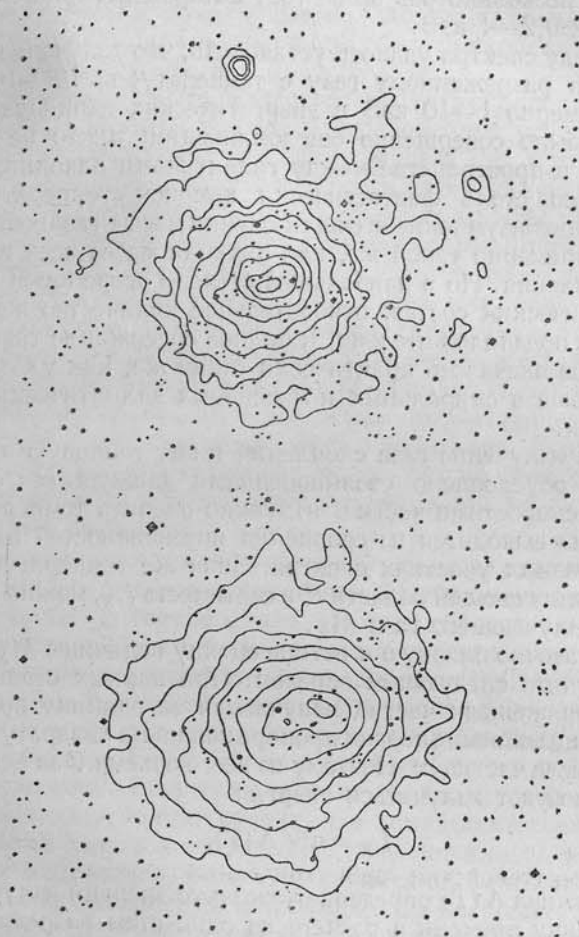


Рис. 23. Картина рентгеновского излучения двух скоплений галактик, A 2255 (вверху) и A 2256 (внизу), по данным рентгеновской орбитальной «Обсерватории им. Эйнштейна». На рисунке приведены линии одинаковой интенсивности излучения, наложенные на оптические фотографии скоплений

с $R = 0,5$ Мпк у скопления Кома (Волосы Вероники) составляет $L_x = 2,5 \cdot 10^{44}$ эрг/с, у A 2255 $L_x = 2,6 \cdot 10^{44}$ эрг/с; полная же светимость ближайшего к нам скопления

Девы в диапазоне 2—10 кэВ равна $3 \cdot 10^{43}$ эрг/с. У большинства скоплений основная доля излучения приходится на диапазон энергий квантов 5—8 кэВ, поэтому полная величина L_X в несколько раз выше той, которая измеряется при энергиях 0,2—4 кэВ.

По виду спектра удалось установить, что излучение принадлежит разреженному газу с температурой 10^7 — 10^8 К, или примерно 1—10 кэВ в энергетических единицах. Открытие было совершенно ошеломляющим: никто не ожидал, что в пространстве между галактиками находится вещество со столь фантастически высокой температурой. Не меньшее изумление вызвали оценки массы газа: она оказалась примерно такой же, как видимая масса всех галактик скопления. Но в наибольшей степени астрономов поразила химический состав: относительное количество железа, а с ним, предположительно, и полное содержание тяжелых элементов оказалось практически таким же, как у Солнца, как вообще в спиральных и массивных эллиптических галактиках.

Если излучение газа скоплений имеет тепловую природу, т. е. обусловлено столкновениями движущихся с тепловыми скоростями частиц, то можно оценить температуру газа. Она выводится из сравнения интенсивностей излучения в разных участках спектра. Зная же температуру T , размер излучающей области R и светимость L_X , можно найти массу излучающего газа M_X .

Достаточно близкую к истине оценку величины M_X можно получить следующим образом. При парных столкновениях заряженных частиц излучаемая за единицу времени из единицы объема энергия пропорциональна квадрату плотности числа частиц n^2 . Поэтому из всего объема V за единицу времени будет излучаться энергия

$$L_X = n^2 V \Lambda(T),$$

где величина $\Lambda(T)$ определяет, сколько энергии излучается за единицу времени в расчете на один атом разреженного газа. Расчеты показывают, что при температуре $T > 10^7$ К $\Lambda(T) \approx 2 \cdot 10^{-27} T^{1/2}$ (эрг·см³)/с. Поскольку полная масса ионизованного газа в объеме V равна $M_X = \frac{1}{2} n V m_H$, где m_H — масса атома водорода (газ состоит в основном из водорода), то из формулы для L_X следует:

$$M_X \approx m_H \left(\frac{\pi R^3}{3} \frac{L_X}{\Lambda(T)} \right)^{1/2}$$

(считается, что $V = \frac{4}{3} \pi R^3$, а $n = n_e + n_p$, где n_e — плотность числа электронов, n_p — протонов). Если подставить в эту формулу $L_X = 10^{45}$ эрг/с, $T = 10^8$ К, то для $R = 0,5$ Мпк получим $M_X = 8 \cdot 10^{13} M_\odot$. Примерно такое значение массы газа и было найдено для центральной области скопления Кома, у которого $T \approx 8 \cdot 10^7$ К.

Химический состав рентгеновского газа скоплений оказался возможным определить благодаря тому, что в спектре излучения обнаружились линии железа Fe, кремния Si, серы S, магния Mg. Разумеется, речь идет не о нейтральных атомах этих элементов и не об обычных спектральных линиях, к которым привыкли спектроскописты-оптики. При температурах $T \approx 10^7$ — 10^8 К скорости теплового движения частиц столь велики, что при их столкновениях даже у столь тяжелых атомов, как железо, срываются почти все электроны: из 26 своих электронов атомы железа в этих условиях удерживают в основном один-два самых близких к ядру электрона. Поэтому здесь атомы существуют в состоянии крайне высокой степени ионизации. Возбужденные ионы достаточно тяжелых атомов излучают высокоэнергетичные кванты, которые дают спектральные линии в рентгеновском диапазоне.

Линии в рентгеновском спектре скоплений галактик явились главным доказательством того, что излучение возникает в чрезвычайно горячей газе и имеет тепловую природу.

По этим линиям и было установлено содержание железа по отношению к водороду, т. е. значение $[Fe/H]$. Конечно, это удалось сделать не для всех объектов: из более чем сотни скоплений, для которых получены рентгеновские данные, значения $[Fe/H]$ сейчас известны только у двух десятков скоплений. Еще хуже обстоит дело с другими элементами. Поэтому, когда говорят, что химический состав газа скоплений близок к солнечному, то имеют в виду, конечно, только содержание железа (у скопления A 576 измерены также содержания серы и кремния). Но поскольку относительное содержание разных элементов вряд ли существенно отличается от солнечного (в пользу этого говорят результаты определения химического состава самых разных звезд, туманностей, галактик), то считается, что общее содержание тяжелых элементов в газе скоплений практически нормальное, т. е. близкое к солнечному.

Свойства рентгеновского газа в скоплениях галактик сильно озадачили астрономов. Откуда взялись тяжелые элементы в межгалактическом пространстве скоплений и

почему их содержание близко к солнечному? Какие процессы нагрели газ до температур в десятки миллионов кельвинов? Откуда взялась невероятно огромная энергия, которая сейчас заключена в форме тепловой энергии рентгеновского газа? Откуда, наконец, взялся сам газ, причем в столь больших количествах?

И вот такая картина стала постепенно вырисовываться. Ключевым оказалось содержание железа в рентгеновском газе скоплений: поскольку тяжелые элементы создаются сверхновыми звездами, а звезды находятся в галактиках, то неизбежен вывод, что железо вместе с горячим газом попало в межгалактическую среду из галактик. Возник ряд представлений о том, как это могло произойти. Согласно одной из гипотез, это может быть связано с «галактическим ветром» — истечением раскаленного разреженного вещества из галактик, аналогично солнечному и звездному ветру. Привлекались и внешние причины, которые могут приводить к удалению газа из галактик. С ними связаны механизмы «обдирания» и «выметания» газа из галактик при их взаимодействиях друг с другом и с межгалактической средой. Предполагается, например, что, двигаясь со скоростями сотни километров в секунду внутри скопления, галактики (а точнее, их газовая компонента) испытывают большой динамический напор со стороны межгалактической среды, которая, таким образом, выметает из них газ.

Но объяснить сразу всю совокупность свойств газа скоплений оказалось не так-то просто. Ведь надо понять не только, как железо попало из галактики в межгалактическое пространство, но и почему химический состав газа оказался примерно таким же, как у обычных звезд, с нормальным содержанием тяжелых элементов; надо объяснить не просто сам факт существования железа между галактиками, но и почему его там примерно столько же, сколько в галактиках (где, кстати, оно почти все заключено в звездах, а не в газе, поскольку сейчас масса газа в галактиках вообще ничтожно мала); надо объяснить, почему доля массы железа в газе скоплений, т. е. величина $Z_{\text{Fe}} = M_{\text{Fe}}/M_X$, на удивление одинакова в самых разных, совершенно непохожих друг на друга скоплениях: $Z_{\text{Fe}} \approx 0,5 Z_{\text{Fe} \odot}$; надо объяснить, почему полная масса железа в скоплениях зависит довольно неожиданным образом от числа галактик N_0 в их центрах (например, в пределах $0,5 \text{ Мпк}$): $M_{\text{Fe}} \propto N_0^{2,4}$ (а не $M_{\text{Fe}} \propto N_0$, как это можно было бы ожидать).

В результате многие исследователи пришли к выводу, что горячий газ скоплений, если и не полностью, то в значитель-

ной степени возник в галактиках и был выброшен оттуда под действием внутренних причин. Французский астроном Л. Вигру в 1977 г. отмечал, что «механизм обдирания» не может объяснить существование всего галактического газа, он не может дать достаточно газа, чтобы заполнить межгалактическую среду. Поскольку масса газа скоплений сравнима с суммарной массой галактик, то образование газа происходило на самых ранних стадиях формирования галактик, когда большая часть их начальной массы была в газовой, не в звездной форме. Л. Вигру заключил, что обогащенный железом газ должен был сформироваться во время или сразу же после формирования галактик, иначе доля массы газа слишком мала, чтобы объяснить газ в скоплениях (имеется в виду, что после образования звездной галактики в ней остается крайне мало газа).

Но если рентгеновский газ скоплений формировался одновременно с рождением самих галактик, то он не мог появиться в межгалактическом пространстве путем «испарения» горячего газа или как следствие гипотетического галактического ветра. Оба процесса обычно связываются с нормальной эволюцией известного нам звездного населения, и их эффект накапливается в течение всей жизни галактик. На самом деле все произошло очень быстро, по-видимому, в первые сотни миллионов или около миллиарда лет, и этот процесс имел отнюдь не спокойный, эволюционный характер. Американский астрофизик Д. Де Янг в 1978 г. показал, что галактический ветер может объяснить только 10% всей массы рентгеновского газа скоплений, тогда как по его оценкам галактики дали около 50% (другая половина массы газа в этом случае представляет собой остатки первичного вещества Вселенной, не вошедшего при формировании скоплений в галактики). Поэтому он пришел к выводу, что газ в галактиках был сильно нагрет вспышками сверхновых и выброшен в межгалактическое пространство в течение $3 \cdot 10^8$ — $3 \cdot 10^9$ лет.

Исследования, проведенные с помощью «Обсерватории им. Эйнштейна», говорят о том, что рентгеновские свойства далеких скоплений галактик, таких как 3С 295 с красным смещением $z=0,46$, или Cl 0016+16 ($z=0,54$), не особенно отличаются от свойств близких скоплений. Мы видим эти скопления (5—8) $\cdot 10^9$ лет в прошлом. Это означает, что рентгеновский газ скоплений был создан раньше, чем пять миллиардов лет назад, и с тех пор его свойства практически не изменились, следовательно, его происхождение нужно отнести к эпохе формирования галактик. В этом нас убе-

ждает еще один наблюдательный факт, который говорит о том, что галактики теряли массу не в виде галактического ветра, что вообще процесс потери массы не был длительным явлением; этот процесс был быстрым и обусловлен он внутренними причинами.

Речь идет о зависимости между массой и содержанием тяжелых элементов в галактиках: $Z \propto M^{0.4}$. В гл. 4 мы уже видели, как из этой зависимости вытекает, что нынешние карликовые галактики, с содержанием тяжелых элементов $Z = (0,1-0,01) Z_{\odot}$, потеряли до 90—99% начальной массы. Очевидно: сброшенное вещество не могло быть звездным ветром или раскаленным газом, выброшенным сверхновыми (т. е. тем, с чем связывают обычно гипотетический галактический ветер). Ведь не может же масса такого галактического ветра в десятки раз превосходить массу самих звезд! Далее, процесс потери массы не мог быть длительным, спокойным явлением, потому что у звезд галактики крайне мала энергия, чтобы, например, поддерживать температуру газа на уровне, при котором каждый миллиард лет из галактики улечивалась бы, «испарялась» масса, равная массе всех ее звезд, а то и больше. Поэтому, независимо от свойств горячей межгалактической среды и самого факта ее существования, нет сомнений в том, что галактики в огромных количествах и в течение очень короткого времени, т. е. взрывообразно, сбрасывали газ в межгалактическое пространство. Рассмотрим, как это могло происходить.

2. Происхождение рентгеновского газа: взрывы галактик?

Еще в 60-х годах высказывалась мысль, что основная масса тяжелых элементов в галактиках была создана в очень короткое время, в первые сотни миллионов лет их жизни. Был ряд причин так думать, но в целом эта идея как-то никого всерьез не задевала. Поэтому в то время никто не стал основательно разбираться, к каким следствиям она приводит.

Открытие поразившего всех факта существования сверхгорячего вещества с нормальным химическим составом изменило ситуацию. Вспомнили о быстром раннем синтезе тяжелых элементов в галактиках, и оказалось, что этот процесс должен быть сам по себе крайне необычным. Он сопровождается столь быстрым и столь большим выделением энергии, что галактика должна взорваться.

Вывод о том, что молодые галактики должны взрываться, в середине 70-х годов опубликовали Шварц и Яхил в США и автор с коллегами у нас в стране.

Астрономы не перестают изумляться грандиозности взрыва сверхновых звезд; что же говорить о взрыве галактики, при котором выделяется столько энергии, сколько при взрыве миллиардов сверхновых!

А в том, что это действительно так, убедиться совсем нетрудно. Возьмем, к примеру, галактику с массой $M = 10^{11} M_{\odot}$. Типичное содержание тяжелых элементов в такой галактике $Z \approx 0,01$, масса этих элементов $M_Z = MZ \approx 10^9 M_{\odot}$. Создаются они сверхновыми; массы сверхновых составляют около $10 M_{\odot}$, и если 10% этой массы превращается в тяжелые элементы, то нужно 10^9 сверхновых, чтобы объяснить полученное выше значение $M_Z = 10^9 M_{\odot}$.

Принято считать, что в среднем энергия взрыва одной сверхновой $E_{SN} \approx 10^{51}$ эрг, поэтому 10^9 взрывающихся звезд дадут 10^{60} эрг. Если эта энергия выделяется в галактике в течение всего лишь сотен миллионов лет, то она не успевает «спокойно» уйти за ее пределы. Известно, что у сверхновых большая часть наблюдаемой энергии взрыва заключена в ударной волне. Эта волна, распространяясь по газу галактики, нагревает его. Если взрывы происходят достаточно часто, то нагретый газ не успевает остывать, и вся масса газа приобретает высокую температуру. Ее можно оценить, используя обычную связь между внутренней энергией идеального газа, его температурой и массой:

$$E = \frac{3}{2} kT \frac{M_g}{\mu m_H},$$

где, как обычно, μ — молекулярная масса, m_H — масса атома водорода, k — постоянная Больцмана. Подставив $M_g = 2 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, $E = 10^{60}$ эрг, $\mu = 0,6$, получим $T \approx 10^7$ К.

Здесь мы учли, что при $T \approx 10^7$ К газ, состоящий в основном из водорода и гелия, полностью ионизован, поэтому его молекулярная масса $\mu = 0,6$ примерно в два раза меньше, чем в нейтральном состоянии.

Другой метод оценки энергии сверхновых в галактике состоит в том, что мы просто подсчитываем, сколько энергии E выделяется при синтезе ядер тяжелых элементов. Расчеты показывают, что $E \approx 7 \cdot 10^{-3} M_Z c^2$ эрг, где c — скорость света в единицах — сантиметры в секунду. Для $M_Z = 10^9 M_{\odot}$ отсюда найдем $E \approx 1,3 \cdot 10^{61}$ эрг. Это на порядок больше того, что дала предыдущая оценка, так что там мы недооценили или количество сверхновых, необходимых для

создания массы $M_z = 10^6 M_\odot$, или среднюю энергию одной сверхновой, или то и другое вместе. Этой энергии хватит, чтобы нагреть массу газа $M_g = 2 \cdot 10^{11} M_\odot$ до температуры $T \approx 10^8$ К.

Но энергия синтеза элементов — это не единственно возможный источник энергии взрыва сверхновой. После взрыва сверхновой остается центральное ядро, правда, может быть, не во всех случаях. Эти ядра мы наблюдаем в виде пульсаров — нейтронных звезд — чрезвычайно плотных, компактных объектов с радиусом $R \approx 10$ км и массой $M \approx 2 M_\odot$. При сжатии такой массы до столь ничтожных размеров выделяется огромное количество гравитационной энергии. Ее можно оценить по формуле

$$E = |U| \approx \frac{GM^2}{R}.$$

Подставив сюда $M = 2 M_\odot$, $R = 10$ км, получаем $E = 10^{54}$ эрг, т. е. на три порядка больше, чем принятая нами величина — средняя энергия сверхновой.

Конечно, не вся энергия, освобождающаяся при взрыве сверхновой, переходит в энергию ударной волны и далее в тепловую энергию газа в галактике. Как показывает теория процессов, происходящих во время этого чрезвычайно сложного явления, большая часть энергии уносится в виде нейтринного излучения. Независимо от этого наблюдаемая энергия ударных волн, как следует из приведенных оценок, вполне достаточна для нагрева гигантской массы газа, $M \approx 10^{11} M_\odot$, до температур $T \approx 10^7 - 10^8$ К.

Такой нагрев скорее всего действительно происходил на ранних стадиях эволюции галактик. В это время большая часть их массы представляет собой газ начального протогалактического облака (но уже обогащенного тяжелыми элементами), и лишь незначительная доля массы облака успела к этому моменту перейти в звезды. Поэтому можно говорить о нагреве протогалактики первыми поколениями звезд.

Что же происходит с протогалактикой, когда температура газа поднялась до десятков миллионов кельвинов? Подробнее об этом рассказано в гл. 11, а здесь рассмотрим лишь те моменты, которые относятся к происхождению газа в скоплениях. При $T \approx 10^7 - 10^8$ К протогалактика становится «горячей», ее внутренняя (тепловая) энергия во много раз превосходит гравитационную энергию связи. Происходит взрыв протогалактики; если до этой стадии она сжималась, то теперь газ с огромной скоростью, до нескольких

сотен километров в секунду, начинает разлетаться, уходя далеко за пределы системы, — так в межгалактическом пространстве появляется разреженное горячее вещество с нормальным химическим составом.

Расчеты показывают, что в этой картине внутренние части разлетающегося облака постепенно тормозятся в гравитационном поле галактики и наконец снова начинают двигаться к центру. Из этого газа, обогащенного тяжелыми элементами, и образуется новое поколение звезд, с нормальным химическим составом. Внешние части облака безвозвратно уходят в межгалактическое пространство. Это объясняет, почему химический состав звезд в гигантских галактиках и рентгеновского газа в скоплениях практически одинаков. А гигантские галактики мы отметили потому, что только они способны удержать заметную часть газа горячей протогалактики и превратить его в звезды. В карликовых галактиках гравитационное поле настолько слабо, что горячий газ практически полностью теряется, и в этих системах остается только малочисленное первое поколение звезд с дефицитом тяжелых элементов, как у звезд гало нашей Галактики.

И еще одно обстоятельство небезынтересно отметить. Обогащение газа при вспышках сверхновых первого поколения звезд, вероятно, происходит сразу во всем огромном объеме протогалактики, вплоть до расстояний в десятки килопарсек от центра. Действительно, если бы сверхновые взрывались только в центральной части галактики, то ударная волна, идущая от нагретого в центре газа, может быть, и смогла бы прогреть весь газ протогалактики до высоких температур; но при этом тяжелые элементы остались бы в центре и не попали бы в межгалактическую среду! Из галактики ушли бы только внешние слои газа, не содержащие тяжелых элементов, и тогда непонятно, почему на самом деле химический состав звезд и рентгеновского газа почти одинаков.

Так свойства горячей межгалактической среды совершенно неожиданно для нас приоткрыли завесу времени над самыми сокровенными тайнами рождения галактик. Правильно ли мы понимаем открывающуюся картину? Чтобы ответить со всей определенностью на этот вопрос, нужны новые наблюдения, которые могли бы подтвердить данные о свойствах межгалактической среды и дать дополнительную информацию о ней.

Есть надежда, что все это в недалеком будущем обеспечат рентгеновские обсерватории нового поколения, созда-

ваемые как у нас в стране, так и за рубежом. Много фактического материала о рождении и ранней эволюции галактик даст, несомненно, изучение галактик «на краю» Вселенной, галактик с красным смещением $z > 1$, до которых астрономы только что «добрались».

Обратимся к энергии рентгеновского газа. Ее вполне можно объяснить энергией синтеза тяжелых элементов в галактиках скопления. Но механизм передачи энергии из галактик в межгалактическую среду объяснить не так-то просто.

Есть другая возможность. Температура газа в скоплениях близка к вириальной, т. е. почти совпадает с температурой газа, находящегося в равновесии в гравитационном поле скопления. Это наталкивает на мысль, что газ нагрелся, сжимаясь в этом поле. При этом, конечно, он должен быть с самого начала более или менее однородно распределен по объему скопления; если же он находится в холодных, плотных облаках, то подобный механизм «не сработает». Сбрасываемое при взрывах галактик вещество, по всей видимости, вполне может нагреться таким механизмом. Расчеты показали, что даже «холодный» газ, с температурой $T \approx 10^5$ К и ниже, за время порядка нескольких миллиардов лет приобретает вириальную температуру $T \approx 10^8$ К (для моделей типичных скоплений), и устанавливается квазистационарное состояние.

Интересно рассмотреть роль квазаров в этой проблеме: не могли ли они быть главным источником нагрева газа в скоплениях галактик? Квазары являются самыми мощными генераторами энергии во Вселенной, поэтому естественно возникает мысль, что в эпоху формирования галактик и их скоплений, которая одновременно была эпохой мощных квазаров, эти объекты могли передать большое количество энергии газу в галактиках и скоплениях и нагреть его до температур 10^7 — 10^8 К.

Сейчас есть все основания считать, что на самом деле это не так. Против этой идеи говорят, в частности, энергетические оценки. Число достаточно мощных квазаров, скажем, со светимостью $L \geq 10^{46}$ эрг/с, не превышает и 1% от числа гигантских галактик. Согласно результатам Барбары Гэстон из Пенсильванского университета, таких квазаров меньше, чем галактик, даже на три — три с половиной порядка, т. е. их существенно меньше, чем сейчас галактик с активными ядрами. Поэтому, например, в скоплении Кома, где находится несколько сотен гигантских галактик (кстати, среди них не известна ни одна с активным ядром), в

лучшем случае могло быть несколько квазаров, если они существуют $\sim 10^9$ лет, и порядка сотни, если время существования у них близко к 10^7 лет. В любом случае за характерное время квазарной эпохи $t_{eq} \approx 10^9$ лет (см. гл. 9) энергия излучения квазаров составит около $3 \cdot 10^{62}$ эрг. Даже если бы вся она перешла в энергию газа скопления, все равно ее не хватает, чтобы объяснить энергию рентгеновского газа в скоплении Кома, $E_X \approx 5 \cdot 10^{63}$ эрг.

При этом, согласно оценкам Гэстон, велика вероятность, что в скоплении вообще не было ни одного квазара — а ведь Кома относится к числу скоплений, экстремально богатых галактиками. Бедные же скопления, где тем не менее наблюдается рентгеновский газ, в большинстве случаев почти наверняка не имели в своем составе квазаров.

3. Рентгеновские короны галактик

Источниками рентгеновского излучения оказались не только скопления, но и отдельные галактики. Наиболее сильно оно проявляется у галактик с активными ядрами — у сейфертовских и у радиогалактик. Эти системы имеют, как правило, мощные центральные источники излучения. Но наряду с рентгеновским потоком из ядра у некоторых галактик было обнаружено сильное диффузное излучение, которое исходит из области с размерами во много раз больше видимых, звездных размеров этих систем (рис. 24). Анализ спектра показал, что это излучение имеет тепловую природу и обусловлено горячим газом с температурой $T \approx 10^7$ К. Таким образом, оказалось, что многие галактики находятся в центре гигантского разреженного раскаленного газового шара, температура которого сравнима и даже превышает температуру недр Солнца! Его называют рентгеновской (или просто горячей) короной галактики или рентгеновским гало.

Одна из наиболее ярких рентгеновских галактик — центральная система в скоплении Девы, галактика М 87. Это самая массивная из хорошо изученных галактик, ее звездная масса равна $M_s \approx 10^{12} M_\odot$. И такую же массу имеет рентгеновский газ! Он укутывает эту галактику толстой оболочкой радиусом примерно 200 кпк. Температура во всем огромном объеме оболочки меняется мало: ближе к центру, в области, где находится сама галактика, $T \approx 10^7$ К; на окраине она, по-видимому, раза в два выше.

М 87 относится к числу сверхгигантских галактик, находящихся в привилегированном положении: они всегда в центре скопления. Но в 1985 г. У. Форман, Дж. Джоунз и У. Такер в Гарвардском астрофизическом центре, расшифровав данные «Обсерватории им. Эйнштейна» о более чем полусотне галактик, показали, что рентгеновские



Рис. 24. Горячие короны галактик М 86 и М 84 по данным «Обсерватории им. Эйнштейна». На рисунке линии одинаковой интенсивности рентгеновского излучения корон наложены на оптические фотографии галактик

короны обычны и для менее массивных, «ординарных» гигантских галактик со звездной массой порядка $10^{11} M_{\odot}$, т. е. примерно такой, как у Млечного Пути. Похоже, что короны связаны в основном с эллиптическими галактиками, хотя среди исследованных галактик есть несколько спиральных типа Sa с заметной рентгеновской светимостью.

Величина L_X у этих систем равна $10^{39}—10^{41}$ эрг/с. Здесь обнаруживается любопытная закономерность: чем больше оптическая светимость галактики, тем больше ее рентгеновская светимость, но зависимость эта не линейная, а квадратичная:

$$L_X \propto L_B^2$$

(L_B — светимость в голубом участке спектра, в цвете В). Это чрезвычайно важный факт, который несомненно подсказывает нам, как и почему возникли горячие короны. Он совершенно недвусмысленно говорит о том, что количество рентгеновского газа в галактике связано с ее массой.

А реагирует ли температура газа на свойства галактики? Ответить на это пока трудно, и скорее обращает на себя внимание не различие, а близость значений температуры у заметно различающихся систем: температура практически не выходит за пределы интервала $T=5 \cdot 10^6—2 \cdot 10^7$ К.

Обратимся снова к массам рентгеновских корон и их связи с массами галактик. Для систем со звездной массой $M_S \approx 10^{11} M_{\odot}$ масса короны в десятки раз меньше, чем M_S , и равна $M_X \approx 10^9—10^{10} M_{\odot}$. У галактики М 87, как уже говорилось, эти массы одинаковы. У карликовых эллиптических галактик сколь-нибудь заметных корон вообще нет.

Что определяет эти закономерности: галактический ветер, который, как предполагают некоторые астрофизики, порождает короны? Или гравитационное поле звездной системы, удерживающее существующий с момента формирования галактик горячий газ? У. Форман и его коллеги показали, что галактический ветер, представляющий собой сброшенное звездами (в том числе сверхновыми) раскаленное вещество, свободно уходящее из галактики, не может объяснить свойства корон; он давал бы линейную, а не квадратичную зависимость L_X от L_B . А вот если это вещество удерживается системой и накапливается в ней, то за время существования галактики оно может образовать корону с наблюдаемыми свойствами. Эти авторы также считают, что короны вообще могли образовываться в самом начале эволюции галактик и сохранились до наших дней. Если доля массы горячего газа, которую удерживает гравитационное поле галактики, пропорциональна звездной массе систем, то получается зависимость $L_X \propto L_B^2$.

Здесь мы подошли, может быть, к самому любопытному моменту в этой истории. Вывод о том, что рентгеновский газ в эллиптических галактиках удерживается гравитационным полем, означает, что у этих систем должна быть еще одна компонента, и при том по массе самая главная! Конечно же, речь опять идет о скрытой, невидимой массе. Но подробнее об этом — в следующей главе.

4. Загадка диффузного фона рентгеновских лучей

В ряду сенсационных открытий рентгеновской астрономии отдельно стоит выделить открытие фонового излучения. Этот поток рентгеновских квантов, равномерно льющийся со всех сторон небесной сферы, был обнаружен в начале 60-х годов, при первых рентгеновских наблюдениях, выполненных на ракетах за пределами атмосферы. По мере накопления данных все более утверждалась точка зрения, согласно которой спектр этого излучения в области энергий 2—50 кэВ является тепловым, характерным для газа с температурой $(5-8) \cdot 10^8$ К; в области больших энергий он имеет скорее степенной вид и обусловлен, по-видимому, нетепловыми процессами.

Тепловой рентгеновский фон до сих пор представляет собой интригующую загадку. В течение долгого времени после его открытия жила идея, что мы видим суммарный поток от большого числа далеких и потому невидимых дискретных источников, в первую очередь квазаров и ядер сейфертовских галактик. Предполагается, что даже в чрезвычайно малых площадках небесной сферы находится столь большое число невероятно удаленных объектов такого рода, что их излучение практически неразделимо и воспринимается нами как однородное излучение всей небесной сферы.

Но к концу 70-х годов, когда появилась детальная информация как о спектре самого фонового излучения, так и о спектрах квазаров, стало очевидно, что гипотеза о фоне далеких, неразрешимых на отдельные источники квазаров и аналогичных объектов сталкивается с большими трудностями. Прежде всего сразу были исключены скопления типа тех, которые мы наблюдаем в достижимой для нас пространственно-временной окрестности Вселенной: они слишком «холодные», их температура почти на порядок меньше температуры фонового излучения, и кроме того, они слишком редки, чтобы создать видимость сплошного фона. Редки во Вселенной и лацертиды, причем их количество, если «уходить» в прошлое, не растет так быстро, как число квазаров. Сейфертовские галактики не подходят из-за вида спектра; он у них слишком «мягкий», т. е. интенсивность излучения падает с увеличением энергии квантов намного быстрее, чем в спектре фонового излучения. Та же проблема возникает с квазарами, не излучающими заметно в радиодиапазоне («радиотихие» квазары). Эти объекты, составляющие более 90% всех квазаров, имеют рентгеновские спектры, которые, вероятно, похожи на спектры сейфер-

товских галактик. Квазары с сильным радиоизлучением, типа знаменитого 3С 273, имеют более подходящий спектр, и если считать, что их в прошлом было достаточно много, они могли бы объяснить рентгеновский фон. Но такие квазары, как это обнаружилось на примере опять же 3С 273, излучают одновременно много гамма-квантов. По наблюдаемому фону гамма-излучения нетрудно оценить количество этих объектов, а затем легко можно вычислить, сколько энергии они излучают в рентгеновском диапазоне. Оказалось, что они дают всего лишь 5% наблюдаемого фона рентгеновских лучей.

Квазары в качестве источников фонового излучения мало подходят еще и потому, что если они дают спектр, как у этого излучения, то в оптической области характеристики линейчатого спектра у них будут совсем не такие, какие наблюдаются у квазаров.

Этот раздел и сейчас можно завершить словами, которыми американские астрономы С. Холт и Р. Мак-Крей в 1982 г. заключили свой обзор проблемы фонового рентгеновского излучения: «Нам не известны данные, которые могут недвусмысленно решить эту загадку».

Глава 6

СКРЫТАЯ МАССА

Звездные системы часто называют «кирпичиками» Вселенной и говорят, что галактики «сделаны» из звезд, а Вселенная — из галактик. И вряд ли кто еще лет пятнадцать назад подозревал, что звездная галактика — это не весь «кирпич», а лишь крошечная его часть, что на самом деле его масса и размеры почти в десять раз больше!

Что же произошло за эти годы, почему вдруг галактики «потяжелели» в 10 раз и почему раньше мы не видели столь огромной массы? А произошло вот что: в галактиках была обнаружена *скрытая масса*. Она образует в них самую массивную и самую протяженную подсистему — «темное гало», и оказалось, что звездная компонента, которая находится в центре гало, включает в себе лишь 10% массы всей системы, а остальные 90% приходится на несветящееся, невидимое вещество. Соответственно и масса Вселенной (точнее, плотность вещества в ней) сразу «увеличилась» на порядок, причем стало ясно, что Вселенная состоит в основном не из звезд, не из звездных галактик, а из чего-то совершенно иного!

Скрытую массу часто называют невидимой. Действительно, до сих пор не удалось увидеть ее непосредственно: ни один квант не удалось отождествить с излучением темного гало. Тем не менее называть эту массу невидимой было бы в каком-то смысле неверно: ведь обнаружили мы ее в конце концов!

Масса обнаруживает себя не только излучением. Более общим ее свойством является способность создавать гравитационное поле, и вот это поле, поле скрытой массы, астрономы «увидели» в галактиках. Массивные темные гало галактик были открыты, по существу, так же, как в прошлом веке Леверье открыл новую планету в Солнечной системе — Нептун. Леверье «увидел» его в искажениях орбиты Урана — они вызывались гравитационным полем Нептуна. Современные астрономы «увидели» темное гало спиральных галактик в свойствах движения газа на больших расстояниях от самой звездной системы — эти движения выдали присутствие мощного гравитационного поля, которое звездная компонента не в состоянии создать; в эллиптических галактиках на столь же мощное поле указали горячие газовые короны — чтобы удерживать такую корону, гравитирующая масса должна быть в десять раз больше, чем у видимой звездной компоненты. Таким образом, массивные темные гало были обнаружены по их гравитационному воздействию на вещество, находящееся далеко от звездной компоненты галактики.

Следует признать, что до сих пор есть скептики, которые поверили бы в скрытую массу, только увидев ее собственными глазами. Ведь и Леверье не все верили, пока Нептун не увидели в телескоп, и именно в том месте, где он указал. Темные гало в телескоп до сих пор никто не увидел. Поэтому, если игнорировать большое количество самых разных наблюдательных фактов, которые логикой всей астрофизической науки однозначно приводят к выводу о темных гало, то можно продолжать упорствовать в отрицании их существования. Чтобы объяснить движение вещества вдали от звездной галактики, в качестве альтернативы скрытой массе было предложено даже изменить закон всемирного тяготения!

Но таких скептиков становится все меньше. Что касается энтузиастов новых законов тяготения, то, как сказала Вера Рубин (одна из авторов открытия темных гало), «...большинство из нас (астрономов — А. С.) согласится изменить ньютоновскую теорию гравитации в последнюю очередь».

Скрытая масса оказалась жизненно необходимой в сегодняшней астрофизике и с теоретической точки зрения. Без нее оказалось невозможным объяснить факт существования спиральных галактик (без скрытой массы звездные диски галактик оказываются неустойчивыми), а самое главное, без нее зашли в тупик все попытки понять крупномасштабную структуру Вселенной, образование галактик, скоплений, сверхскоплений. Поэтому, если бы астрономы и не обнаружили скрытую массу (точнее, ее гравитационное поле), то теоретики «в законодательном» порядке объявили бы о ее существовании и заставили бы наблюдателей искать ее. Впрочем, дело уже и начинало разворачиваться именно таким образом.

Астрономы не смогли сказать, чем является скрытая масса. Но это не значит, что они не знают о ней ничего, кроме того, что она существует. Не говоря уже о том, что известна масса темного гало и даже характер ее распределения в системе, было установлено, чем не может быть скрытая масса, — а это уже очень много. В то же время теоретики с большой степенью уверенности заявили, чем может быть скрытая масса и даже чем она должна быть (см. в гл. 10).

Невидимое вещество Вселенной оказалось в фокусе фундаментальнейших проблем современной астрофизики и является само по себе интереснейшей проблемой как астрономии, так и физики вообще.

1. Горячие короны и плоские «хвосты» кривых вращения

Мы уже видели в гл. 2, как по скорости вращения спиральных галактик v_{rot} определяется их масса M :

$$M \approx v_{\text{rot}}^2 R/G.$$

Еще сравнительно недавно само вращение измерялось только в области звездного диска — за его пределами просто ничего не видели, нечего было измерять. Поэтому масса M_S , которую находили таким образом, — это масса внутри радиуса звездного диска R_S .

Считалось само собой разумеющимся, что галактика, собственно, и заключена в этих пределах и что в области $R > R_S$ вещества практически нет, гравитационная сила убывает с расстоянием приблизительно по закону R^{-1} . Если в гравитационном поле галактики за ее пределами вращаются какие-то тела вокруг нее, то их скорость долж-

на в этом случае зависеть от расстояния по закону $v_{\text{rot}} \propto R^{-1/2}$ (кеплеровское вращение, как у планет Солнечной системы).

К концу 70-х годов действительно были открыты облака газа, вращающиеся далеко за пределами звездных дисков. В. Рубин с сотрудниками (США) с помощью 4-метровых телескопов обсерваторий Китт Пик и Серро-Тололо обнаружила эмиссионное излучение ионизованного водорода, которое часто прослеживалось вплоть до многих десятков килопарсек за пределами звездного диска. По доплеровскому смещению спектральных линий для этих областей были построены кривые вращения.

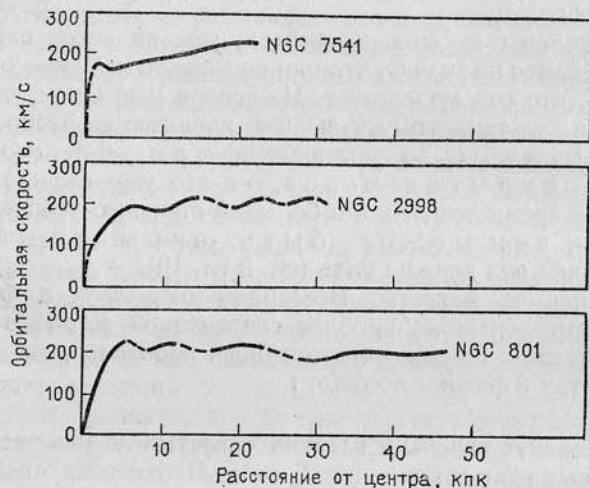


Рис. 25. Кривые вращения трех спиральных галактик. Плоские, а иногда и поднимающиеся вверх (например, у NGC 7541) «хвосты» кривых вращения за пределами радиуса звездного диска указывают на существование массивной невидимой компоненты (скрытой массы) у галактик (данные В. Рубин с сотрудниками)

Одновременно в Нидерландах А. Босма обнаружил нейтральный водород на столь же большом расстоянии (и даже дальше) и по линии радиоизлучения 21 см также построил кривые вращения.

В обоих случаях результат оказался одинаковым: ко всеобщему изумлению, скорость вращения не падала с расстоянием, а оставалась постоянной вплоть до пределов обнаружения излучения газа! У кривых вращения спиральных галактик появились (рис. 25) длинные плоские «хвосты», т. е. области, где $v_{\text{rot}}(R) = \text{const}$.

Интерпретация этого открытия очевидна. Чтобы величина $v_{\text{rot}}^2(R) = GM(R)/R$ не зависела от R , масса $M(R)$ должна линейно расти с удалением от центра, т. е. $M \propto R$. Таким образом, галактика за пределами звездного диска вовсе не кончается, как нам представлялось ранее!

Формулу для массы удобно записать в характерных для галактик единицах:

$$\left(\frac{M}{10^{12} M_{\odot}} \right) \approx 9 \cdot 10^{-2} \left(\frac{v_{\text{rot}}}{200 \text{ км/с}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ кпк}} \right).$$

Нетрудно видеть, что, если область плоского «хвоста» на порядок больше радиуса диска, то полная масса галактики соответственно на порядок больше массы внутри ее звездных размеров и достигает у гигантских систем значений $\sim 10^{12} M_{\odot}$. Так спиральные галактики сделались сразу в десять раз «тяжелее» и протяженнее.

Новая и самая массивная компонента галактик до сих пор не отождествлена с какой-то конкретной формой вещества (газ не в счет, его масса очень мала), ее излучение (если оно есть) до сих пор не зарегистрировано. Поэтому ее назвали «темным», несветящимся гало.

Оценка массы по формуле $M \approx v_{\text{rot}}^2 R / G$ предполагает, что темное гало имеет примерно сферическое распределение в пространстве. Такое предположение кажется естественным, но есть, кроме того, факты, которые просто заставляют считать, что это именно так. Ниже мы приведем некоторые из них.

В эллиптических галактиках массивные темные гало открыли в то же время, что и в спиральных, в конце 70-х годов, в связи с обнаружением горячих рентгеновских корон. Если газовая оболочка короны находится в равновесии в гравитационном поле галактики — а ее свойства говорят именно об этом — то оценку массы, которая создает поле, можно получить, приравняв внутреннюю (тепловую) энергию газа половине его гравитационной энергии. Это дает

$$\frac{3kT}{\mu m_{\text{H}}} \approx \frac{GM}{R},$$

где $\mu \approx 0,6$ — молекулярная масса водородно-гелиевой плазмы. Используя опять характерные для галактик единицы, можно записать:

$$\left(\frac{M}{10^{12} M_{\odot}} \right) \approx 0,9 \left(\frac{T_{\text{X}}}{10^7 \text{ К}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ кпк}} \right).$$

Температура корон достигает $\sim 10^7 \text{ К}$, их размеры у галак-

тик с такой же звездной массой, как у нашей ($M_S \approx 10^{11} M_\odot$), примерно 10—20 кпк. Из формулы сразу видно, что тогда полная масса в пределах короны должна быть на порядок больше звездной, $\sim 10^{12} M_\odot$. А у центральной галактики М 87 скопления Девы размер короны около 200 кпк, следовательно, масса, которая ее удерживает, равна $10^{13} M_\odot$! Это опять же на порядок больше звездной массы М 87, $M_S \approx 10^{12} M_\odot$. Так и у эллиптических галактик «возникли» темные гало несветящейся, скрытой массы.

В данном случае не вызывает сомнений, что скрытая масса распределена в сфероидальном объеме. В то же время обращает на себя внимание тот факт, что отношение полной массы к звездной равно примерно десяти, как и в наших оценках для случая спиральных галактик. Такая схожесть говорит в пользу того, что скрытая масса в спиральных системах действительно распределена сфероидально, и мы получили для них правильную оценку массы.

Другой аргумент в пользу этого же обстоятельства вытекает из динамических свойств дисковых систем. Дело в том, что вращающиеся диски, удерживаемые собственным полем тяготения, неустойчивы: они быстро и радикальным образом деформируются (к этому мы вернемся в конце главы). Отсюда следует, что скрытая масса не может быть заключена в диске, а обязательно должна иметь сфероидальное распределение.

Наконец, один пример прямо показывает, что гравитационное поле дисковых галактик имеет сферическую геометрию, а не дисковую. Уникальная галактика А 0136—080 имеет газовое кольцо, наподобие колец Сатурна. Оно находится на расстоянии трех радиусов звездного диска и, самое удивительное, ориентировано и вращается в плоскости, перпендикулярной диску! В. Рубин определила скорости вращения и диска, и кольца. Оказалось, что несмотря на огромное расстояние между ними, скорость кольца совпала со скоростью границы диска, где начинается область «плоского хвоста» кривой вращения. Это доказывает, что гравитационное поле, которое определяет характер вращения, обусловлено сферически-симметричным распределением (скрытой) массы (рис. 26).

Было бы неправильно открытие темных гало связывать только с кривыми вращения и горячими коронами галактик. Несколько раньше, в 1974 г., Я. Эйнасто, А. Каасик, Э. Саар в Тартуской обсерватории и Дж. Острайкер, П. Пиблс, А. Яхил в США одновременно пришли к выводу о существовании массивной, невидимой компоненты у

нашей и других галактик, в основном на основе данных о движении карликовых галактик-спутников в окрестности таких гигантских систем, как наша. Многие авторы

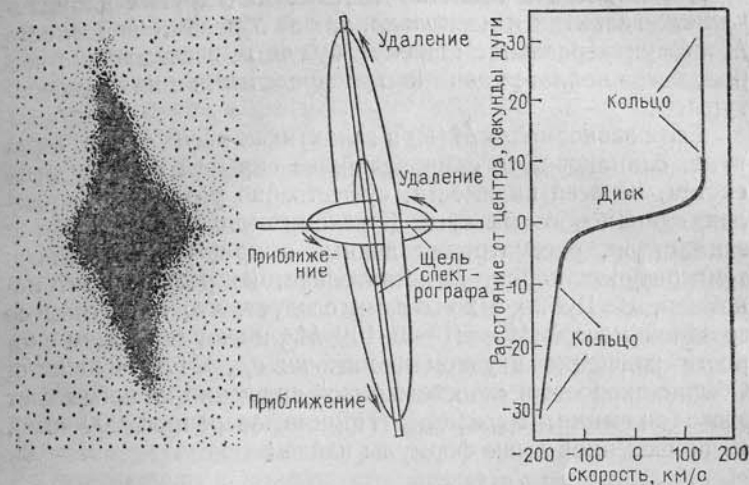


Рис. 26. Фотография галактики А 0136—0801 (слева), схема вращения ее звездного диска и перпендикулярного диску газового кольца (в центре) и кривая вращения в области диска и кольца по В. Рубин (справа). Кинематика системы свидетельствует о сфероидальном распределении скрытой массы в темном гало

приходят к такому же заключению, изучая динамику двойных галактик. Но кривые вращения и горячие короны дают, конечно, наиболее прямое доказательство этого факта, а также количественную информацию о темных гало.

2. Одинаковы ли темные гало спиральных и эллиптических галактик?

Итак, независимость скорости вращения от расстояния за пределами звездных дисков спиралей говорит о том, что масса темного гало у них линейно растет с расстоянием. А что можно сказать об эллиптических системах? Некоторые сведения на этот счет дает галактика М 87. Анализ рентгеновского излучения ее короны показал, что на протяжении всего невероятно огромного ее размера, $R \approx 200$ кпк, температура короны почти не меняется; возможно, в центре она раза в два ниже, чем на периферии, но вряд ли различие больше. Таким образом, похоже, что короны практически изотермичны, т. е. T почти не зависит от R .

Но тогда из формулы, связывающей M , T и R , видно, что масса должна линейно увеличиваться с расстоянием — как и в спиральных галактиках!

Насколько это свойство типично для других эллиптических галактик и насколько, таким образом, зависимость $M \propto R$ универсальна, покажут будущие исследования корон, когда появятся данные о распределении в них температуры.

Если зависимость $M(R)$ в галактиках обоих типов, вероятно, одинакова, то сами величины скрытой массы у этих систем, по всей видимости, существенно различны в пределах одинакового радиуса. К такому выводу пришел автор этих строк, рассматривая данные о кривых вращения и температурах корон. Действительно, из результатов, например, В. Рубин с коллегами следует, что галактики со звездной массой $M_s = (1-3) \cdot 10^{11} M_\odot$ имеют максимум скорости вращения в узком диапазоне: $v_{\max} \approx 170-220$ км/с. Обычно скорость в «хвосте» кривой вращения не превышает этого значения, $v_{\text{rot}} \leq v_{\max}$. Приняв ее равной 200 км/с, из приведенной выше формулы найдем

$$\left(\frac{M(R)}{R} \right)_{S\text{-гал}} \approx 1 \cdot 10^{10} M_\odot / \text{кпк}.$$

С другой стороны, у всех эллиптических галактик, согласно результатам У. Формана и других авторов, температура корон практически одинакова и равна $T \approx 10^7$ К (хотя по массе галактики различаются при этом на порядок!). Тогда для них точно так же найдем

$$\left(\frac{M(R)}{R} \right)_{E\text{-гал}} \approx 1 \cdot 10^{11} M_\odot / \text{кпк}.$$

Значит, в пределах одинаковых размеров масса темного гало у эллиптических галактик в десять раз больше, чем у спиральных!

По существу речь идет о различии параметра компактности, который мы обсуждали в гл. 2 как фактор, обусловивший различие свойств хаббловских типов галактик. Кажется чрезвычайно заманчивым предположить, что эллиптические галактики отличаются от спиральных главным образом потому (а может, только потому), что у них в данном объеме темное гало в десять раз массивнее (следовательно, и гравитационный потенциал в десять раз больше), чем у спиралей.

Небезынтересно отметить, что этот параметр одинаков у галактики М 87, близкой по типу к сD-системам, и у эл-

липтических галактик, звездная масса которых на порядок меньше, чем у М 87. Это наталкивает на мысль, что первоначально сD-галактики не отличаются от обычных гигантских E-галактик, и лишь выделенное положение в центре скопления приводит к их превращению в сверхмассивные сD-системы (например, вследствие стекания газа скопления в центр, где в гравитационном поле центральной галактики он превращается в звезды).

3. Скрытая масса внутри звездных галактик

В 1973 г. Дж. Острайкер и П. Пиблс (США), анализируя результаты работ по моделированию на ЭВМ динамики систем гравитирующих частиц, обратили внимание, что в тех случаях, когда исходной системой является диск, вращающийся в собственном поле тяготения, он быстро деформируется. При этом энергия вращения E_{rot} переходит в энергию хаотического движения частиц, в «тепло», и система «разогревается». Другими словами, такая система является неустойчивой.

Это привело к выводу, что звездные диски спиральных галактик не могут существовать сами по себе. Дальнейшие расчеты на ЭВМ показали, что диск устойчив, и в нем даже развивается спиральная структура, если большая часть всей массы системы находится в невращающейся сферической подсистеме. Такой подсистемой, стабилизирующей звездный диск спиральных галактик, может быть звездное гало, образованное старым звездным населением. Однако ни в нашей, ни в других галактиках в гало не удастся найти необходимую массу.

В результате Дж. Острайкер и П. Пиблс пришли к выводу, что внутри галактик существует невидимая, скрытая масса, образующая *внутреннее темное гало*, которая стабилизирует диск.

Последующие наблюдательные исследования спиральных галактик подтвердили это заключение. П. ван дер Круит совместно с Л. Сирлом изучал распределение массы в дисковых галактиках по данным о вращении, о распределении яркости и о скоростях движения облаков нейтрального водорода в гравитационном поле диска. В 1982 г. они пришли к окончательному выводу, что в дисках содержится не более одной трети — половины всей массы в пределах оптического радиуса галактики.

Крайне любопытно, что с большой степенью вероятности более половины массы в диске нашей Галактики и не-

посредственно в окрестности Солнца также является скрытой. С этой проблемой впервые столкнулся голландский астроном Я. Оорт еще в 1960 г. Изучая движение звезд перпендикулярно диску Галактики (вблизи Солнца), он установил, что наблюдаемой в виде звезд массы совершенно недостаточно, чтобы объяснить гравитационную силу в этом направлении; большие скорости движения требовали примерно в два раза большей массы. Уже в наши дни Дж. Бакол из Принстона (США) более строго показал, что плотность «невидимой» массы вблизи Солнца действительно примерно равна плотности массы, заключенной в звездах, и это недостающее вещество заключено в диске толщиной около 1,5 кпк.

Однако «локальная» скрытая масса в диске и масса темного гало имеют, скорее всего, разную природу. Масса, которой «не хватало» Оорту и другим авторам, должна быть «обычным» (барионным) веществом, например, тусклыми звездами с массой менее $0,1 M_{\odot}$, тогда как масса темного гало — внешнего и внутреннего, представляет собой, как полагает большинство астрономов, газ не взаимодействующих частиц; такой газ не в состоянии был бы сжаться в тонкий быстровращающийся диск.

4. Может ли скрытая масса быть обычным веществом?

В этой проблеме обычным называют вещество, состоящее из барионов — протонов и нейтронов — и электронов, т. е. то, из чего «сделаны» планеты, Солнце, звезды, межзвездный газ. Часто говорят просто — *барионное вещество* (электроны дают ничтожный вклад в массу). Ему противопоставляют *небарионное вещество* — газ практически не взаимодействующих друг с другом элементарных частиц: нейтрино с ненулевой массой покоя, а также гипотетические элементарные частицы — *аксионы*, *фотино*, *гравитино* и другие «...ино». Такой газ называют бесстолкновительным (частицы не взаимодействуют), бездиссипативным (он не может терять внутреннюю энергию путем излучения квантов, в отличие от «барионного» газа).

Почему же астрономы склонны считать, что именно это экзотическое (и пока все еще гипотетическое) вещество образует массу темных корон и вообще подавляющую часть (90%!) массы Вселенной? Ответ такой: сейчас мы столько знаем о звездах, межзвездной среде, галактиках в целом, что можем отвергнуть с большой степенью уверенности чуть ли не всякую допустимую форму барионного вещества

в количестве, нужном для объяснения огромной массы темных гало; если бы оно было, то мы его уже увидели бы. Приведем несколько простых примеров. Предположим, что темное гало — это обычный газ. Гало находится в равновесии (иначе оно давно бы «упало» на центр галактики), а в этом случае его температура в галактиках типа нашей должна быть около 10^6 К и выше. Мы видим газ с такой температурой, причем только в эллиптических галактиках, и там его в сотни и тысячи раз меньше, чем нужно. Значит, газ не годится.

Пусть теперь это будут звезды со столь малой массой, что в них не идут термоядерные реакции и они практически не светят; часто говорят о «юпитерах» — объектах с массой порядка массы Юпитера, $M \approx 10^{-3} M_{\odot}$. Распределение звезд по массам известно довольно хорошо, и если мы знаем, сколько есть звезд данной массы, мы всегда можем сказать, сколько при этом должно быть звезд других масс. Так вот, если масса темных гало обусловлена «юпитерами», то наряду с ними должно быть такое количество более массивных, светящихся звезд, что мы их легко бы увидели; но их нет. Можно предположить, что известный закон распределения звезд по массам несправедлив в области малых масс (где мы действительно не наблюдаем звезд). Но есть ряд других соображений, которыми «юпитеры» отвергаются (они более специальные, и мы их не станем приводить).

Всерьез обсуждается также еще одна идея: темное гало из звездных остатков — белых карликов, нейтронных звезд, черных дыр. Но против них аргументов, пожалуй, больше, чем против «юпитеров». Например, звезда становится таким остатком, сбросив в виде газа большую часть начальной массы. Но тогда этот газ мы бы видели, а мы его не видим (с газа мы начали наши примеры). В звезды он тоже не мог превратиться — тогда масса звезд была бы не меньше массы темного гало. Не мог он уйти и в межгалактическое пространство в столь огромном количестве — мы и там видим газ, и его гораздо меньше, чем должно было бы быть. Конечно, мы далеко не все знаем о звездах и звездобразовании, особенно о первых поколениях звезд. Поэтому наша уверенность в том, что в темном гало — не звездные остатки или «юпитеры», не может быть стопроцентной. Нужны дополнительные соображения, аргументы; они есть, но до «ста процентов» нашу уверенность пока не доводят.

И все же исследования такого рода склонили чашу весов «общественного мнения» в пользу небарионной формы вещества в темном гало.

Но самое удивительное то, что астрономы действительно обнаружили в области «темных гало» слабо светящуюся материю, которая образует гигантское оптическое — «светлое» — гало; его размеры раза в два больше звездных размеров галактики!



Рис. 27. Спиральная Sa-галактика М 104 («Сомbrero»), видимая с ребра

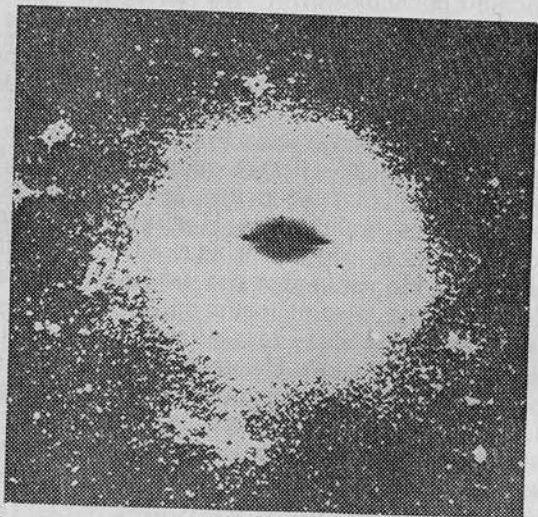


Рис. 28. Вокруг галактики М 104 (в центре) обнаружена гигантская слабосветящаяся оболочка красного цвета

Сделать это было крайне непросто: ведь яркость «светлого» гало меньше, чем яркость самого черного ночного неба! Только специальная техника наблюдений и обработки

изображений с помощью ЭВМ позволила увидеть эту загадочную оболочку галактик (рис. 27—29).

А она действительно загадочна. По крайней мере, когда пишутся эти строки, еще никто не знает, из чего она «сделана». У нее такой же цвет, как у красных гигантов или красных карликов, причем в разных галактиках он разный.

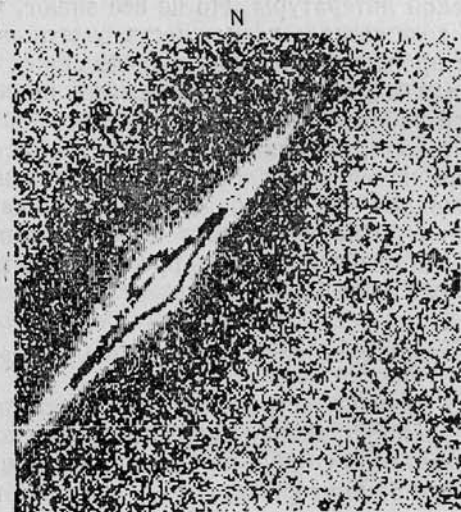


Рис. 29. Гигантская слабосветящаяся оболочка вокруг дисковой галактики NGC 4565, которую обнаружили с помощью наблюдений в инфракрасном диапазоне (на рисунке она видна как темная эллипсоидальная область вокруг яркого диска)

Например, в М 104 (рис. 27) показатель цвета равен $B - V = 1,0$; в NGC 4565 (рис. 29) $B - V = 0,9$; а в NGC 253 это гало заметно голубее, $B - V$ заметно меньше. Цвет, похоже, одинаков на всех расстояниях — в отличие от обычных звездных гало, где край голубее, чем центральные области.

Конечно, сразу же возникла заманчивая мысль: а не есть ли это искомая скрытая масса? Ответ был отрицательным. Если бы это светили, например, красные гиганты или карлики, то по светимости нетрудно определить массу; оказалось, ей далеко до величины скрытой массы.

Любопытно, что самые интригующие и загадочные объекты и явления современная астрофизика обнаруживает в самом центре галактик — это активные ядра — и на самых окраинах галактик, вдали от звезд — «темные» и «светлые» гало!

НА КРАЮ ВСЕЛЕННОЙ, ИЛИ 10 МИЛЛИАРДОВ ЛЕТ ДО НАШЕЙ ЭРЫ

Машина времени, хроноскоп, путешествия в прошлые или будущие времена — все это нам хорошо знакомо из фантастической литературы. Но не все знают, что природа и на самом деле создала возможность видеть самое настоящее, живое прошлое, причем вплоть до самых истоков, до самого начала мира. И эту возможность широко используют в своей работе астрономы.

Вообще говоря, им удивительно повезло: астрономия — единственная на самом деле наука, где можно видеть и изучать прошлое — не восстанавливать его по «ископаемым окаменелостям», как это делают палеонтологи, а именно видеть сегодня, сейчас то, что происходило миллионы и миллиарды лет назад!

1. Пространственно-временная структура Вселенной

«Машина времени» астрономов «действует» на принципе конечности распространения скорости света, скорости переноса информации. Взглянув на Солнце, мы видим, что происходило с ним 8 минут назад, потому что свет от Солнца до Земли идет как раз 8 минут. А вот глядя на туманность Андромеды, мы уже наблюдаем события, происходившие примерно 2 миллиона лет назад — столько времени требуется свету, чтобы дойти от этой галактики до земного наблюдателя.

Впрочем, эти факты довольно широко известны. Значительно реже задумываются над тем, куда мы придем, если будем обращаться ко все более далеким галактикам, ко все более удаленным объектам. А ответ прост: мы придем к началу Вселенной, увидев «по дороге» все фазы ее существования!

Таким образом, передвигаясь в глубь пространства, мы одновременно движемся по шкале времени, уходя от наших дней все дальше в прошлое Вселенной. При этом каждому расстоянию соответствует вполне определенный интервал времени, так что расстояния можно измерить в секундах или годах, и наоборот, время можно измерить в километрах или парсеках. Вместо парсек или годов и расстояние и время можно измерять также величиной космологического красного смещения $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ (λ_0 — длина волны спектраль-

ной линии в лабораторной системе, λ — наблюдаемая длина волны смещенной линии). Для не слишком больших расстояний r , времени t и красных смещений z связь между всеми тремя величинами предельно проста. Используя закон Хаббла для скоростей разбегания галактик в расширяющейся Вселенной

$$v = H_0 r,$$

а также тот факт, что при малых скоростях $v/c \ll 1$ (или при малых красных смещениях $z \ll 1$) имеет место соотношение $v = cz$, эту связь можно записать в виде

$$t = r/c = z/H_0$$

(H_0 — постоянная Хаббла). Для больших расстояний она выглядит сложнее из-за кривизны пространства, а большие скорости (или величины z) приводят, кроме того, к необходимости учета релятивистских эффектов, изменяющих зависимость v от z (см. ниже).



Рис. 30. Схема пространственно-временной структуры наблюдаемой Вселенной. Изображены галактики и квазары (обозначены звездочками), а также указано реликтовое излучение

Таким образом, каждой из трех величин t , r и z можно поставить в соответствие две другие. Имея это в виду, трудно изобразить структуру Вселенной в целом и ясно увидеть иногда ускользающие от понимания важные особенности наблюдаемого мира. Рассмотрим представленную на рис. 30 схему. Вокруг центральной точки, изображающей Землю (земного наблюдателя), проведена окружность с радиусом $r = 24$ Мпк. На этом расстоянии находится ближайшее к нам скопление галактик в Деве с его знаменитой

центральной галактикой М 87. В единицах z окружность (а правильное, сфера) имеет радиус $z=0,004$ (постоянная Хаббла принята равной $H_0=50$ км/(с·Мпк), а в единицах времени радиус сферы равен $t=80$ миллионов лет.

Следующая окружность изображена на расстоянии, соответствующем красному смещению $z=4$. Чтобы выразить это расстояние в мегапарсеках или годах, надо знать уже кривизну пространства, которая в свою очередь зависит от отношения средней плотности вещества во Вселенной ρ_0 к критической плотности $\rho_c=3H_0^2/8\pi G=5\cdot 10^{-30}$ г/см³. Наблюдаемое вещество в звездах и галактиках приводит к низкой средней плотности, так что $\Omega\equiv\rho_0/\rho_c\ll 1$. Но если во Вселенной достаточно много невидимой, скрытой массы, то возможно даже, что $\Omega=1$. В первом случае $z=4$ соответствует $r=10^4$ Мпк, $t=16$ миллиардов лет, во втором $r=7\cdot 10^3$ Мпк, $t=10$ миллиардов лет. Заметим, что для больших расстояний само понятие расстояния становится неоднозначным; здесь под расстоянием понимается длина пути, пройденного светом от объекта до земного наблюдателя. В случае $\Omega\ll 1$ этот путь равен

$$r = \frac{c}{H_0} \ln \frac{4(z+1)}{(1+\sqrt{1+\Omega z})^2}.$$

Время, за которое свет проходит этот путь, равно

$$t = t_0 - \tau(z),$$

где t_0 — возраст Вселенной, а $\tau(z)$ — время от начала расширения Вселенной (момент $\tau=0$) до момента, соответствующего красному смещению z ; при $\Omega\ll 1$ оно равно

$$\tau(z) = \frac{1}{H_0} \left[\frac{\sqrt{1+\Omega z}}{1+z} + \frac{\Omega}{2} \ln \frac{\Omega(1+z)}{(1+\sqrt{1+\Omega z})^2} \right].$$

Возраст Вселенной при этом равен

$$t_0 = \frac{1}{H_0} \left(1 + \frac{\Omega}{2} \ln \frac{\Omega}{4} \right).$$

На «расстоянии» $z=3,78$ в 1982 г. был обнаружен самый далекий из известных нам до 1986 г. объектов во Вселенной — квазар PKS 2000—330. В 1986 г. был открыт первый квазар с $z=4$. Астрофизики полагают, что галактики стали рождаться во Вселенной как раз в то время, которое соответствует сейчас красным смещениям $z\approx 4$. Тот факт, что не удастся увидеть квазары (принимаемые большинством исследователей за центральные области молодых галактик) за

красным смещением $z=5$, вроде бы говорит в пользу этой гипотезы. Но тогда величина $z\approx 4-5$ (или соответствующие ей значения r и t) является фактически радиусом сферы, внутри которой заключена вся звездная Вселенная, весь ее объем, в котором существуют галактики и квазары. Этот объем, таким образом, конечен и в нем заключено конечное, вполне определенное количество галактик; в принципе их можно пересчитать по штукам!

Вывод о конечности звездной Вселенной, о конечном числе галактик в ней может показаться парадоксальным: мы привыкли считать, что Вселенная бесконечна, значит, вроде бы и мир галактик, звезд должен быть бесконечным.

Но парадокс решается просто, и конечность числа галактик отражает следующее обстоятельство. Реальный наблюдатель может видеть только те объекты, которые находятся внутри сферы вполне определенного радиуса; он равен расстоянию, которое успевает пройти свет за время с момента образования этих объектов до наших дней. Поскольку возраст всех объектов во Вселенной конечен, то и радиус этот всегда ограничен — хотя сама Вселенная и число галактик в ней неограничены.

Впрочем, если оставить объяснение рассматриваемого парадокса в таком виде, то все равно остается некоторое чувство неудовлетворенности. Ведь можно спросить: а какой же смысл тогда в этой неограниченности и бесконечности, если она принципиально не наблюдается? Вопрос резонный, и ответ на него состоит в следующем. Если бы наша Земля находилась не в Млечном Пути, а в галактике, которая сейчас (для нас) связана с квазаром PKS 2000—330, т. е. находилась бы на границе звездной Вселенной, то мы бы видели другую часть Вселенной, которая точно так же наполнена звездами и галактиками, хотя более половины из них для наблюдателя в Млечном Пути не существуют. Кстати, сам Млечный Путь представлялся бы нам из окрестностей квазара PKS 2000—330 объектом с красным смещением $z=3,78$, в котором только-только стали появляться (а может, еще и не появились) первые звезды, первые шаровые скопления.

Мы еще вернемся к этому вопросу, а сейчас пойдем дальше, вглубь и к началу Вселенной. Следующая окружность на нашей схеме проведена на расстоянии, соответствующем красному смещению $z\approx 1500$. На этом расстоянии, в это время, Вселенная переживает важный этап своей жизни: происходит рекомбинация водорода. Электроны объединяются с протонами, образуя нейтральные атомы водорода,

и вещество в целом становится нейтральным. Это не могло произойти на более ранних этапах эволюции Вселенной, потому что среда была более горячей и могла существовать только в виде полностью ионизованной плазмы.

Рекомбинация радикально меняет характер взаимодействия вещества и излучения. В ионизованном веществе кванты света активно взаимодействуют со свободными электронами, рассеиваются ими, следовательно, не могут распространяться свободно, прямолинейно. Поэтому Вселенная до рекомбинации непрозрачна для света. С нейтральными же атомами кванты не взаимодействуют (за исключением небольшого числа высокоэнергичных квантов), и Вселенная после рекомбинации «просветляется» для излучения. В результате все пространство между нами и сферой с радиусом $z=1500$ прозрачно для излучения, а сама внутренняя поверхность сферы является источником излучения: испущенные или рассеянные в последний раз на ней кванты далее беспрепятственно доходят до нас. Температура вещества во Вселенной в это время равна $T=3000-4000$ К, т. е. немного меньше температуры поверхности Солнца; поскольку более далекие от нас слои непрозрачны, то эта сфера, как и поверхность Солнца — фотосфера, излучает как горячее черное тело.

Получается любопытная картина: вся небесная сфера представляет собой излучающую поверхность с температурой $T=(3-4) \cdot 10^3$ К, удаленную от нас на расстояние $r \approx 10^4$ Мпк, а дальше за ней идет непрозрачное горячее вещество. Это очень похоже на то, как устроено Солнце и как мы его видим; только картина вывернута наизнанку: излучение к нам идет не с внешней поверхности сферы, а с внутренней, и сами мы находимся не снаружи, а прямо в центре: то, что у Солнца является центральной точкой, где самая высокая температура и плотность, в нашем случае оказывается самой удаленной сферической поверхностью, также с самой высокой плотностью и температурой. Но об этом дальше.

Итак, мы дошли до поверхности, которую можно назвать космологической фотосферой. Если измерять расстояние до нее не в мегапарсеках, а в годах, то это расстояние лишь немногим меньше возраста Вселенной: от момента начала расширения Вселенной, которому на нашей схеме соответствует последняя окружность (сфера сингулярности, или поверхность «начала мира»), ее отделяет всего лишь около миллиона лет. Теперь самое время сказать, что именно здесь, на этой «фотосфере», формируется хорошо известное *релик-*

товое излучение, которое представляется нам как излучение черного тела с температурой $T=2,7$ К.

Но почему температура равна $2,7$ К, а не $4 \cdot 10^3$ К? Дело в том, что за то время, пока излучение дошло до нас, оно «остыло», и его температура упала с $4 \cdot 10^3$ К до $2,7$ К. Температура в расширяющейся Вселенной уменьшается по закону $(1+z)^{-1}$, поэтому наблюдатель регистрирует температуру излучения

$$T_r = \frac{T_{ph}}{1+z_{ph}},$$

где T_{ph} — температура космологической фотосферы, z_{ph} — ее красное смещение. Если известно, при каких условиях, при какой температуре могла произойти рекомбинация во Вселенной, то можно найти и соответствующую величину красного смещения:

$$z_{ph} = \frac{T_{ph}}{T_r} - 1.$$

Если $T_{ph}=4 \cdot 10^3$ К и $T_r=2,7$ К, то $z_{ph} \approx 1500$. Само «остывание» излучения легко понять, если иметь в виду, что одинаковое относительное увеличение всех длин волн в спектре электромагнитного излучения, обусловленное космологическим красным смещением, эквивалентно уменьшению температуры излучения. Поэтому удаляющаяся от нас со скоростью, лишь чуть меньшей скорости света, поверхность космологической фотосферы воспринимается нами гораздо более холодной, чем она есть на самом деле.

За «фотосферой», светящейся реликтовым излучением, находится горячее, непрозрачное вещество. Но из толщи этого вещества идет поток нейтрино. Сейчас мы еще не можем его регистрировать, но в будущем, возможно, эту проблему удастся решить так же, как сравнительно недавно была решена проблема регистрации солнечных нейтрино. И тогда мы увидим космологическую «нейтриносферу» — поверхность, где рождается реликтовое нейтринное излучение.

Далее вещество непрозрачно и для нейтрино. «Нейтриносфера» уже вплотную приближается к поверхности «начала мира», и если «фотосфера» возникла, когда Вселенной было порядка миллиона лет, то «нейтриносфера» образовалась, когда возраст Вселенной составлял всего 10^{-1} с, а температура была $T \approx 10^{10}$ К.

Несколько ближе к нам, в области, соответствующей $t \approx 100$ с от начала расширения Вселенной, происходит кос-

мологический нуклеосинтез, в результате которого образуется первичный, «космологический» химический состав вещества: примерно 80% водорода плюс 20% гелия. В принципе мы могли бы, наверное, зарегистрировать нейтрино от реакций нуклеосинтеза так же, как сейчас регистрируем нейтрино от реакций превращения водорода в гелий в центре Солнца.

Не вдаваясь в невероятно сложные трудности регистрации реликтового нейтринного излучения, мы отметим одну принципиальную проблему. Если нейтрино обладают массой покоя, то, в отличие от квантов света, они не могут выйти из нас от «сегодняшней» поверхности «нейтриносферы», поскольку они движутся не как свет, а как обычное вещество. На расстояниях $z \approx 3-5$ они будут захвачены гравитационными полями будущих галактик и скоплений галактик; наша Галактика в этом случае должна быть погружена в нейтринную оболочку, которую она захватила, а может, точнее, в которую была захвачена в момент своего формирования, т. е. около 15 миллиардов лет назад. И проблема в том, что взаимодействие нейтрино с гравитационными полями галактик и их скоплений в огромной степени уничтожило информацию о свойствах «нейтриносферы». Например, температура нейтринного «газа» теперь определяется не температурой «нейтриносферы», а гравитационным полем Галактики, и равна не двум кельвинам (такова должна быть наблюдаемая температура нейтриносферы), а миллионам кельвинов.

Но вернемся к нашей схеме. За поверхностью «нейтриносферы», где вещество непрозрачно и для нейтрино, остается пройти совсем немного (по времени) до последней границы, дальше которой ничего нет и в принципе никогда не будет. Это ничтожно малое во временных единицах расстояние невообразимо богато физическими процессами, и даже краткое описание того, что здесь происходит, уведет нас очень далеко от основной темы. Достаточно сказать, что в «глубине» этой области должно происходить рождение аксионов, фотино, гравитино и других гипотетических частиц, которые, возможно, образуют скрытую массу галактик и их скоплений; здесь имела место инфляционная стадия космологического расширения, обусловившая наблюдаемую однородность и изотропию видимой Вселенной; здесь «сработали» законы, которые нарушили симметрию между веществом и антивеществом и оставили только вещество.

Последняя граница, последняя окружность на нашей схеме — это сфера космологической сингулярности, или,

как ее называют в космологии, горизонт. Она расположена на расстоянии, которое свет проходит за время от начала расширения Вселенной и до наших дней. За этой границей для наблюдателя ничего не существует: ни времени, ни пространства, ни материи.

Столь неожиданный, на первый взгляд, вывод, казалось бы, можно еще как-то принять, если Вселенная закрытая ($\Omega > 1$), но ведь в открытой модели ($\Omega < 1$) Вселенная бесконечна и безгранична! И все же вывод одинаков для обеих моделей. В своей книге «Строение и эволюция Вселенной» Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков пишут в связи с этим: «...в обоих случаях доступная наблюдению часть Вселенной конечна, и в этом смысле различие между открытой и замкнутой Вселенной оказывается меньше, чем можно было ожидать».

Заметим, кстати, что существование сферы сингулярности ярко демонстрирует относительность привычных геометрических представлений, когда речь идет о Вселенной в целом; в частности, она очень образно показывает неоднозначность понятия «расстояние». Когда мы смотрим на сферу сингулярности в двух противоположных направлениях, нам кажется очевидным, что эти точки разделены гигантским расстоянием; на самом деле все расстояния в сингулярности равны нулю и сама сфера сингулярности на самом деле не сфера, а точка!

Конечно, строго сингулярную поверхность мы вряд ли когда-либо увидим; но непосредственно прилегающие к ней области, в принципе, можно было бы увидеть, если существуют слабовзаимодействующие безмассовые частицы, для которых Вселенная становится прозрачной уже вблизи сингулярности.

Итак, благодаря конечности скорости света и любых других носителей информации мы можем наблюдать и изучать окружающую нас Вселенную не только в пространстве, но и во времени, в принципе вплоть до момента ее рождения. Всякое смещение по шкале расстояний в глубь Вселенной — это одновременно смещение по шкале времен в ее прошлое. И само понятие «прошлое» для нас становится тоже относительным; свет, посланный далеким небесным телом, сейчас воздействует на наши органы чувств, сейчас приводит в действие счетчики квантов в наших обсерваториях. Поэтому для нас квазары — это «живые» объекты, «в плоти и крови», а не «иссохшие останки», и говорим мы о том, что с ними происходит, не в прошедшем, а в настоящем времени.

2. Галактики на краю Вселенной

Итак, на расстояниях в миллиарды световых лет на краю Вселенной, мы видим и изучаем живых «динозавров» Вселенной — квазары, которые там, в свое время, еще полны необузданной, первозданной энергии. Там же, в этом прошлом, мы увидели и юность галактик.

Возможность видеть далекое прошлое галактик появилась не так давно. Не прошло и десяти лет с тех пор, как успехи в развитии светоприемной аппаратуры позволили наблюдать галактики на больших красных смещениях, $z \geq 0,5$. Причем не просто видеть их, а получать спектры и фотометрические данные, следовательно, информацию об их светимости, химическом составе, о свойствах звезд и других объектах, которые их населяют. И впервые астрономы увидели галактики не такими, какие они есть сейчас, к каким привыкли за предшествующие десятилетия их исследования.

Оказалось, что еще 5—7 миллиардов лет назад (этому соответствует красное смещение $z \approx 0,5$) многие галактики не успели закончить бурный период своей жизни, период активного формирования звездных населений. Завершающие сцены ранней истории этих систем, столь не похожие на современную их жизнь, и были обнаружены под толщей пяти-семи миллиардов лет.

В конце 70-х годов американские астрономы Х. Бачер и А. Омлер стали исследовать цветовые характеристики объектов в поле скоплений галактик с большим красным смещением. Первым было выбрано скопление ЗС 295 с красным смещением $z=0,46$, широко известное тем, что в его центре находится одна из мощнейших радиогалактик ЗС 295 (она и дала имя всему скоплению). Сразу же было обнаружено, что доля голубых галактик здесь намного больше, чем в близких к нам скоплениях. Поскольку голубые цвета галактик обусловлены большим количеством молодых массивных звезд с коротким временем жизни (звезды О, В), то был сделан вывод, что наконец-то обнаружена эпоха интенсивного звездообразования в гигантских галактиках, эпоха становления звездных систем.

Но не прост путь к утверждению открытия. Нужна уверенность, что «голубые» объекты Бачера — Омлера действительно принадлежат скоплению ЗС 295 и потому имеют те же красные смещения, находятся в том же прошлом. А для этого нужно получить хорошие спектры объектов и

по спектральным линиям измерить красное смещение. На расстояниях, соответствующих $z=0,46$, даже гигантские галактики типа нашей (Млечный Путь) с абсолютной звездной величиной $M_V = -20^m \div -21^m$ выглядят очень слабыми объектами с видимой звездной величиной $m_V = 20^m \div 21^m$. Они доступны только крупнейшим телескопам, а их спектры — только новейшему поколению спектральной аппаратуры. Лишь в 1982—1983 годах А. Дресслер из обсерватории Маунт Вильсон и Дж. Ганн из Принстонского университета, используя метод многощелевой спектроскопии и применяя для регистрации фотонов специальные приборы — матрицы ПЗС, получили на 5-метровом телескопе достаточно качественные спектры 26 объектов в поле ЗС 295. О сложности этой задачи говорит, например, тот факт, что время экспозиции каждого объекта составило до 5 часов — даже на этом гигантском телескопе! И только возможность одновременной регистрации спектров сразу многих объектов с помощью многощелевого спектрографа позволила выполнить наблюдения за разумное время, а система «накопления» фотонов с применением ПЗС-матриц дала возможность достичь столь длительной экспозиции путем распределения всего необходимого времени наблюдения на две-три ночи.

Определение красных смещений показало, что более половины объектов, классифицированных Бачером и Омлером как «голубые», не принадлежат скоплению ЗС 295, а являются в основном более близкими спиральными галактиками. Поэтому оценку доли галактик в стадии интенсивного звездообразования в этом скоплении потребовалось уменьшить. Зато 6 голубых объектов, оставшихся в списке действительных членов ЗС 295, с лихвой возместили эту «потерю» необычностью своих свойств. Три из них оказались сейфертовскими галактиками, т. е. с активными ядрами, а три другие вообще не похожи ни на одну из известных нам галактик, ни на один известный тип галактик (рис. 31).

Оба эти факта красноречиво продемонстрировали отличие современных галактик от галактик, которые моложе на 5—7 миллиардов лет. Что касается систем с активными ядрами, то достаточно сказать, что из 200 галактик близкого к нам скопления Кома, для которых сейчас получены спектры, нет ни одной сейфертовской! Поэтому напрашивается очевидный вывод: мощная активность ядер, столь редкая в наши дни, 7 миллиардов лет назад была обычным явлением.

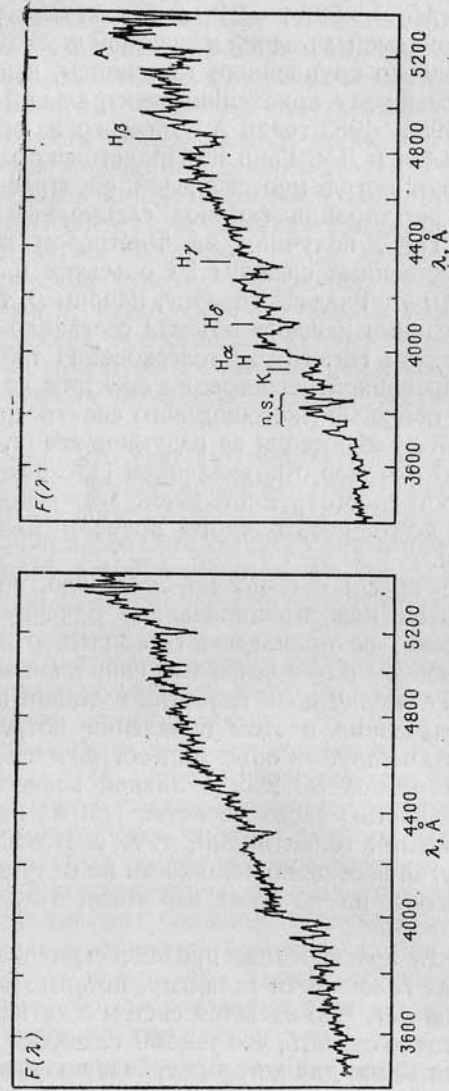


Рис. 31. Слева: спектр нормальных спиральных галактик. Справа: спектр галактик скопления 3C 295, в которых, согласно А. Дресслеру и Дж. Ганну, 10^9 лет назад произошла мощная вспышка звездообразования длительностью $5 \cdot 10^8$ лет. Хорошо видны необычно сильные балмеровские линии поглощения

Но самое любопытное дал анализ спектров трех других галактик. Кстати, на их примере очень поучительно проследить, сколь много информации о галактиках вообще можно извлечь из спектров. Итак, эти три галактики оказались лишь умеренно голубыми: показатель цвета $B - V$ у них равен 0,74. Такое значение $B - V$ типично для современных спиральных галактик типа Sb, и будь у нас только данные о цвете, мы бы не сомневались, что это именно спирали Sb. Однако спектр трех галактик 3C 295 не имеет ничего общего со спектром спиралей Sb! Более того, он обладает набором свойств, которые вообще для известных галактик являются несовместимыми. Конкретно, в спектре есть сильные балмеровские линии поглощения, при этом, с одной стороны, отсутствуют эмиссионные линии ионизованного кислорода OII и очень слабо ультрафиолетовое излучение, а с другой стороны, цвет этих галактик слишком красный. Почему такое сочетание совершенно необычно? Дело в том, что сильные линии поглощения так называемой балмеровской серии атома водорода — линии H_β , H_γ , H_δ , H_ϵ — могут возникнуть, если подавляющая часть света галактики обусловлена звездами ранних спектральных классов В, А, F: балмеровские линии наблюдаются только в спектрах ранних звезд. Но такие звезды слишком голубые. Если основной вклад в светимость дают, например, звезды F5V, то показатель цвета $B - V$ был бы не 0,74, а 0,45 — что наблюдается только у самых голубых иррегулярных галактик.

Чтобы объяснить странное сочетание сильных балмеровских линий с довольно красным цветом, необходимо предположить необычную для нормальных галактик звездную смесь. Надо считать, что имеется необычно большое количество молодых звезд спектрального класса А, у которых эти линии наиболее сильны, но при этом большая часть света обусловлена красными гигантами, как в Е-галактиках с исключительно старыми звездами.

Но это не все! Если в галактике имеется известное число А-звезд, то по начальной функции масс легко вычислить, сколько в ней должно быть, скажем, звезд классов О и В. Сама начальная функция масс, которая определяет относительное число звезд разных спектральных классов (следовательно, и разных масс) на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга — Рассела, хорошо известна из данных о нашей Галактике и о других близких галактиках. В первом приближении она одинакова для всех галактик. Зная число звезд классов О и В, можно вычислить интен-

сивность ультрафиолетового излучения, эмиссию в линиях ионизованного кислорода [OII] и другие спектральные характеристики, которые связаны только с этими горячими звездами. Расчеты показали, что эти характеристики должны быть ярко выражены в спектрах галактик с сильными балмеровскими линиями. И вот здесь оказалось самое удивительное: на самом деле в спектрах нет даже намека на эмиссию [OII], нет и соответствующего ультрафиолетового потока! Значит, на самом деле в рассматриваемых галактиках при огромном числе А-звезд вообще нет звезд классов О, В!

Как же объяснить столь невероятную звездную смесь в галактиках скопления ЗС 295? Обсудив различные возможности, Дресслер и Ганн пришли к следующей картине. Примерно 10—11 миллиардов лет назад в этих галактиках родилось около 80% наблюдаемых сейчас звезд, и на четыре миллиарда лет звездообразование «выключилось». Значительная часть звезд за время порядка $5 \cdot 10^9$ лет, т. е. к моменту наблюдения (а мы видим ЗС 295 таким, каким это скопление было около 5 миллиардов лет назад), стали красными гигантами. За 1 миллиард лет до момента наблюдения, т. е. около $6 \cdot 10^9$ лет назад, произошла новая и короткая вспышка звездообразования, которая за время не более чем $5 \cdot 10^8$ лет дала остальные 20 % звезд. Затем звездообразование опять «выключилось» и «не работает» уже около полу-миллиарда лет.

Эта картина объясняет все особенности трех необычных галактик ЗС 295. Рождение большей части звезд в эпоху $(10—11) \cdot 10^9$ лет назад требуется, чтобы объяснить возникновением красных гигантов не слишком голубой цвет галактики. Мощная вспышка звездообразования спустя примерно $5 \cdot 10^9$ лет необходима, чтобы появлением большого числа звезд ранних спектральных классов объяснить интенсивность балмеровских линий. Новая остановка звездообразования нужна для того, чтобы «вымиранием» самых ранних звезд — звезд О, В — объяснить слабость ультрафиолетового излучения и отсутствие эмиссионных линий OII в спектре. Поскольку звезды АВ живут около $1 \cdot 10^9$ лет, а О, В — менее $5 \cdot 10^8$ лет, получаются довольно точные границы начала и конца вспышки звездообразования.

Можно ли считать, что все галактики эпохи, отстоящей от нас на 5—7 миллиардов лет в прошлом, резко отличаются от современных галактик? Относится ли эта временная граница, достигнутая современной наблюдательной техникой, уже к той области, где происходило основное звездообразо-

вание в галактиках? Большая доля голубых галактик, обнаруженная у скоплений с $z \approx 0,5$, показывает, что $(5—7) \times 10^9$ лет назад звездообразование действительно было необычно активным. В скоплениях ЗС 295 ($z=0,46$) и С1 0024+1654 ($z=0,39$) доля голубых галактик превышает 20%, тогда как в близких скоплениях она меньше 5%. Но в то же время в скоплении С1 0016+16 ($z=0,54$), несмотря на то, что мы наблюдаем его в еще более раннюю эпоху, голубых галактик нет вообще! Поэтому, увы, на $z=0,5$ мы увидели, по-видимому, только отдельные и притом последние отблески того грандиозного процесса, который мы называем основным звездообразованием. Даже в только что описанных галактиках скопления ЗС 295 большая часть звезд уже старая, они родились за миллиарды лет до того, как мы «добрались» до них. Значит, для того, чтобы увидеть рождение звездной Вселенной, рождение звездного мира галактик, надо идти еще дальше по шкале красных смещений, забираться в еще более глубокое прошлое Вселенной, уходить к еще более далекому ее окраинам.

Но здесь возникает вопрос: а как найти галактики с большими красными смещениями? Ведь даже самые массивные и яркие системы из-за большой удаленности выглядят чрезвычайно слабыми объектами, на пределе досягаемости самой совершенной астрономической техники. Если просто заняться экстремально слабыми объектами, с надеждой обнаружить среди них далекие галактики, то мы рискуем потратить огромное количество ценнейшего наблюдательного времени и тем не менее не найти ни одной такой галактики. Действительно, среди слабых объектов много звезд нашей Галактики, а также карликовых галактик, слабых из-за низкой светимости и большой удаленности от Солнца. А чтобы убедиться, что перед нами галактика с большим красным смещением, а не звезда или карликовая система, надо получить хороший спектр объекта и определить красное смещение. Но мы только что рассказали, насколько сложна, трудоемка и просто дорогостояща эта работа! Значит, этот метод не очень хорош.

Есть другая возможность. Радиоастрономические обзоры неба, выполненные за последние десятилетия, выявили огромное количество неотожествленных источников радиоизлучения, не совпадающих ни со звездами, ни с известными галактиками. Звезды очень слабо излучают в радиодиапазоне, поэтому среди этих источников если и есть, то чрезвычайно мало звезд, невидимых из-за своей удаленности. Но вот среди галактик есть чрезвычайно мощные радио-

источники, и их радиоизлучение регистрируется без затруднений, даже если галактика столь далека, что невидима в оптическом диапазоне. При этом радиоизлучающие галактики являются, как правило, массивными, гигантскими звездными системами.

Вывод ясен: вероятность найти далекую галактику среди неотождествленных радионисточников велика, и имеет смысл тратить наблюдательное время на поиск связанных с ними звездных систем, на получение их оптических спектров.

По этому пути в основном и пошли астрономы, охотящиеся за самыми далекими галактиками. И «чудеса» не заставили себя ждать! Х. Спинрад и С. Дьерговски (США) среди радионисточников каталога 3С открыли более десятка галактик с красными смещениями $z \geq 1$, получив для них хорошие спектры. Ими оказались невероятно слабые в оптическом диапазоне системы: видимые звездные величины лежат у них в интервале $m_V = 22^m - 24^m$. Рекордно далеким среди этих галактик стал объект 3С 256 с красным смещением $z = 1,8$.

Что же нового удалось увидеть в спектрах столь далеких галактик? Совершенно необычна сильная светимость в эмиссионных линиях ионов кислорода, углерода, азота и других элементов. У галактики 3С 256 светимость только в линиях иона кислорода ОII составляет $\sim 9 \cdot 10^{43}$ эрг/с. Это столько же, сколько излучают сегодня гигантские галактики с массой $M \approx 10^{11} M_\odot$ во всем диапазоне спектра электромагнитных волн!

Известно, что в эмиссионных линиях излучают ядра сейфертовских галактик, радиогалактик, некоторых нормальных спиральных галактик. В отличие от этого, эмиссионные области галактик Спинрада и Дьерговски имеют гигантские размеры. Так, у галактики 3С 324 с красным смещением $z = 1,2$ размер этой области равен 30 кпк. Излучающий ионизованный газ имеет массу $10^8 M_\odot$; он заключен в диске, вращающемся со скоростью ~ 650 км/с, при этом облака газа имеют и хаотические скорости порядка сотен километров в секунду. А в галактике 3С 256 размеры излучающей области и масса ионизованного газа во много раз больше, чем у 3С 324. Ничего похожего в мире галактик астрономы до сих пор не наблюдали! Картина эта столь поразительна, что потребуются, наверное, немало времени, чтобы разобраться в ней; вполне возможно, что именно так и выглядит галактика в период основного звездообразования, когда невероятно большое количество молодых мас-

сивных звезд в состоянии ионизовать гигантские массы газа во всем объеме системы.

Конечно, то, что мы рассказали, это лишь небольшая часть информации, заключенная в спектрах галактик Спинрада — Дьерговски. Удивляет, например, еще вот что. Можно было бы думать, что рассматриваемые красные смещения соответствуют эпохе формирования самых первых звезд, которые в наши дни принадлежат к старейшим звездным населением галактик. Тем не менее, судя по сильным линиям кислорода, магния, других тяжелых элементов, химический состав этих систем вряд ли отличается от современного, солнечного химического состава. Значит, основное обогащение тяжелыми элементами произошло, по-видимому, еще раньше, еще ближе к началу Вселенной, следовательно, тогда еще меньше времени можно «выделить» на стадию производства тяжелых элементов. Когда же мы увидим гигантские галактики, в которых рождается бедное металлами звездное население, такое как шаровые скопления и субкарлики гало нашей Галактики?

Возможно, первая галактика в столь ранней фазе эволюции была обнаружена в 1985 г. Дьерговски, Спинрад и их коллеги применили еще один метод поиска далеких звездных систем, который, по-видимому, привел к открытию самой далекой галактики. Идея в следующем. Есть основания считать, что квазары находятся в скоплениях галактик. Если сфотографировать участок неба, где находится квазар с большим красным смещением, то в таком случае на фотографию попадут другие галактики этого скопления, с такими же, как у квазара, красными смещениями. Дьерговски с коллегами сфотографировал небольшую область, в центре которой находится квазар с красным смещением $z = 3,214$, сначала в широком диапазоне оптического спектра, а затем — в узком диапазоне, внутри которого видна смещенная в красную сторону на величину $z = 3,2$ линия атома водорода L_α . Ожидалось, что если квазар принадлежит скоплению или группе молодых галактик, то галактики должны характеризоваться сильным излучением эмиссионных линий. Результат этого красивого и изящного эксперимента стал, несомненно, одним из выдающихся событий астрономии последних лет. При фотографировании с узким фильтром, пропускающим только смещенную линию L_α , все объекты — за исключением одного — стали гораздо слабее по сравнению с изображениями на фотографии с широким фильтром и даже исчезли совсем, хотя экспозиция была значительно дольше. Но один объект стал выглядеть

гораздо ярче! Это означало, что он сильно излучает в линии L_{α} , смещенной в красную сторону на величину $z=3,2$.

Спектр этого объекта показал, что линия намного уже, чем у квазаров; ее ширина типична для эмиссионных областей нормальных галактик. Отсюда был сделан вывод, что обнаружена самая далекая галактика с красным смещением $z=3,218$.

Значение этого открытия трудно переоценить. Если это галактика, то она, как и предыдущие галактики Спинрада — Дьерговски, сильно отличается от давно известных нам звездных систем. Например, ее светимость только в одной линии L_{α} равна 10^{44} эрг/с — примерно такая, как полная светимость нашей Галактики!

Возраст галактики с $z=3,218$ составляет всего около 5% от возраста современных галактик, т. е. ей всего около миллиарда лет! В нашей Галактике, когда ей было столько же лет, рождались звезды гало.

Много замечательных открытий на счету астрономии последних десятилетий. Но происходящее у нас на глазах открытие галактик на краю Вселенной станет одной из наиболее выдающихся страниц истории астрономии: ведь мы начинаем видеть рождение звездной Вселенной — а что может сравниться по грандиозности с этим событием?

3. Спектры поглощения квазаров, или по пути к окраинам Вселенной

Для астрономов квазары интересны не только как любопытный объект изучения, но и как «инструмент» исследования: они дают возможность «прощупать» все гигантское пространство между Галактикой и квазарами, проглядеть его на просвет и увидеть вещество, которое само по себе не светится. На долгом пути к наблюдателю, к нашей Галактике, свет квазара проходит огромное расстояние, и велика вероятность того, что по дороге он наткнется на протяженные газовые короны галактик, на облака разреженного вещества, которые не успели превратиться в галактики, на выброшенный из галактик и из самих квазаров газ. Проходя через газовую среду, свет будет поглощаться в ней, и в спектре квазара появятся соответствующие линии поглощения. Очевидно, эти линии несут информацию о поглощающем веществе: по красному смещению мы определим, где оно находится, сами линии расскажут о химическом составе вещества, подскажут его температуру, профили линий позволят рассчитать скорости движения газа. При этом

величина красного смещения линий поглощения z_a обычно меньше, чем у эмиссионных линий самого квазара z_e , т. е. $z_a < z_e$ (рис. 32).

Такие линии действительно обнаружены. Их исследование сильно обогатило наши знания о разреженном веществе на окраинах Вселенной, о котором никаким другим образом мы, пожалуй, не смогли бы узнать. Но эти же исследования принесли немало загадок.



Рис. 32. Схема формирования линий поглощения в спектре квазара при прохождении излучения через облака газа и газовые оболочки галактик

Линии поглощения в спектрах квазаров были разделены на четыре типа (рис. 33). Тип А — это очень широкие линии; похоже, они возникают в веществе, которое выбрасывается из квазара с субсветовой скоростью, вплоть до 0,1 скорости света. Тип В — резкие узкие линии, красные смещения которых лишь незначительно отличаются от красного смещения эмиссионных линий квазара, так что различие в скоростях квазара и поглощающего вещества не превышает 3000 км/с (у этого типа может быть $z_a > z_e$). Обычно это линии трижды ионизованного иона углерода CIV; часто наблюдается целая система этих линий с различающимися красными смещениями. Тип С и тип D — это узкие линии с величинами z_a , существенно меньшими, чем красное смещение квазара z_e . При этом тип С включает в себя линии металлов, а тип D — большое количество линий L_{α} атома водорода, различающихся только величиной красного смещения. Их так много, что в спектре они образуют частокол, который называют «лес лайман-альфа».

О чем же говорят эти линии? Наиболее правдоподобная гипотеза о природе линий типа В связана с двумя их свойствами. Во-первых, поскольку в спектре есть линии как с $z_a < z_e$, так и с $z_a > z_e$, то поглощающие облака газа движутся как к квазару, так и от него. Во-вторых, скорости этих движений, определяемые разностью $|z_a - z_e|$, сопоставимы

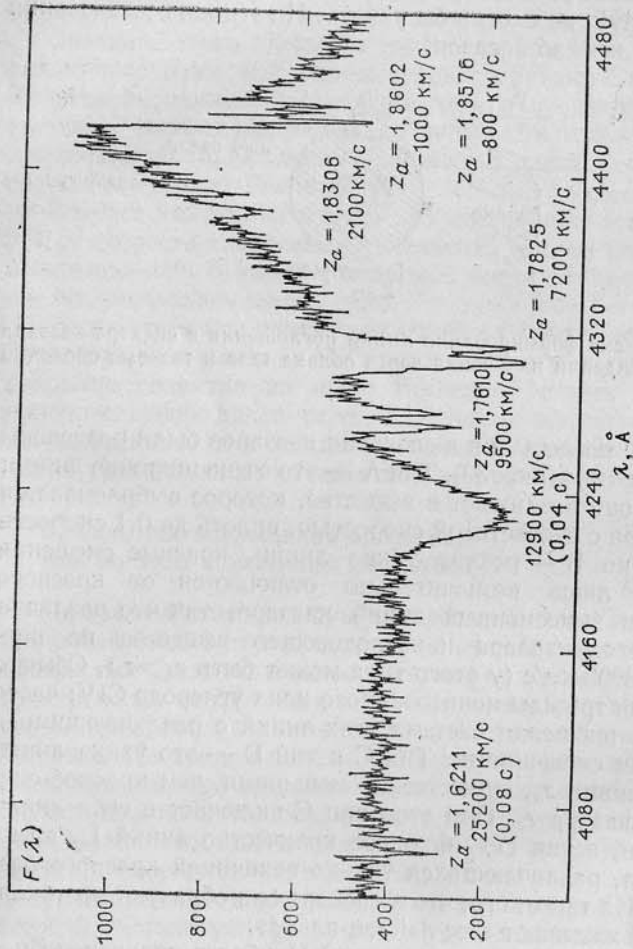


Рис. 33. Спектр квазара 00135—4001. Отмечены линии поглощения иона углерода CIV и указаны соответствующие красные смещения z_a поглощающих облаков газа; приведены скорости облаков. По классификации Р. Веймана линия $\lambda 4230$ относится к типу А, пара линий с $z_a = 1,86$ — к типу В, линии с $z_a = 1,62; 1,76; 1,78; 1,83$ — к типу С

со скоростями движения галактик внутри скоплений, $v \approx 1000$ км/с. Поэтому возникло естественное предположение, что эти линии формируются в газовой компоненте галактик скопления, к которому принадлежит и квазар. Единственное «но» состоит в том, что близкие квазары, имеющие малые красные смещения, избегают скоплений галактик; они наблюдаются иногда в группах галактик, но в таких группах скорости движения очень малы.

Это заставляет считать, что по каким-то причинам квазары исчезают в богатых скоплениях галактик к моменту, когда красное смещение $z \leq 0,4$, но вне скоплений продолжают существовать. В то же время на ранних стадиях Вселенной, при $z \geq 1,2$, они были обычным явлением в богатых скоплениях. Если это так, то у нас появляется еще один ключ к разгадке природы квазаров, их происхождения и их связи с галактиками и скоплениями; кроме того, в этом случае линии типа В дают уникальную возможность определения химического состава разреженного вещества галактик, существовавших 10 миллиардов лет (и более) назад, т. е. находившихся в самом начале своей эволюции.

Происхождение линий металлов с красным смещением, заметно меньшим, чем у квазара, связывают иногда с поглощением в облаках газа, которые выбрасывает квазар со скоростью, близкой к скорости света. Однако более убедительной сейчас считается гипотеза, согласно которой линии возникают в газе галактик, находящихся между нами и квазаром. Но вот что любопытно. Эти линии совсем не похожи на те, которые возникают в межзвездном газе известных, видимых галактик. Поскольку красные смещения этих линий обычно велики по сравнению с величинами z наблюдаемых галактик, то был сделан вывод, что физические условия в тех далеких, находящихся глубоко в прошлом галактиках существенно отличаются от условий в современных звездных системах.

Первое, почти несомненное доказательство того, что линии поглощения квазаров формируются в газовых дисках галактик, было получено лишь в 1985 г. Французский астроном Ж. Бергерон с коллегами сфотографировали участок неба вокруг квазара PKS 2128—12, имеющего красное смещение $z = 0,50$. Было известно, что в его спектре есть линия поглощения иона магния MgII с красным смещением $z = 0,43$. Фотография, полученная с помощью ПЗС-матрицы на телескопе с диаметром зеркала 3,6 метра в Южной Европейской обсерватории, позволила увидеть, что на угловом расстоянии всего лишь 8,6 секунды от квазара находится

чрезвычайно слабая галактика: ее видимая звездная величина равна $m_V = 21,5^m$. Затем были получены спектры этой галактики, что потребовало двухчасовой экспозиции на этом телескопе (два раза по 1 часу). В спектре были обнаружены линии эмиссии иона кислорода ОII $\lambda = 3727 \text{ \AA}$ и водорода H, а также звездные линии поглощения H и K кальция. У всех линий красное смещение оказалось таким же, как в спектре поглощения квазара, т. е. $z = 0,43$! На расстоянии, соответствующем $z = 0,43$, центр галактики находится в 64 кпк от луча света, идущего к нам от квазара; при этом радиус звездного диска галактики равен 15 кпк. В результате получается, что эта галактика обладает гигантским мощным газовым диском, который простирается как минимум в 4 раза дальше, чем звездный диск! Сама галактика похожа на наш Млечный Путь: у нее такой же звездный размер, примерно такая же абсолютная звездная величина ($M_V = -20,8^m$). Но в нашей Галактике газ практически весь ограничен размерами звездного диска или чуть большими — но не в 4 раза! Возможно, это говорит о том, что еще 5—7 миллиардов лет назад газовые диски спиральных галактик были гораздо обширнее и мощнее.

Вывод о том, что в прошлом галактики с протяженными газовыми оболочками были обычным явлением, подтверждается быстрым увеличением количества абсорбционных систем в спектре (т. е., предположительно, галактик на луче зрения) при переходе к квазарам с большим красным смещением, особенно при $z > 1$. При этом высокая степень ионизации в поглощающих облаках газа с $z > 1$ свидетельствует о гораздо более высокой интенсивности ионизирующей радиации в эпоху $z > 1$. Таким образом, изучение спектров поглощения квазаров уже сейчас показало, что физические условия, да и сами галактики 5—10 миллиардов лет назад значительно отличались от современных.

Открытие двух разных типов спектров поглощения — одного с лаймановскими линиями, другого — с линиями тяжелых элементов — породило надежду увидеть в конце концов «чистое» космологическое вещество, химический состав которого еще не «загрязнен» тяжелыми элементами в галактиках или квазарах. С облаками, дающими линии ионов углерода CIV, магния MgII и т. д., все ясно — их вещество уже прошло термоядерную переработку. А вот облака, где виден только «лес» линий L_{α} , очень уж похожи на первичное космологическое вещество, не содержащее тяжелых элементов. Если бы это было действительно так, то был бы получен сильнейший аргумент в пользу существ-

вующей сейчас картины космологического нуклеосинтеза и происхождения тяжелых элементов в галактиках. Ведь несмотря на ее убедительность, в ней есть пробелы, которые хотелось бы устранить. Одним из них является то, что мы до сих пор нигде не обнаружили вещества, состоящего только из водорода и гелия, т. е. с химическим составом, созданным космологическим нуклеосинтезом в горячей Вселенной.

Увы, надежда на спектры с «лаймановским лесом» пока не оправдалась. Там, где можно обнаружить, в них все-таки были найдены линии кислорода, углерода, азота с теми же красными смещениями, что и у линий L_{α} . Значит, и в этих облаках вещество подверглось ядерной переработке, т. е. «чистое» космологическое вещество продолжает оставаться гипотетическим.

И все же спектры типа D с «лаймановским лесом» дали важную информацию о химическом составе облаков газа на больших красных смещениях. Содержание тяжелых элементов в них на один-два порядка меньше солнечного. Оно примерно такое же, как в шаровых скоплениях нашей Галактики, поэтому, возможно, мы обнаружили вещество, прошедшее лишь первый цикл обогащения. Из этого вещества 15—18 миллиардов лет назад в галактиках сформировалось бедное металлами звездное население II. В заметных количествах эти облака дожили, по-видимому, до наших дней, и сейчас мы видим их в начальных стадиях превращения в звездные системы в форме гигантских внегалактических зон HII с дефицитом металлов («ленивые» галактики), содержащих, по-видимому, только молодые звезды.

В отличие от узких линий поглощения спектров типа B, C, D, широкие линии спектров типа A формируются, несомненно, в веществе, окружающем квазар. Об этом говорит тот факт, что верхняя граница красного смещения, определяемая границей линии со стороны длинных волн, почти совпадает с красным смещением эмиссионных линий квазара. Коротковолновая граница линии соответствует разности скорости квазара и скорости поглощающего вещества порядка 0,1 скорости света. Эти свойства широких линий естественно приводят к картине, согласно которой вокруг квазара, в радиусе примерно 1 кпк от его центра, мы наблюдаем сброс оболочки или отдельных облаков, ускоряемых лучевым давлением или «квазарным» ветром до субсветовых скоростей. Возможно, эти облака находятся в диске спиральной галактики, в центре которой расположен квазар (см. гл. 8). Есть оценки плотности ве-

щества на луче зрения; она составляет 10^{19} — 10^{21} частиц/см², что типично для межзвездных облаков нашей Галактики.

Хотя квазаров с широкими линиями поглощения мало, всего 1—10% общей их численности, они представляют огромный интерес, поскольку могут рассказать о свойствах самого квазара, об окружающем его веществе галактики. Пока с этими линиями связано больше вопросов, чем твердо установленных выводов, и предстоит еще большая работа по анализу заключенной в линиях информации. Любопытно, что столь широкие линии не обнаруживаются в спектрах сейфертовских галактик и квазаров с небольшими красными смещениями.

Глава 8

АКТИВНЫЕ ЯДРА, КВАЗАРЫ, ЛАЦЕРТИДЫ

По определению, галактики — это звездные системы. Помимо звезд в них есть, обычно в небольших количествах, газ, пыль, магнитное поле, космические лучи; но основная масса и энергетика галактики обязаны звездам — таково было еще 15—20 лет назад «классическое» представление об этих системах. Теперь же мы знаем, что это не совсем так, а во многих случаях — совсем не так. В 70—80-х годах в галактиках была обнаружена скрытая масса, превышающая раз в десять по массе и размерам звездную компоненту. А роль главного производителя энергии у некоторых систем оказалась связанной не со звездами, а с центральным источником в ядре, имеющим, наоборот, крошечные по масштабам галактики размеры. Активные ядра галактик — к ним относятся и квазары — стали новым классом астрономических объектов. Это самые мощные и самые беспокойные объекты Вселенной.

1. Сейфертовские галактики и радиогалактики: две формы активности ядер

Открытие необычных явлений в центре некоторых галактик справедливо связывают с именем американского астронома К. Сейферта. В 1943 г. он обнаружил в спектрах двенадцати галактик (среди них NGC 1068, NGC 1275) одну особенность, которой не было у других галактик, а именно — очень широкие эмиссионные линии водорода, гелия, иногда ионизованного железа FeII. Обычно эмис-

сионные линии в галактиках обусловлены ионизованным газом вокруг ярких горячих звезд спектральных классов O, B (зоны HII), а также самими звездами O, B. При этом ширина линий отражает скорости звезд в галактиках, в соответствии с эффектом Доплера. Обычно они не превосходят двухсот километров в секунду. Линии, которые обнаружил Сейферт, имели ширину, соответствующую нескольким тысячам километров в секунду! Сейчас известны случаи, когда ширина линии «равна» 30 000 км/с, т. е. составляет 10% скорости света!

Конечно же, столь большое значение ширины линий связано не с движением звезд и их зон HII, а с движением только облаков излучающего газа. Но скорости в тысячи километров в секунду никто никогда не наблюдал в галактиках; откуда же они взялись у этих облаков?

И еще одна особенность широких линий галактик Сейферта: они соответствуют разрешенным переходам электронов в атомах и ионах, тогда как типичные зоны HII светятся в основном в запрещенных линиях. Это различие отражает разную плотность газа. В очень разреженных облаках возбужденные электронные состояния с большим временем жизни спокойно существуют, пока не излучат квант света — так рождаются запрещенные линии. В плотных облаках такие состояния освобождаются от своего энергетического «бремени» не излучением кванта, а при столкновениях возбужденного атома, например, со свободным электроном, которому и отдается лишняя энергия. Поэтому в плотных облаках возможно излучение только разрешенных линий, т. е. таких, которые соответствуют возбужденным состояниям с очень малым временем жизни, меньшим, чем время между столкновениями частиц. Значит, разрешенные линии и отсутствие запрещенных линий указывает на чрезвычайно большую плотность газа, совершенно не сравнимую с плотностью обычных зон HII.

Запрещенные линии эмиссии в спектре галактик Сейферта тоже есть, но они оказались узкими. Поэтому с большими скоростями движутся только очень плотные облака. Но и у запрещенных линий «узость» относительна: она соответствует скоростям порядка 500 км/с, т. е. значительно больше, чем у обычных зон HII в галактиках. В запрещенных линиях светится большое количество элементов и их ионов, так же как и в зонах HII: сера S, азот N, кислород O, неон Ne и другие. Но, опять же в отличие от зон HII, встречаются линии ионов необычайно высокой степени ионизации, например, десятикратно ионизованного железа FeXII!

В 1974 г. Э. Е. Хачикян (Бюраканская обсерватория) вместе с американским астрономом Д. Видманном обратили внимание, что по характеру линий галактики Сейферта можно разделить на два типа. Галактики первого типа — их обозначают Sy 1 — имеют широкие разрешенные и узкие запрещенные линии. Собственно о них мы и говорили выше. Но есть системы, у которых и те и другие линии имеют одинаковую ширину, соответствующую скоростям до 500 км/с, т. е. одинаково узкие. Такие галактики обозначают Sy 2. Обычно ядра галактик Sy 1 светят сильнее, чем звездная компонента этих систем, а у галактик Sy 2 звездная компонента доминирует.

Галактики Сейферта не сразу привлекли к себе внимание, и вся описанная картина стала вырисовываться позднее. Вместе с этим стала осознаваться загадочность явлений в ядрах таких галактик. Процессы, которые в них идут, столь не похожи на все известное о других галактиках, что системы, открытые Сейфертом, были выделены в отдельный класс и стали называться его именем: *сейфертовские галактики*; часто их называют просто *сейфертами*.

Так были открыты первые галактики с активными ядрами. В дальнейшем оказалось, что, как правило, сейферты — это гигантские спиральные галактики, и что наряду с широкими линиями эмиссии в спектре они имеют еще ряд необычных свойств. Их ядра являются источниками сильного излучения нетепловой, следовательно, незвездной природы, причем в очень широком диапазоне спектра электромагнитных волн: они излучают радиоволны, инфракрасные, ультрафиолетовые и рентгеновские кванты. Но, пожалуй, самое необычное их свойство — огромная мощность центрального источника: у наиболее энергичных сейфертов полная светимость ядра значительно превосходит суммарную светимость сотен миллиардов звезд всей галактики. При этом зачастую основная энергия излучается в инфракрасном диапазоне. Так, оптическая светимость ядра NGC 1068 равна $L_{\text{опт}} \approx 5 \cdot 10^{41}$ эрг/с, а инфракрасная — $L_{\text{ик}} \approx 2 \times 10^{44}$ эрг/с; полная оптическая, т. е. звездная светимость всей галактики равна примерно 10^{44} эрг/с ($M_V = -21,3^m$). Другими словами, только в инфракрасном диапазоне ядро излучает больше, чем все звезды галактики. Много энергии излучается и в рентгеновском диапазоне. У галактик Sy 1 рентгеновская светимость в среднем лишь в несколько раз меньше инфракрасной.

Спектр излучения центрального источника определяется, скорее всего, целым рядом физических процессов. Среди

них — тепловое излучение горячей плазмы, синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитных полях, обратный комптон-эффект (в частности, по-видимому, важен процесс, когда квант синхротронного излучения вновь взаимодействует с релятивистским электроном и увеличивает свою энергию; так из низкочастотного синхротронного излучения может генерироваться рентгеновская часть спектра).

Три составляющие спектра сейфертовских галактик — непрерывный спектр, широкие линии, узкие линии, как показывает анализ, соответствуют трем совершенно разным частям галактики. Основной генератор энергии, главный «двигатель» всех процессов в ядре — это центральный источник, который представляет собой, скорее всего, гигантскую черную дыру (ее масса должна быть порядка $10^8 M_{\odot}$) с аккреционным диском (см. гл. 9). В этой области формируется непрерывный спектр.

Вокруг центрального источника расположена область формирования широких линий, ее размеры $\sim 0,1$ пк. Здесь облака газа «перехватывают» часть излучения центрального источника, нагреваются и ускоряются до скоростей порядка 10^3 — 10^4 км/с. Полная масса облаков незначительна, 10 — $100 M_{\odot}$, но именно они дают наиболее характерную деталь спектра — широкие линии эмиссии. Существует точка зрения, что большая скорость облаков отражает не разлет газа под действием лучевого давления центрального источника, а вращение в его гравитационном поле. Действительно, если подставить в формулу для скорости вращения

$$v_{\text{rot}} = (GM/R)^{1/2}$$

значения $M = 10^8 M_{\odot}$ и $R = 0,1$ пк $= 3 \cdot 10^{17}$ см, то получим $v_{\text{rot}} \approx 2000$ км/с, т. е. типичную скорость в области широких линий. Но картина разлета сейчас, пожалуй, более популярна. Впрочем, возможно, что важны оба фактора.

Узкие запрещенные линии формируются значительно дальше от центра, размеры области узких линий в десятки раз больше размеров области широких линий. Здесь меньше давление, меньше плотность газа в облаках и в целом физические условия гораздо ближе к условиям зон III вокруг ярких звезд спектральных классов O, B. Но нагрев и ионизация облаков газа обусловлены излучением все того же центрального источника.

Галактики Сейферта составляют всего 1% среди гигантских спиральных галактик, так что это довольно редкие

объекты. Столь же редким оказался другой класс галактик с активными ядрами — *радиогалактики*.

Уже первые наблюдения с помощью радиотелескопов открыли большое количество отдельных источников мощного радиоизлучения, многие из которых оказались связанными с гигантскими эллиптическими галактиками. Это и были радиогалактики.

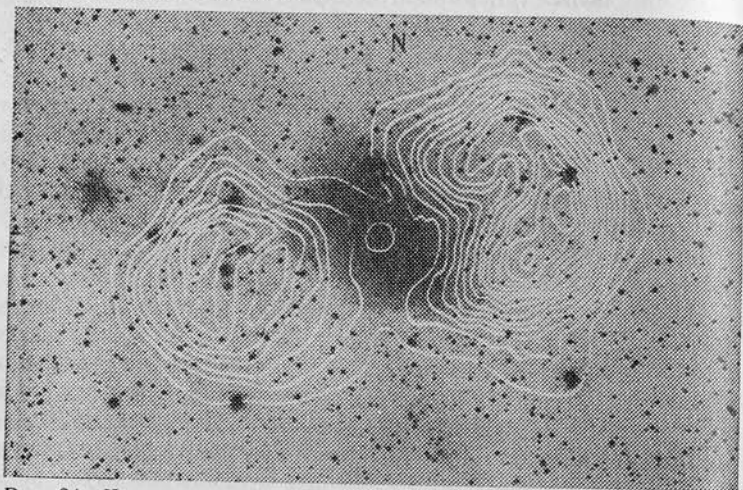


Рис. 34. Карта радиоизлучения галактики NGC 1316 (радиогалактика Печь А). Расстояние между излучающими областями более 300 кпк (см. также рис. 13 и 14)

Удивительна структура их радиоизлучающей области. Наряду с центральным источником радиоизлучения, «классические» радиогалактики имеют протяженные, размером иногда в сотни килопарсек области мощного радиоизлучения, зачастую симметрично расположенные по обе стороны от родительской галактики. Радиоизображение такой системы напоминает пропеллер самолета: в центре находится звездная галактика, от которой отходят длинные радиоизлучающие «лопасти» с характерным расширением на концах. Во многих случаях большая часть радиоизлучения рождается именно здесь, вдали от центральной звездной системы. При этом интенсивность радиоизлучения у мощных источников достигает значения 10^{45} эрг/с, т. е. их радиосветимость во многие десятки раз больше полной светимости нашей Галактики! А в целом сейчас радиогалактиками называют системы, у которых радиосветимость $L_r \geq 10^{40}$ эрг/с (рис. 34—36).

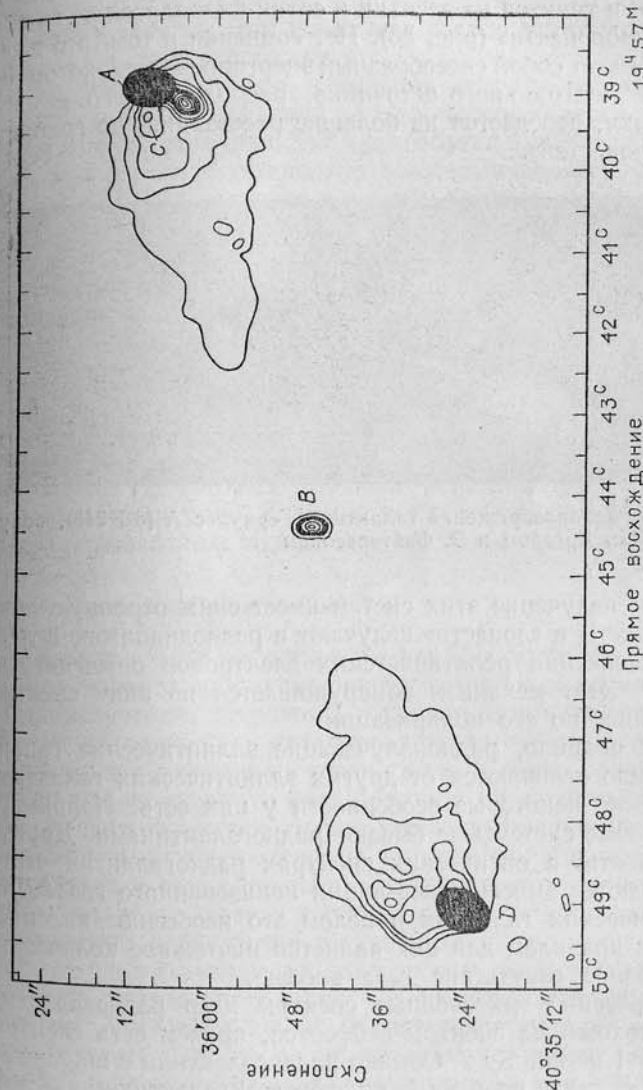


Рис. 35. Радиогалактика Лебедь А. Она имеет резко выраженную двойную структуру с чрезвычайно яркими «горячими пятнами» А и В; центральный источник радиоизлучения В относительно слаб

Одной из самых любопытных структурных деталей радиогалактик являются *джеты*, или *струи*. Эти длинные, тонкие образования начинаются в ядре родительской галактики и тянутся на десятки и сотни килопарсек до границы «радиолопасти» (рис. 36). Нет сомнения в том, что джет представляет собой своеобразный энергопровод, по которому энергия центрального источника, расположенного в ядре галактики, передается на большие расстояния, до границы «радиолопастей».

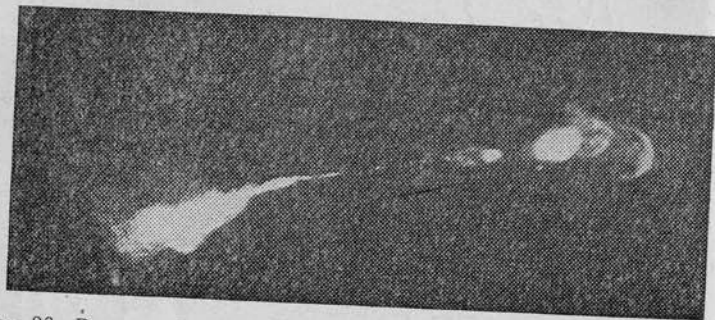


Рис. 36. Радиои изображение галактики Геркулес А (3С 348), полученное Дж. Дреером и Э. Фейгельсоном

Радиоизлучение этих систем имеет синхротронную природу: джеты и «лопасти» излучают в радиодиапазоне вследствие движения релятивистских электронов в магнитных полях. Этот механизм обнаруживается по виду спектра излучения, по его поляризации.

Как правило, радиоизлучающие эллиптические галактики мало отличаются от других эллиптических галактик. Но все же некоторые особенности у них есть. Например, карликовые системы не бывают радиогалактиками. Другая особенность: в оптических спектрах радиогалактик часто наблюдаются эмиссионные линии ионизованного газа. Для эллиптических галактик в целом это необычное явление, так как правилом для них является ничтожное количество или полное отсутствие газа вообще.

Оптические эмиссионные спектры ядер радиогалактик часто похожи на спектры сейфертов, причем есть спектры типа Sy 1 и типа Sy 2. Обычно радиогалактики с широкими линиями, как у ядер Sy 1, являются N-галактиками — так называют чрезвычайно компактные системы, у которых свет звездной компоненты «тонет» в излучении необычно яркого звездообразного ядра.

В свою очередь ядра сейфертовских галактик заметно излучают в радиодиапазоне — значительно сильнее, чем нормальные галактики (но все же слабее, чем радиогалактики).

Таким образом, эти два класса систем имеют ряд общих признаков активности ядер.

Необычные свойства сейфертов и радиогалактик, их сходство и различие задали массу вопросов. Какова природа центрального источника? Откуда берутся в сейфертах огромные массы газа с невероятно большими скоростями? Как устроены и как возникают джеты? Почему радиоизлучающие области радиогалактик имеют характерную форму «лопастей»? Почему проявление активности центрального источника в сейфертах и радиогалактиках столь различно? Каким образом этот источник, невероятно малый по размерам, «знает» о структуре родительской галактики в гигантских масштабах и отличает спиральную галактику (активность ядра типа сейферта) от эллиптической (активность ядра типа радиогалактики)?

Сейферты и радиогалактики оказались не единственными системами, в которых главный источник энергии имеет незвездную природу. К ним примкнули квазары и лацертиды — аналогичные, только гораздо более мощные объекты.

2. Квазары и лацертиды

Квазары были открыты в начале 60-х годов. За несколько лет до этого, при исследовании источников космического радиоизлучения, астрономы обратили внимание, что положение некоторых из них совпадает на небесной сфере со слабыми звездочками голубого цвета. К этому времени уже стало привычным, что большая часть радиоисточников — это галактики и что среди звезд радиоисточников нет. Поэтому возможное открытие настоящих радиозвезд сразу привлекло к себе внимание. Были получены спектры этих объектов. И тут первая неожиданность: спектры оказались совершенно непохожими на спектры звезд. Более того, в них не удалось узнать ни одну из спектральных линий, не удалось отождествить линии ни с одним химическим элементом! Лишь в 1963 г. М. Шмидт решил загадку спектров «радиозвезд». Предположив, что сильные линии в спектре слабой «звезды» ($m_V = 13^m$), совпадающей с радиоисточником 3С 273, являются линиями эмиссии наиболее распространенного атома во Вселенной — атома водорода, он тут же отождествил все основные линии в спектре.

И здесь вторая неожиданность: отождествление оказалось возможным только после того, как М. Шмидт предположил, что спектр атома водорода сдвинут в красную сторону на огромную величину. Она оказалась равной $z=0,158$.

Явление сдвига линий в красную сторону, т. е. увеличение длины волны данной спектральной линии, хорошо известно астрономам по спектрам далеких галактик: это знаменитое красное смещение, открытое более полувека назад американским астрономом Э. Хабблом. Оно отражает разлет, разбегание галактик, т. е. расширение Вселенной, и потому было названо космологическим.

Красные смещения радиоисточников были интерпретированы в первую очередь так же, как и для далеких галактик, т. е. как свидетельство удаления этих объектов вследствие расширения Вселенной. В этом случае по величине z можно определить не только скорость удаления объекта v (согласно формуле эффекта Доплера при $z \ll 1$, $v = cz$, где c — скорость света), но и расстояние r . В гл. 7 мы видели, что оно выводится непосредственно из закона Хаббла, согласно которому скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее, $v = H_0 r$, где $H_0 \approx 50$ км/(с · Мпк) — постоянная Хаббла (более подробно см. в гл. 7).

Зная расстояние и видимую звездную величину, нетрудно найти абсолютную звездную величину M_v и светимость L . Проведя эту операцию с квазарами, астрономы столкнулись с третьей и наиболее ошеломившей их неожиданностью: эти объекты оказались самыми мощными источниками излучения во Вселенной. Их светимость достигает в некоторых случаях значений $L \approx 10^{48}$ эрг/с, что в десятки тысяч раз превышает светимость ярчайших, сверхгигантских галактик! И это при всем при том, что наблюдаются квазары в виде точечных, не имеющих видимых размеров источников — в отличие от галактик, у которых даже в случае больших красных смещений видна их протяженная структура.

Точечные размеры квазаров (из-за этого вначале их иногда называли сверхзвездами) заставили усомниться некоторых исследователей в космологической природе их красных смещений. Возникла гипотеза, что объекты находятся вблизи или даже внутри Галактики, а их большая скорость удаления связана, например, с тем, что они выброшены из Галактики какими-то неизвестными процессами. Согласно другой гипотезе их красное смещение вообще обусловлено огромным гравитационным полем, а не большой скоростью удаления от нас: известно, что если излучение происходит в

гравитационном поле, то спектральные линии также смещаются в красную сторону. Очевидно, что если квазары находятся не на космологических расстояниях, а являются локальными объектами, пусть даже совсем необычными по сравнению с другими звездами Галактики, то исчезает самое поразительное их свойство — огромная светимость, невероятно большое энерговыделение в малых объемах. Однако гипотезы такого рода не выдержали напора огромного количества разнообразных фактов, хлынувших рекой после открытия М. Шмидта. Сейчас мало кто сомневается, что квазары действительно находятся на огромных расстояниях от нашей Галактики и удаляются со скоростью, соответствующей скорости расширения Вселенной.

Но каковы же все-таки физические размеры квазаров? Оценка верхнего предела размеров была получена сразу же вслед за открытием первого квазара, 3С 273. Квазар оказался переменным: его блеск заметно менялся на протяжении нескольких дней. Отсюда следует, что размеры излучающей области не превосходят соответственно нескольких световых дней, и вся гигантская энергия квазара генерируется в ничтожно малом объеме пространства.

Уже на ранних этапах изучения квазаров было обращено внимание на сходство широких эмиссионных линий в их спектрах с аналогичными линиями у ядер сейфертовских галактик. Стала созреть идея о том, что квазары имеют ту же природу, что и ядра сейфертов, и что вообще они представляют собой сверхмощные активные ядра удаленных, молодых галактик. Это резко стимулировало интерес к и без того интересной проблеме исследования галактик с активными ядрами. В итоге обнаружилось много других общих свойств у квазаров и ядер активных галактик: сейфертовских и радиогалактик.

Уверенность в общности этих объектов все усиливалась. Выдающимся результатом астрономии 80-х годов стало по существу прямое доказательство этого факта. Вокруг ряда квазаров были обнаружены протяженные светящиеся оболочки, многие из которых формой и рядом других свойств оказались похожими на спиральные галактики (в некоторых случаях — на эллиптические галактики). Различие между ядром сейфертовской галактики и квазаром, по-видимому, только в их мощности — у квазаров она значительно больше. Впрочем, сейчас известны сейферты, у которых мощность ядра выше, чем у некоторых квазаров, так что это различие потихоньку стирается (но сотрется ли оно до конца?).

В итоге такого развития событий квазары вместе с ядра-

ми сейфертов и радиогалактик стали рассматриваться как объекты одной природы — *активные ядра галактик*.

В этом списке находится еще один класс объектов — *лацертиды*. Их первым представителем стал точечный радиоисточник в созвездии Ящерицы (по латыни Lacerta), который был отождествлен с давно известной переменной «звездой» BL Lac. От нее и пошло название всего класса — лацертиды. А «звезда» оказалась вовсе не звездой, в ее спектре долгое время не могли найти ни одной спектральной линии, ни эмиссионной, ни абсорбционной. В оптической астрономии это вообще из ряда вон выходящее событие!

Другие свойства BL Lac, как и всех лацертид, найденных позже, также оказались необычными. В частности, все они являются сильными радиоисточниками, но спектр радиоизлучения совсем не такой, как у квазаров и радиогалактик: он слабо зависит от частоты («плоский спектр»); и оптическое и радиоизлучение сильно поляризовано; излучение меняется в широких пределах. Квазары и ядра сейфертов также переменны, их яркость может меняться иногда в 5—6 раз. Яркость же лацертид меняется в десятки раз!

Эти свойства делают очевидным, что излучение переменной «звезды» BL Lac имеет незвездную, нетепловую природу. Но что это за объект? Какова его светимость? Чтобы найти ответ на эти вопросы, совершенно необходимо знать по крайней мере расстояние. А как его определить, если в спектре нет ни одной зацепки, которая дала бы хоть какой-то намек на расстояние?

И все же загадка BL Lac и других объектов этого типа была решена, по крайней мере в той степени, в которой она решена для квазаров. У некоторых из них удалось обнаружить чрезвычайно слабые звездные линии поглощения, а также линии эмиссии, и это дало возможность определить красное смещение. Объекты оказались далекими (если считать, что красное смещение имеет космологическую природу), а их светимость сравнимой со светимостью ярчайших галактик. У BL Lac, в частности, $z=0,07$, и светимость соответствует абсолютной величине $M_V=-23^m$, более чем на две звездные величины ярче нашей Галактики.

Мало сомнений в том, что лацертиды родственны по природе квазарам — несмотря на внешнее радикальное различие их спектров. Их объединяет незвездная природа излучения и фантастически мощный источник энергии, заключенной в невероятно малых размерах. Но почему спектры столь непохожи? Ответ на этот вопрос лежит, по-видимому, в физике релятивистских струй (см. раздел 6).

3. Спектральные «портреты» галактик, квазаров, лацертид

С точки зрения наблюдателей главной чертой оптического спектра квазаров, отличающей их от звезд и галактик, является наличие широких эмиссионных линий и отсутствие линий поглощения, типичных для звезд. Эмиссионные линии есть и у галактик, причем у сейфертовских они могут быть

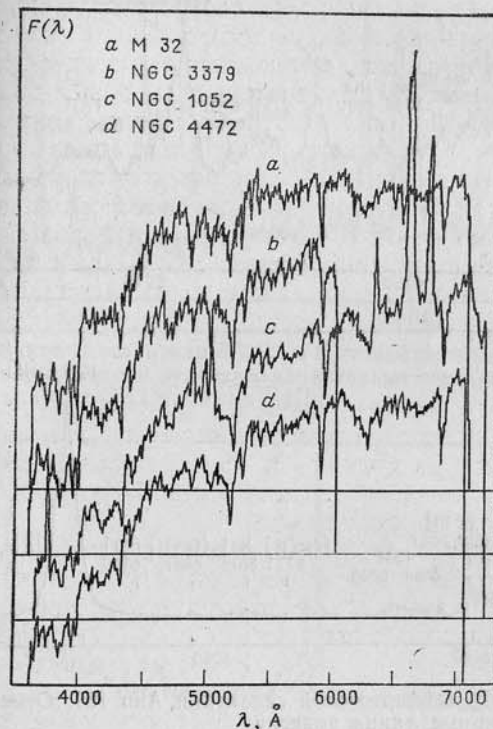


Рис. 37. Спектры четырех эллиптических галактик разных светимостей. Светимость карликовой галактики М 32 в сто раз меньше светимости NGC 4472

столь же широкими, как и у квазаров; но в спектрах галактик всегда есть звездные линии поглощения. Вот по этим признакам спектрального «портрета» и разделяют галактики и квазары (рис. 37—40).

Основные детали спектрального «портрета» галактик и квазаров очень устойчивы. Это видно, например, на рис. 37, где приведены спектры четырех эллиптических галактик;

их светимость различается в 100 раз (от самой яркой NGC 4472 до самой слабой M 32), тем не менее спектры почти повторяют друг друга. В видимой части спектра отчетливо проявляются глубокая линия магния $\text{Mg Ib } \lambda 5180$, линии H и K иона кальция $\text{Ca II } \lambda 3968$ и $\lambda 3934$, полоса G в окрестности $\lambda = 4300 \text{ \AA}$, линии натрия вблизи $\lambda = 5890 \text{ \AA}$

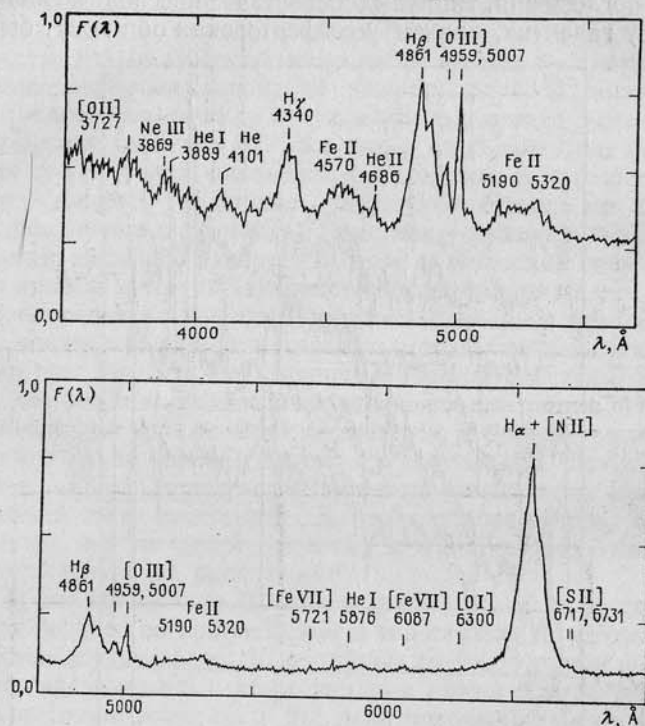


Рис. 38. Спектр сейфертовской галактики ACP 120. Отмечены наиболее характерные линии эмиссии

и другие детали. Для спектров квазаров типичны широчайшие линии эмиссии атома водорода $\text{H}_\alpha \lambda 6563$, $\text{H}_\beta \lambda 4861$, $\text{H}_\gamma \lambda 4340$, сильные линии ионизованного кислорода OIII вблизи $\lambda = 5000 \text{ \AA}$, линии азота; типичен также подъем интенсивности в сторону коротких волн (рис. 40). Он обусловлен широким максимумом в спектре в области между 4000 и 3000 \AA , природа которого до сих пор обсуждается.

Сейфертовские галактики, ядра которых наиболее близки по свойствам к квазарам, имеют и сходный с ними спектральный портрет. В нем выделяются широкие линии эмиссии

водорода, гелия, иногда иона железа Fe II , обнаруживается подъем в сторону коротких волн, который наистро отсутствует у обычных галактик (рис. 38). Но у сейфертовских галактик всегда есть звездные линии поглощения.

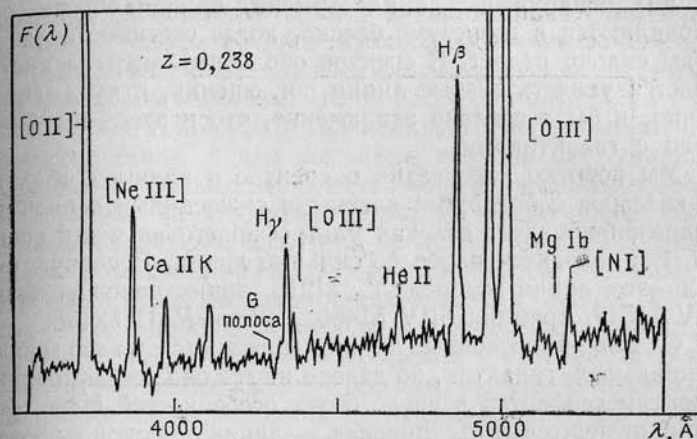


Рис. 39. Спектр N-галактики 3C 171 с красным смещением $z=0,238$. Помимо линий эмиссии отмечены характерные звездные линии поглощения кальция Ca II и магния Mg Ib

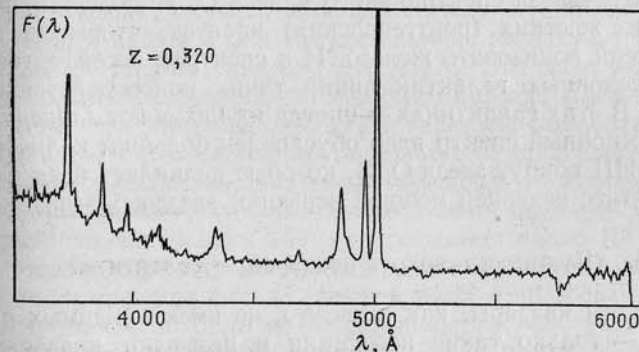


Рис. 40. Спектр квазара 3C 277.1 ($z=0,320$). Нетрудно отождествить линию H_β и линии ионов кислорода OII и OIII, видимые и на предыдущем рисунке; хорошо заметен подъем в область коротких волн, типичный для спектра квазаров

Много общего с квазарами имеют не только сейфертовские, но и N-галактики с их чрезвычайно ярким, компактным ядром. В их спектре хорошо видны эмиссионные линии водорода H_α , H_β , H_γ , линии ионов кислорода OII

и ОIII, другие линии, типичные для сейфертов и квазаров (рис. 39).

Самый необычный спектральный портрет — у лацертид, в нем вообще нет спектральных линий. Лишь у некоторых из них обнаружены линии эмиссии, причем обычно они проявляются в минимуме блеска, когда светимость лацертиды сильно падает. В спектре оболочки лацертид иногда удается увидеть слабые линии поглощения, откуда, собственно, и было сделано заключение, что и здесь мы имеем дело с галактиками.

Мы коротко рассказали о спектре в видимой области. У квазаров с большими красными смещениями в видимый диапазон попадает далекая ультрафиолетовая часть спектра, где находятся наиболее сильные линии. В первую очередь это линия водорода L_{α} $\lambda 1216$, линии ионов углерода CIV $\lambda 1549$, кремния SiIV $\lambda 1400$, магния MgII $\lambda 2798$.

Сильные эмиссионные линии наблюдаются у ядер многих спиральных галактик, но далеко не все они сейфертовские. Спектры сейфертов в числе своих особенностей имеют еще один отличительный признак — линии высокоионизованных атомов, особенно ионов железа FeVII и FeX. Они независимо показывают, что ионизация производится незвездным источником, так как излучение даже самых горячих звезд — звезд спектрального класса O, не содержит достаточно жестких (рентгеновских) квантов, чтобы до такой степени ионизовать железо. И в спектрах несейфертовских эмиссионных галактик линий таких ионов действительно нет. В этих галактиках — иногда их называют *лайнерами* — эмиссионный спектр ядер обусловлен большим количеством зон HII вокруг звезд O, B, которые появились в ядре в результате недавней мощной вспышки звездообразования.

4. «Пушинки» вокруг квазаров — галактики?

Хотя квазары, как и звезды, не имеют видимых размеров — только такие источники и называют квазарами, — чуть ли ни с первых наблюдений у некоторых из них, например, у квазара 3C 48, были обнаружены окружающие их слабосветящиеся туманности. Внимание к себе они привлекли позже, в начале 70-х годов, а в 80-х годах стали важнейшим объектом исследования в астрономии, после того как научились отделять свет слабой туманности от излучения яркого центрального источника — квазара.

Туманности и действительно столь слабы, что видны только у сравнительно близких объектов, с не очень боль-

шими красными смещениями; за эфемерный вид английские и американские астрономы дали им красивое название «fuzz» — пушинка. И вот в центре такой «пушинки», размеры которой оказались такими же, как у гигантских галактик, расположен квазар — как плотное, крошечное зернышко тополя в своей пуховой оболочке.

Что же это такое? Первые фотометрические исследования «пушинок» показали, что по цвету они похожи на поздние голубые спиральные галактики, а иногда бывают еще более голубыми. А как мы знаем, голубой цвет галактик указывает на большое количество молодых массивных звезд. Не означает ли это, что туманность представляет собой молодую галактику, в которой происходит мощный процесс звездообразования? Увы, определенно ответить на этот вопрос, имея лишь цветовые характеристики, нельзя. Галактика — это в первую очередь звезды, а главная отличительная черта звезд — линии поглощения в спектре, особенно характерные линии кальция, магния, железа. И пока мы не обнаружим звездные линии поглощения, не будет уверенности и в том, что мы имеем дело со звездной системой, а не со светящейся газовой оболочкой.

И такие линии действительно были обнаружены! В 1982 г. американские астрономы Т. Боросон, Дж. Оук, К. Грин смогли получить хороший спектр «пушинки» квазара 3C 48 и нашли в нем узкую, типично звездную линию поглощения магния, линию MgIb $\lambda 5175$. Это было выдающееся событие: впервые было получено прямое доказательство того, что квазары окружены звездной компонентой.

Что касается эмиссионных линий, то они найдены сейчас у многих туманностей. Это линии водорода, кислорода; их анализ показывает, что общая масса ионизованного газа, который излучает в этих линиях, составляет около $10^8 M_{\odot}$. При этом в случаях, когда наблюдаются сильные линии эмиссии, туманность сильно светит в непрерывном спектре в голубой его части. Если же непрерывное излучение сильнее в красной части спектра, то линии, как правило, очень слабые или отсутствуют вообще. Что подсказывают нам эти свойства «пушинок»? Пока не очень ясно...

До сих пор мы говорили только о свойствах туманностей, безотносительно к свойствам находящихся в их центре квазаров. В то же время связи между этими свойствами есть, и они очень любопытны. Например, обнаружились систематические различия у туманностей, связанных с радиоизлучающими квазарами и «радиотихими» квазарами. У первых туманности в среднем ярче почти на две звездные

величины, а размеры больше примерно в три раза: у «радиоквazarов» радиус туманности равен в среднем $R \approx 65$ кпк, а у «радиотихих» — $R \approx 20$ кпк. Почему такое различие?

Предполагают, что «радиоквazarы» находятся в центре гигантских эллиптических галактик, а «радиотихие» — в центре спиральных. Так ли это? Во всяком случае, это согласуется с тем, что радиогалактики — это, во-первых, тоже эллиптические системы; во-вторых, для них типичным является существование струй релятивистского вещества, которые мы наблюдаем и у радиоквazarов.

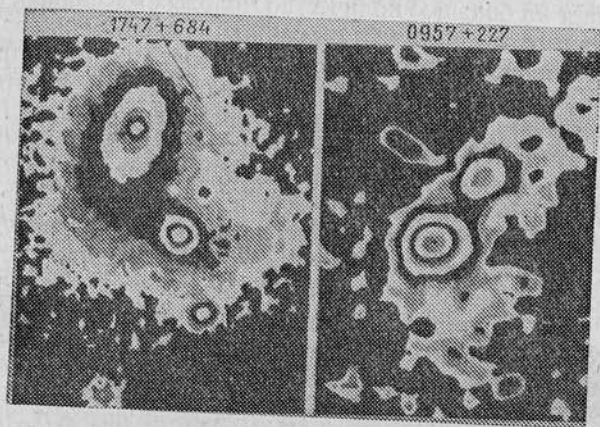


Рис. 41. Два примера взаимодействующих пар квазар — галактика

А вот спиральность туманностей у целого ряда «радиотихих» квазаров обнаружилась в последние годы совершенно недвусмысленно. Это произошло благодаря качественному скачку в развитии техники получения и анализа изображений астрономических объектов, в том числе туманностей квазаров.

Новые методы анализа изображений позволили установить не только спиральную структуру «пушинок», но и тот факт, что многие из «квazarных» галактик взаимодействуют с другой галактикой (рис. 41). Процент таких пар очень высок: у систем с небольшим красным смещением он достигает 30%. Это привело к мысли, что само явление квазара во многих случаях может быть вызвано взаимодействием галактик. А идея состоит в том, что взаимодействие сильно возмущает движение газа в системе, и он попадает в центр галактики; там его поджидает чудовищный «монстр» — сверхмассивная черная дыра; она «пожирает»

газ, и это сопровождается выделением гигантского количества энергии, которое мы наблюдаем как феномен квазара.

Несмотря на то, что «пушинка» выглядит очень слабым объектом, она имеет светимость, типичную для гигантских и даже сверхгигантских галактик. В отдельных случаях абсолютные звездные величины достигают значений $M_V = -24^m$, т. е. такие *квazarные галактики* почти на две-три звездные величины ярче галактик типа нашей или туманности Андромеды. Но немало случаев, когда абсолютная звездная величина квazarных галактик вполне умеренна, на уровне $M_V = -18^m$, т. е. на уровне скромных по размерам галактик. Это также служит аргументом в пользу того, что «пушинки» вокруг квазаров являются звездными галактиками.

Наблюдается отчетливая зависимость между светимостью квазара и светимостью галактики, в которой он находится: яркость «пушинки» обычно тем больше, чем больше яркость квазара. При этом «пушинка» в среднем на одну-две звездные величины слабее, чем квазар, хотя в некоторых случаях ситуация обратная.

Интересно сравнить квazarные галактики с лацертидными галактиками и N-галактиками. Звездные компоненты были найдены у ряда лацертид с небольшими красными смещениями, в спектрах которых видна звездная линия поглощения магния. По своей яркости лацертидные галактики оказались близкими к гигантским галактикам, $M_V \sim -22^m$. У самого объекта BL Лас галактика имеет абсолютную звездную величину $M_V \approx -21^m$, а центральный источник на две величины ярче, $M_V \approx -23^m$.

Что касается N-галактик, то у них яркости центрального источника и окружающей его звездной оболочки обычно сравнимы и в среднем несколько меньше, чем у лацертид. Похоже, что в обоих случаях звездная компонента представляет собой эллиптическую галактику.

Не следует забывать, что пока галактики, точнее «пушинки», обнаружены только у близких квазаров и лацертид, следовательно, они относятся к эпохе, когда процесс формирования большинства галактик давно закончился. Пока мы не знаем, все ли объекты этого рода, особенно далекие, имеют звездные компоненты, не знаем, связана ли «квazarная» стадия эволюции с процессом формирования галактики, не знаем, почему и когда в одних галактиках квазары «зажигаются», а в других они, по-видимому, вообще никогда не возникают. Полученные результаты исследо-

вания «пушинок» — только первые шаги в изучении этих все еще таинственных объектов, и впереди, несомненно, масса неожиданностей.

5. Химический состав квазаров

В астрофизике существует хорошо развитая теория излучения газовых туманностей, позволяющая по профилю и интенсивности линий с большой точностью устанавливать физические параметры газа: температуру, плотность, степень ионизации, химический состав. Эмиссионные линии квазаров образуются в облаках ионизованного газа, плотность которого составляет $n \approx 10^7 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$, а температура $T \approx 10^4 \text{ К}$. Облака занимают область вокруг центрального источника, размеры которой составляют не более нескольких парсек. Эта область ничтожно мала по сравнению с размерами галактики, и в то же время чрезвычайно велика по сравнению с размерами главного источника энергии квазара, излучение которого ионизует и нагревает облака газа, и частично переизлучается ими в эмиссионных линиях. Чтобы объяснить полное количество энергии, заключенное в линиях, необходимо, чтобы масса ионизованного газа, например в квазаре 3С 273, была порядка $10^5 M_{\odot}$.

Возможность определить химический состав оказалась исключительно важной не только для понимания природы квазаров, но и для вопросов происхождения химических элементов во Вселенной, вопросов связи галактик с квазарами.

Одним из нетривиальных свойств квазаров стал почти нормальный, «стандартный», т. е. близкий к солнечному химический состав эмиссионных облаков газа. Этот вывод был сделан И. С. Шкловским сразу же после открытия квазаров. Он выделил его как сильный аргумент в пользу того, что квазары находятся в ядрах галактик. Действительно, тяжелые элементы, которые мы видим в спектрах квазаров, образуются в звездах, попадая при взрывах сверхновых в межзвездный газ. Поэтому излучающий газ в квазарах должен был пройти химическую термоядерную переработку в сверхновых, которые, скорее всего, принадлежали квазарной галактике, звездной компоненте квазара.

Спектры квазаров позволяют оценить в первую очередь содержание углерода С, а кроме того, азота N, магния Mg, кальция Ca, кремния Si, железа Fe. Общий вывод таков: содержание углерода, по современным данным, составляет не менее половины значения, характерного для Солнца, и

вряд ли превышает его более чем в два-три раза. Аналогично было показано, что содержание магния, железа, кремния также близко к солнечному.

Этот результат приводит к ряду важных выводов. Из него следует, что в ядрах галактик основное обогащение тяжелыми элементами, т. е. практически до нынешнего их содержания в галактиках, произошло на самых ранних стадиях эволюции галактик (по крайней мере, квазарных), когда их возраст не превышал миллиарда лет. Действительно, если галактики рождались в период, соответствующий красному смещению $z \approx 5$, то на красных смещениях $z \approx 3$, где мы сейчас наблюдаем далекие квазары, их возраст примерно в 10—20 раз (в зависимости от космологической модели) меньше современного возраста Вселенной. Поскольку квазары связаны, по-видимому, чаще всего со спиральными галактиками, то мы должны сделать вывод, что вся последующая (после первого миллиарда лет) история звездообразования, на протяжении, скажем, 15 миллиардов лет, мало что добавила к созданному вначале запасу тяжелых элементов.

Это далеко не тривиальное заключение. До сих пор многие астрономы полагают, что звездообразование в спиральных галактиках продолжалось с постоянной скоростью в течение всего времени их существования, вплоть до наших дней; сверхновые каждого нового поколения звезд обогащают галактику тяжелыми элементами, поэтому нынешние молодые звезды должны иметь их гораздо больше, чем их было 10—15 миллиардов лет назад. Но химический состав квазаров показывает, что это не так. В свою очередь это может означать, например, что при последующем звездообразовании доля звезд, которые производят тяжелые элементы, была почему-то существенно меньше, чем у самых первых поколений звезд.

Нормальный химический состав квазаров заставляет думать, что сам квазар «загорается» в центре спиральной галактики уже после того, как в ней появились звезды гало с дефицитом металлов, т. е. звезды, которые формировались из газа с содержанием металлов в десятки раз меньшим, чем мы видим в квазарах. Тогда мы приходим к любопытному выводу: сферическая подсистема галактик, звезды гало и шаровые скопления должны были сформироваться невероятно быстро: в их «распоряжении» было, скорее всего, менее одного миллиарда лет! А ведь данные о кинематике звезд в нашей Галактике говорят о том, что звезды сферической подсистемы рождались в процессе сжатия протога-

лактики от размеров, которые были раз в десять больше современного размера Галактики, и время сжатия при этом составляет два-три миллиарда лет! Значит ли это, что звезды гало появились и обогатили галактику тяжелыми элементами еще до того, как завершился коллапс протогалактики?

Размышляя над фактом «нормальности» содержания тяжелых элементов в квазарах, И. С. Шкловский в 1983 г. пришел к заключению, что сжатие протогалактик началось при $z \approx 5$, когда возраст Вселенной (в случае плоской модели при $\rho = \rho_c = 3H^2/8\pi G$) был в два раза меньше возраста эпохи далеких квазаров, $t \approx 1,5 \cdot 10^9$ лет, и за это время, т. е. за время меньше миллиарда лет, формирующаяся галактика успела обогатиться тяжелыми элементами до нормального, «солнечного» уровня.

И еще один вывод: близость содержания разных элементов: C, Mg, Si, Fe к «солнечным» значениям (хотя неопределенность оценок еще довольно велика) говорит в пользу того, что химическая смесь в квазарах была создана в тех же процессах, теми же объектами, которые действовали и в нашей, и в других галактиках, т. е. в процессах взрыва сверхновых звезд.

Конечно, данные о химическом составе квазаров получаются только для его центральной области. Прямых указаний на то, что в масштабах всей квазарной галактики уже произошло звездообразование и основное обогащение, пока нет, и это надо иметь в виду при рассмотрении выводов, которые приведены выше. Какую-то информацию об обогащении тяжелыми элементами может дать решение проблемы пыли в квазарах. Анализ их спектров показывает, что излучение квазара проходит через среду, содержащую много пыли (см. раздел 5 гл. 9). С большой вероятностью пыль находится во всем объеме родительской галактики квазара, а не в эмиссионных облаках газа в его центре. В этих облаках, в отличие от облаков газа в нашей Галактике, не обнаружено дефицита тех элементов, которые переходят в пылинки: C, Mg, Si, Fe. Поэтому делается вывод, что и пыли в самой эмиссионной области нет. Но если вся пыль находится в родительской галактике, значит, в ней уже велико содержание тяжелых элементов, значит, в ней уже произошло обогащение.

Правда, обсуждается еще одна, не менее интересная, возможность — прохождение света квазара через газопылевую оболочку других галактик, находящихся между нами и квазаром. Но такие оболочки должны быть сильно иони-

зованы, иначе в их газовой компоненте будут возникать линии поглощения, которые мы на самом деле у близких квазаров вообще не видим. Могут ли это быть горячие рентгеновские короны галактик с большим содержанием пыли? Ответ пока не ясен; такое количество пыли должно приводить к заметному покраснению галактик, имеющих короны, но этого не наблюдается.

6. Релятивистские струи — джеты

В самых мощных радиогалактиках, светимость которых составляет $L_r \geq 10^{42}$ эрг/с, большая часть радиоизлучения возникает в двух обширных областях, удаленных друг от друга на расстояния порядка 200—300 кпк (для них еще до сих пор не придумано удачного названия; будем называть их дальними компонентами или дальними источниками). При этом внутри каждой компоненты основное энерговыделение идет на внешней кромке, на самом краю дальней компоненты, на краю «радиолопасти». Ее называют «горячим пятном». В центре этой двойной структуры находится родительская галактика. Обычно она также светится в радиодиапазоне, но не столь ярко, так что иногда ее вообще трудно увидеть. А вот у более слабых радиогалактик ситуация обратная: центральная галактика излучает сильнее, чем дальние зоны с их горячими пятнами, и выглядит такая система поэтому не как двойной, а как тройной радиоисточник. Они отличаются от мощных галактик и размерами: расстояние между компонентами достигает значений в несколько мегапарсек, т. е. на порядок больше, чем у сильных радиоисточников. При этом природа центрального источника совершенно иная, чем у удаленных областей. Здесь излучение возникает в области с ничтожно малыми размерами, в ядре звездной галактики.

Значительно позднее было обнаружено, что центральная галактика соединяется с внешними областями радиоизлучения тонкой, светящейся в радиодиапазоне полосой, названной джетом, или струей (рис. 42, 43). Это название подразумевает, что в струе что-то течет, течет от центра системы к внешним областям. Однако прямых доказательств течения, доказательств, подобных тем, которые дает доплеровское смещение линий в спектре излучения, ни в самом начале, ни сейчас не найдено. К сожалению, линий в спектре просто нет, точнее, если они и есть, то их не удается пока обнаружить. И все же убежденность в том, что вещество в джетах течет, причем даже с релятивистской скоростью,

была столь велика, что название сразу прижилось, и часто говорят не просто о струях, а о релятивистских струях. Такие струи астрофизикам были просто необходимы. С ними

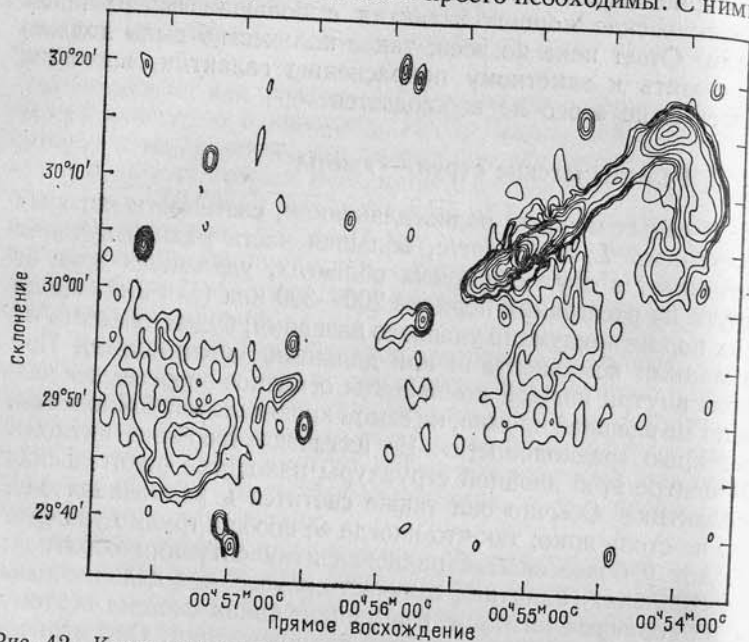


Рис. 42. Карта излучений радиогалактики NGC 315. Ее размеры около 1 Мпк. Виден асимметричный джет, изгиб дальних компонент, мощный узел в начале верхнего джета



Рис. 43. Радиогалактика 3C 449 с мощным симметричным джетом, начинающимся вблизи центрального источника

вспыхнули проблески надежды разобраться в загадках двойных радионисточников: в их необычной структуре, в природе таинственного и невероятно мощного источника энергии, в их связи со звездными галактиками. И эти надежды оправдали себя, а последующие исследования джетов усилили убежденность в том, что вещество действительно истекает с большой скоростью из центра галактики.

Джеты были обнаружены более чем у половины известных «классических» радиогалактик, имеющих в центре

эллиптическую галактику. Но не только радиогалактики обладают джетами. Не реже они встречаются у квазаров с протяженной радиоизлучающей структурой, причем у квазаров с более яркими (в радиодиапазоне) ядрами их видят чаще. По-видимому, с явлением такого рода мы сталкиваемся в некоторых спиральных сейфертовских галактиках. Однако здесь джеты не столь масштабны как по энергетике, так и по протяженности. Они видны в пределах нескольких килопарсек от центра и часто имеют S-образную форму.

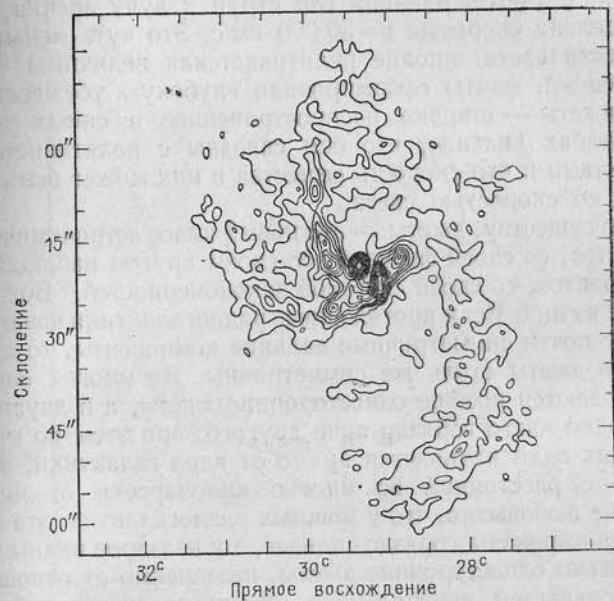


Рис. 44. Радиокарта «мини-спирали» в центре нашей Галактики

Предполагают, что скорость истечения вещества в струе здесь меньше и струя закручивается в спираль, попадая во вращающийся газовый диск галактики. И уж совсем крошечных масштабов такая же структура наблюдается в центре нашей Галактики. Хорошо известная сейчас «мини-спираль» с размерами около парсека, связанная с радионисточником Стрелец А Западный, интерпретируется как закручивающаяся вращением струя, истекающая со скоростью 300 км/с из центрального источника (рис. 44).

Замечательный и уникальный пример релятивистской струи, генерируемый релятивистским объектом, дала нам двойная звезда SS 433. Уникален он не только тем, что струя

истекает из объекта звездной массы — нейтронной звезды или черной дыры, но и тем, что здесь напрямую была определена скорость вещества в струе. В ней оказался ионизованный газ, излучающий эмиссионные линии в оптическом диапазоне спектра. Струя, бьющая в нашу сторону, дает линии, смещенные вследствие эффекта Доплера в фиолетовую сторону, а противоположная ей — в красную сторону. В результате линии в общем спектре объекта SS 433 расщепляются, и по расстоянию между крайними компонентами линий, с учетом наклона оси струи к лучу зрения, была определена скорость: $v=80\,000$ км/с. Это чуть меньше $1/3$ скорости света, вполне релятивистская величина!

Все эти факты сформировали глубокую убежденность, что джеты — широко распространенное в самых разных масштабах явление, что они связаны с релятивистскими объектами и что скорость вещества в них может быть сравнима со скоростью света.

По существу, джеты — это новый класс астрономических объектов, со своей физикой, со своим кругом наблюдательных фактов, со своей системой закономерностей. Вот некоторые из них. Если протяженные радиогалактики чаще всего имеют почти симметричные дальние компоненты, то далеко не все джеты столь же симметричны. Во многих случаях наблюдаются вообще односторонние джеты, а в двусторонних один часто гораздо ярче другого, при этом во многих случаях один начинается прямо от ядра галактики, а другой — с расстояний во многие килопарсеки от центра. Крайне любопытно, что у мощных радиогалактик эта асимметрия выражена гораздо сильнее, а у квазаров видны вообще только односторонние джеты, независимо от отношения интенсивностей центрального источника и дальней компоненты.

Радиоизлучение джетов имеет значительную линейную поляризацию. Это указывает на упорядоченное расположение магнитного поля. Измеряя поляризацию на многих частотах, можно определить и конкретную ориентацию поля по отношению к струе. Оказалось, что в одних случаях поле направлено вдоль джета, в других — поперек; некоторые струи имеют в средней части поперечное поле, а ближе к краям, т. е. у центра и у дальней компоненты, поле становится продольным. У мощных источников в односторонних джетах магнитное поле, как правило, всегда продольное (конечно же, во всех случаях речь идет о компоненте поля в картинной плоскости, и трехмерная структура поля может быть значительно сложнее).

Радиоизлучение струи вдоль всей ее длины часто бывает неоднородным, в ней наблюдаются яркие «пятна» или «узлы» (рис. 42—46). В узлах магнитное поле даже у односторонних джетов обычно перпендикулярно джету.

Кстати, в ряде случаев «узлы» джета ярко светятся в оптическом и в инфракрасном диапазонах. Замечательные примеры — односторонние джеты галактики М 87 (радиоисточник Дева А), квазара 3С 273. Линейная поляризация

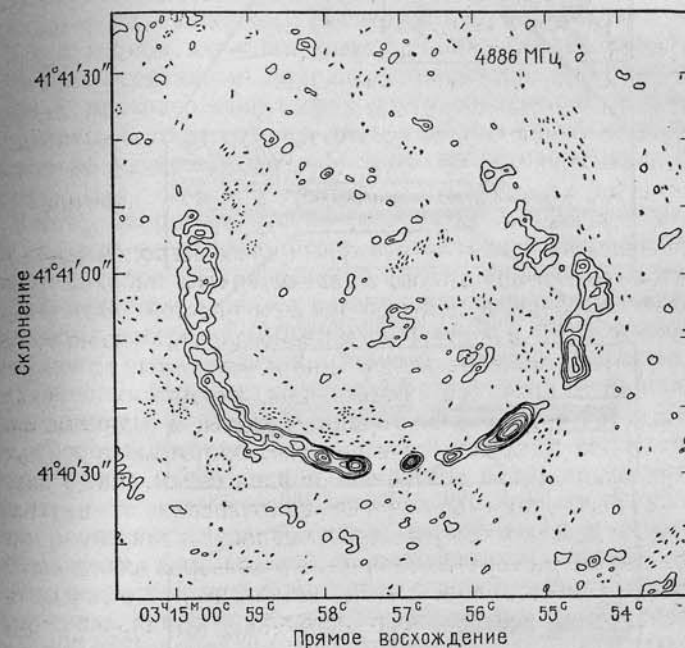


Рис. 45. Радиогалактика 3С 83.1В (NGC 1265). Ее изогнутая форма интерпретируется как следствие движения через межгалактическую среду, под напором которой джеты постепенно загibaются вверх, в сторону, противоположную направлению движения

и форма спектра указывают, что это излучение также имеет синхротронную природу.

Очень важным для понимания природы и структуры джетов является их геометрическая форма. Во многих случаях они не прямые, а имеют S-образную (рис. 42—44) и С-образную (рис. 45) формы или вообще «вихлят» из стороны в сторону вокруг прямой линии (рис. 46). Искривление струй связывают или с влиянием давления межгалактической

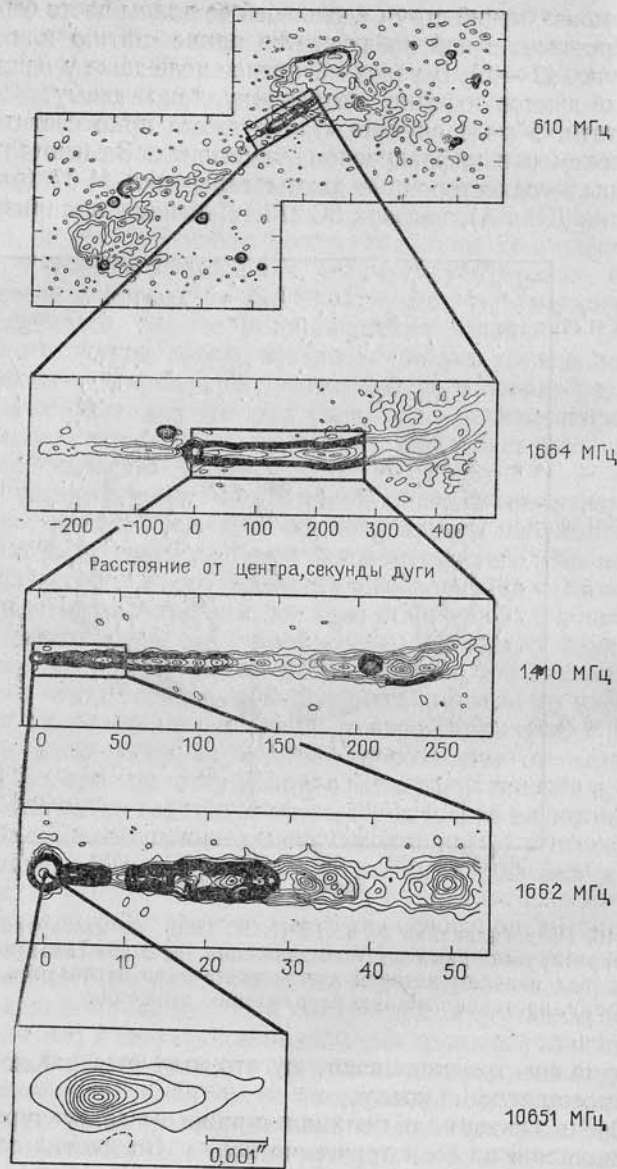


Рис. 46. Структура джета радиогалактики NGC 6251 в разных масштабах

среды, через которую движется источник (этим объясняют S-формы), или с орбитальным движением источника струи, например в двойной системе галактик (этим можно объяснить «вихляние»). Возможны также другие объяснения искривления струй, и только всесторонний анализ совокупности всех свойств джетов позволит в конце концов сказать, какова же истинная причина их «непрямолинейного» поведения.

Впрочем, последнее заключение относится и ко всем остальным их свойствам. Несмотря на сравнительно небольшой период изучения джетов, о них сейчас известно столь много связанных друг с другом фактов, что разнообразие не противоречащих друг другу объяснений не столь уж велико. В ряде случаев даже наиболее яркие свойства джетов не удается пока объяснить непротиворечивым образом.

Взять, например, такие свойства и характеристики, как скорость вещества в джете, асимметрия и искривление. Вопрос о скорости чрезвычайно важен. Трудно придумать другой механизм переноса гигантского количества энергии без особых потерь на сотни килопарсек, в область дальних компонент радиогалактик, помимо течения вещества с релятивистской скоростью в тонкой струе: ведь очень малая масса должна перенести невероятно много энергии! Значит, скорость должна быть близка к скорости света. Этот вывод может одновременно объяснить и другое свойство джетов — их асимметрию. Известно, что яркость излучающего релятивистского вещества, движущегося в сторону наблюдателя, больше, чем у покоящегося, причем она сильно возрастает с приближением скорости вещества к скорости света. И наоборот, если вещество удаляется с релятивистской скоростью, для наблюдателя интенсивность его излучения сильно падает. Поэтому односторонний джет можно интерпретировать как релятивистскую струю, движущуюся к нам под малым углом к лучу зрения. Противоположная струя, согласно этой гипотезе, тоже существует, но из-за релятивистского эффекта ослабления яркости мы ее просто не видим. С этой картиной согласуется тот факт, что часто одна из струй у двусторонних джетов начинается вдали от ядра галактики, и сама эта струя слабее. Такое может быть у удаляющейся струи, у которой скорость максимальна вблизи ядра, а вдали от него она падает.

Если струя движется точно к нам, строго вдоль луча зрения, то, как полагают некоторые авторы, мы сталкиваемся с явлением лацертиды; другими словами, лацертиды — это

радиогалактики, в которых релятивистская струя бьет почти точно в нашу сторону и из-за эффекта усиления яркости дает основной вклад в светимость всего объекта, определяет главные особенности его излучения. Существуют оценки, которые показывают, что наблюдаемое количество лацертид вполне согласуется с предположением о том, что лацертиды — это обычные радиоизлучающие эллиптические галактики, у которых джет ориентирован в нашу сторону. При этом скорость джета v должна удовлетворять довольно жесткому условию: $4 \leq (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \leq 5,5$.

Так вот, казалось бы, все хорошо; однако релятивистские скорости в масштабах многих килопарсек трудно согласовать с искривлением струй у многих источников. Если искривление вызвано давлением межгалактической среды и направление скорости значительно меняется, то соответственно должна меняться и яркость струи, чего на самом деле не наблюдается. Значит, что-то мы неправильно понимаем, неправильно интерпретируем. Но что?

Замечательным свойством джетов являются «сверхсветовые» движения ярких «узлов». Наблюдения с высоким разрешением с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинной базой показали, что у квазаров, например 3С 273, «узлы» джета на масштабах порядка парсека смещаются со временем, причем видимая скорость смещения превышает световую. Есть несколько объяснений этому явлению, и все они связаны с предположением о релятивистской струе. В самом простом случае видимая сверхсветовая скорость узла, $v_{\text{вид}} > c$, возникает при наблюдении релятивистской струи, движущейся к нам под малым углом i к лучу зрения. С помощью формул специальной теории относительности можно показать, что истинная скорость струи $v_{\text{ист}}$ связана с видимой $v_{\text{вид}}$ соотношением

$$v_{\text{ист}} = \frac{v_{\text{вид}}}{(v_{\text{вид}}/c) \cos i + \sin i},$$

из которого следует, что на самом деле истинная скорость всегда меньше скорости света, $v_{\text{ист}} < c$. «Сверхсветовые» скорости считаются сильным аргументом в пользу того, что скорости вещества в струе чрезвычайно близки к скорости света.

А в целом сейчас исследователи сходятся в том, что и релятивистские и нерелятивистские скорости приводят к значительным трудностям при объяснении многочисленных данных о радиогалактиках и квазарах, однако без скоро-

стей, близких к скорости света, объяснить самые выдающиеся свойства этих объектов, похоже, абсолютно невозможно.

7. Что скрывают инфракрасные галактики?

Более десяти месяцев, с января по ноябрь 1983 г., работала на орбите вокруг Земли первая космическая инфракрасная обсерватория ИРАС, созданная американскими и европейскими учеными. Необходимость выносить инфракрасные телескопы за пределы атмосферы обусловлена, как и в случае ультрафиолетовых или рентгеновских наблюдений, тем, что инфракрасное излучение плохо проходит или вообще не проходит через атмосферу, особенно в длинноволновой части спектра.

Овладение новым диапазоном спектра всегда приносило открытие новых объектов и явлений. Не стали исключением и наблюдения обсерватории ИРАС. Среди многих ее открытий, пожалуй, наиболее удивительные и неожиданные связаны с галактиками. Обсерватория провела обзор неба и обнаружила значительное количество ярких инфракрасных источников, которые сразу не удалось отождествить с какими-либо известными объектами: в области таких источников на картах обзора неба Паломарской обсерватории (США) не было ни звезд, ни галактик, ни квазаров. Зная чувствительность Паломарского обзора и телескопа ИРАС, отсюда нетрудно сразу установить нижний предел отношения инфракрасной светимости $L_{\text{ИК}}$ к оптической светимости $L_{\text{опт}}$; оказывается, что $L_{\text{ИК}}/L_{\text{опт}} \geq 50$. В то же время у нормальных галактик $L_{\text{ИК}}/L_{\text{опт}} = 0,1 - 1$. Отсюда ясно, что неотожествленные источники ИРАС не могут быть обычными, нормальными галактиками.

Таинственные объекты, светящиеся холодным светом (а их цветовая температура действительно чрезвычайно низка, лишь на 30—40 кельвинов выше абсолютного нуля), естественно, вызвали живейший интерес, и их попытались все-таки увидеть в оптическом диапазоне с помощью более чувствительных инструментов, применяя, например, светоприемную технику на ПЗС-матрицах. Попытка удалась, и сразу выяснилось, что за редким исключением неотожествленные источники ИРАС совпадают по положению с чрезвычайно слабыми галактиками.

Как и следовало ожидать, галактики оказались с особенностями. Во-первых, все они являются эмиссионными. Кстати, это очень удачное обстоятельство, потому что по

сильным линиям эмиссии H_α , H_β , [OIII] удалось надежно установить их красное смещение. В спектре есть и звездные линии поглощения: кальция, натрия и других элементов.

Во-вторых, все галактики оказались очень далекими, их красные смещения лежат в интервале $z=0,1-0,2$, т. е. они находятся на таких же расстояниях, как, например, квазар 3С 273, у которого $z=0,158$.

В-третьих, видимая структура этих галактик имеет отклонения от нормальных форм или же галактики находятся в группах галактик. Это наталкивает на мысль, что к феномену инфракрасной галактики какое-то отношение имеет взаимодействие галактик.

Ну а теперь о самом поразительном в этих системах. У некоторых из них инфракрасная светимость оказалась в сотни раз выше, чем оптическая, и сравнима с полной светимостью самых мощных сейфертовских галактик и даже квазаров. Например, у объекта 0413+122 $L_{\text{ИК}}/L_{\text{опт}}=480$ и $L_{\text{ИК}} \approx 2 \cdot 10^{46}$ эрг/с. Это примерно в 100 раз больше, чем полная светимость таких гигантских галактик, как наша или туманность Андромеды!

Какова же природа столь мощного инфракрасного излучения? Обычно вклад в это излучение дают три разных источника. Во-первых, излучение нагретой межзвездной пыли. Пыль нагревается до нескольких десятков кельвинов, поглощая мощное ультрафиолетовое излучение ярких горячих звезд спектральных классов О, В, и при такой температуре она излучает основную часть энергии в далекой инфракрасной области. Интенсивность излучения при этом, очевидно, тем больше, чем больше пыли в галактике и чем больше звезд О, В, т. е. чем интенсивнее звездообразование, поскольку звезды О, В существуют очень короткое время.

Во-вторых, в инфракрасном диапазоне сильно светят яркие красные гиганты спектрального класса М, но уже в ближней инфракрасной области. Это также звезды с малым возрастом, поэтому и эта часть светимости пропорциональна интенсивности звездообразования.

В-третьих, инфракрасное излучение дают ядра сейфертовских галактик и квазаров, и оно имеет нетепловую природу. Активные ядра и квазары — самые мощные источники инфракрасного излучения. У квазаров в некоторых случаях в этом диапазоне испускается большая часть всей излучаемой энергии, как раз на уровне, который получен для инфракрасных галактик, и выше.

Из всех трех возможностей активное ядро кажется наиболее соблазнительным кандидатом для объяснения излучения инфракрасных галактик. Но у них пока не обнаружено никаких признаков активного ядра! Эмиссионные линии у них не сейфертовского типа, к числу мощных радиогалактик они также не относятся и т. д.

Совершенно неправдоподобно также, чтобы инфракрасное излучение этих систем представляло собой переработанное (на пыли) оптическое излучение галактики. Да и пылью эти системы особенно не выделяются. Их цвет оказался заметно голубее, чем у эллиптических галактик, а если бы в них было аномально много пыли, то из-за обусловленного ею покраснения галактики были бы, вероятно, намного краснее.

Так что же скрывается в инфракрасных галактиках? Столкнулись ли мы здесь с какой-то новой, необычной формой активности ядра? Идет ли здесь как-то необычно, с невероятно высокой интенсивностью звездообразование? Или же мы наткнулись на новый класс объектов, на незнакомый нам тип явлений? Ответа пока нет. Нужны новые наблюдения инфракрасных галактик, причем во всех диапазонах спектра. Можно надеяться, что всесторонние исследования этих объектов позволят решить их загадку.

Глава 9

ГЛАВНЫЙ «ДВИГАТЕЛЬ» АКТИВНЫХ ЯДЕР: ЧЕРНАЯ ДЫРА?

Самая интригующая проблема квазаров, радиогалактик, сейфертовских галактик — это вопрос о природе центрального объекта, являющегося источником невероятно большого энерговыделения и обладающего такими удивительными свойствами, как способность создавать ультрарелятивистские струи вещества с фантастически огромным запасом энергии. Часто его называют главным «двигателем» активных ядер и квазаров. Как полагает сейчас большинство исследователей, этим объектом является *массивная черная дыра*.

Теория центрального объекта должна ответить по крайней мере на четыре вопроса: а) каким образом происходит генерация энергии с мощностью до $10^{46}-10^{48}$ эрг/с в чрезвычайно малых объемах пространства; б) как происходит формирование струй ультрарелятивистского вещества; в) как формируется спектр излучения; г) каким образом из центральных областей активных ядер извергаются огромные

массы газа со скоростями тысячи и десятки тысяч километров в секунду. Можно ли найти ответы на эти вопросы в физике черных дыр?

1. Сфера Шварцшильда, дыра Керра, процесс Пенроуза...

Черная дыра представляет собой релятивистский объект, который образуется в результате неограниченного сжатия тела под действием собственной гравитации. Расчеты показывают, что если масса тела M превышает примерно $2M_{\odot}$ и если в нем исчерпаны запасы термоядерной энергии, выделение которой могло бы поддерживать температуру и давление, то никакие силы не могут удержать такой объект от катастрофического сжатия — *коллапса* — в собственном поле тяготения. Когда в процессе сжатия радиус тела достигнет значения

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} = 3 \cdot 10^5 \frac{M}{M_{\odot}} \text{ см,}$$

которое называют *гравитационным*, или *шварцшильдовским радиусом* (радиусом сферы Шварцшильда), то гравитационное поле на поверхности тела становится столь большим, что даже кванты электромагнитного излучения не могут его покинуть, всякое излучение с поверхности становится невозможным. Это и есть черная дыра.

При стремлении радиуса к значению r_g происходит релятивистское замедление времени, которое на $r=r_g$ становится бесконечным. Поэтому для внешнего наблюдателя сжатие до шварцшильдовского радиуса будет продолжаться бесконечно долго. Для нас, на самом деле, коллапсирующие релятивистские объекты всегда будут представляться как бы застывшими немного не доходя до своего гравитационного радиуса. Наблюдатель, который находится на поверхности коллапсирующего тела, достигает радиуса Шварцшильда за конечное время, однако за этот промежуток времени вся остальная Вселенная проживет всю свою бесконечно долгую жизнь.

Мы являемся внешними наблюдателями, поэтому для нас еще ни один коллапсирующий объект во Вселенной не достиг радиуса Шварцшильда, не стал, строго говоря, настоящей черной дырой. Но в проблеме активности галактических ядер и квазаров это оказывается не существенным, так как реально и для внешнего наблюдателя объект очень быстро подходит к шварцшильдовскому радиусу настолько

близко, что его внешние проявления практически будут такими же, как у настоящей черной дыры. Время сжатия до такого состояния равно примерно $(Gr_0)^{-1/2}$, где ρ_0 — средняя плотность тела в начале коллапса. Если бы, например, внутри Солнца исчезло внутреннее давление и осталась только сила гравитации, то оно менее чем за 1 час, т. е. буквально на наших глазах, вплотную приблизилось бы к своему шварцшильдовскому радиусу, составляющему ~ 3 км.

При сжатии тела до размеров шварцшильдовской сферы выделяется огромное количество гравитационной энергии; она составляет чуть менее половины энергии массы покоя, $\Delta E \approx 0,4 Mc^2 \approx 10^{54} (M/M_{\odot})$ эрг. Что происходит с этой энергией — не очень ясно. Но для нашей проблемы это опять же не существенно. Эта энергия, если бы она даже могла каким-то образом излучаться во внешнее пространство, выделяется в течение ничтожно малого времени и не может поэтому иметь никакого отношения к длительному процессу энерговыделения в ядрах галактик и квазарах. Кроме того, при приближении к радиусу Шварцшильда, когда освобождается основная часть гравитационной энергии, из-за релятивистских эффектов гравитационного красного смещения, искривления траектории лучей в поле тяготения и некоторых других интенсивность излучения коллапсирующего объекта для внешнего наблюдателя быстро уменьшается, даже если генерируемое число квантов увеличивается. В результате процессы, связанные собственно с черной дырой, никак не могут объяснить энергетику ядер галактик и квазаров, несмотря на, казалось бы, огромную эффективность «превращения» массы в энергию.

Идея привлечения черных дыр для объяснения активности ядер галактик и квазаров состоит в другом: предполагается, что наблюдаемые проявления этой активности обусловлены взаимодействием черной дыры с падающим на нее окружающим веществом.

Характер проявления активности, по-видимому, в значительной степени связан с необычными свойствами вращающейся черной дыры и с ее электромагнитными свойствами. Вращающееся тело с массой M может стать черной дырой, если только его момент количества движения J , или угловой момент, меньше определенного критического значения, равного $J_{\text{max}} = 2GM^2/c = 1,8 \cdot 10^{44} (M/M_{\odot})^2$ эрг·с. Такая черная дыра (ее называют *дырой Керра*) обладает новыми свойствами по сравнению со шварцшильдовской черной дырой. Радиус области, из которой не могут выйти частицы

и кванты, у нее меньше, чем r_g . Он равен

$$r_h = \frac{1}{2} r_g (1 + \sqrt{1 - (J/J_{\max})^2}).$$

Вокруг дыры выделяется область, ограниченная эллипсоидальной поверхностью, которую называют *эргосферой*. Ее большая полуось равна r_g , а малая, направленная вдоль оси вращения, равна r_h . Эта область интересна тем, что может служить источником энергии: если в нее извне попадают, например, две частицы и сталкиваются там, то одна из частиц может вылететь из эргосферы с энергией большей, чем имели до этого обе частицы (*процесс Пенроуза*). Процесс Пенроуза может служить механизмом энерговыделения, при этом попадающее в эргосферу вещество извлекает энергию, связанную с энергией вращения дыры. В принципе таким путем можно «вычерпать» до 29% всей энергии дыры, имеющей начально угловой момент $J = J_{\max}$, и было сделано немало попыток объяснить механизм Пенроуза энерговыделение активных ядер галактик и квазаров.

Однако более предпочтительными механизмами оказались процессы, связанные с электромагнитными свойствами дыр. Прежде чем перейти к ним, отметим еще два интересных механических свойства черной дыры, с которыми связываются надежды объяснить происхождение релятивистских струй (джетов) в радиогалактиках и квазарах. Первое относится к вращению вещества вокруг шварцшильдовской черной дыры. В обычной, ньютоновской теории тяготения тело может находиться на круговой орбите, сколь угодно близкой к тяготеющему центру. Но у черной дыры, как показал еще в 1949 г. советский астрофизик С. А. Каплан, тела не могут находиться на стационарных орбитах с радиусом меньшим, чем $3r_g$. Представим себе вращающийся вокруг дыры газовый диск, в котором вещество теряет из-за вязкости угловой момент и медленно движется к центру. Дойдя в экваториальной плоскости до расстояния $r = 3r_g$, газ срывается с круговой орбиты и быстро, закручиваясь по спирали, падает в дыру. В результате в диске возникает своеобразная воронка, раскрывающаяся в обе стороны вдоль оси вращения, из которой вещество и излучение могут беспрепятственно выходить наружу. Вот с этой воронкой и связывают многие авторы механизм *коллимации*, т. е. механизм, обуславливающий в конечном итоге движение всех частиц в одном направлении. Предполагается, что двусторонняя воронка, практически свободная от внешнего вещества, как раз и формирует релятивистские струи.

Если к тому же дыра сама вращается, то вблизи нее вследствие релятивистского эффекта, называемого *прецессией Лензе — Тирринга*, вращающийся газовый диск будет всегда лежать в плоскости, перпендикулярной оси вращения дыры, независимо от того, как был ориентирован угловой момент движущегося к дыре вещества вначале. Таким образом, ось воронки, о которой шла речь выше, будет всегда совпадать с осью вращения дыры. В этом состоит второе механическое свойство черных дыр, которое мы хотели отметить.

Теперь об электромагнитных свойствах. В отличие от звезд, у черных дыр не может быть собственного магнитного поля: при формировании дыры любое начальное магнитное поле затухает за время порядка r_g/c . А во внешнем магнитном поле дыра ведет себя как проводящая сфера; ее сопротивление у всех черных дыр одинаково и равно примерно 100 ом. Как и в обычном проводнике, при вращении черной дыры во внешнем магнитном поле происходит разделение зарядов, возникает электрическое поле. Попавший в поле извне электрический заряд приобретает в нем энергию, и этот процесс природа может использовать как способ извлечения из черной дыры ее энергии, энергии вращения.

В целом физическая картина взаимодействия вращающейся черной дыры с окружающим газом заряженных частиц — плазмой — и с магнитным полем весьма сложна и многообразна. Она с трудом поддается расчету, и хотя сделано уже много, главные результаты, несомненно, еще впереди. Многие авторы полагают, что именно здесь, в этом взаимодействии скрыта природа активности ядер галактик и квазаров. У нас в стране эту идею успешно разрабатывают Н. С. Кардашев и И. Д. Новиков с коллегами в Институте космических исследований АН СССР.

2. Аккреционные диски

Вещество, которое падает на черную дыру и заставляет ее бурно проявлять себя, представляет собой газ, изначально бывший в галактике или сброшенный звездами в процессе их эволюции (звездный ветер) и взрывов сверхновых. Вблизи черной дыры возможно прямое разрушение в гравитационном поле черной дыры (приливное разрушение); «останки» этих звезд также «питают» черную дыру.

При сжатии к центру системы газ образует в конце концов быстровращающийся тонкий диск, удерживаемый в равновесии центробежной силой. Но из-за внутреннего трения,

обусловленного вязкостью газа, угловой момент передается наружу, поэтому полное равновесие не достигается; каждая частичка газа, теряя угловой момент, медленно движется к черной дыре, описывая спиральную траекторию. Этот процесс называют *дисковой аккрецией*. В больших подробностях он был проанализирован в начале 70-х годов московскими астрофизиками Р. А. Сюняевым и Н. С. Шакурой.

Чем он интересен? Оказывается, что при дисковой аккреции также выделяется огромная энергия. Сейчас есть убедительные доказательства того, что значительная, если не подавляющая часть рентгеновского излучения в двойных системах звезд обусловлена газовым диском, аккрецирующим на релятивистскую компоненту — на нейтронную звезду или черную дыру. Хорошо известный пример — двойная система SS 433.

Выделение энергии в аккреционном диске вызвано в первую очередь трением — энергия движения газа к центру из-за трения превращается в тепло. Но вблизи черной дыры основное выделение тепла обусловлено просто сжатием газа — известно, что газ при сжатии нагревается. Эти процессы энерговыделения, возможно, ответственны за многие явления, которые наблюдаются в ядрах активных галактик и в квазарах.

Если в аккрецирующем диске скорость вращения значительно больше, чем тепловая скорость частиц газа, то толщина диска h будет гораздо меньше его радиуса, т. е. $h/r \ll 1$. Такой тонкий диск удерживается от немедленного падения на дыру центробежной силой. Но если скорость вращения и тепловая скорость сравнимы, то важную роль играет и градиент давления, а поскольку давление действует одинаково во все стороны, то размеры диска вдоль радиуса и по толщине будут также сравнимы, т. е. $h/r \approx 1$. Это — толстый диск. Теория тонких дисков вокруг массивных черных дыр показывает, что в простейшем случае они должны излучать как черное тело с максимумом энергии в ультрафиолетовой области. Это не может объяснить излучение квазаров и активных ядер галактик, поскольку зачастую они излучают почти одинаковое количество энергии во всем диапазоне волн: в инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском и т. д. Но в теории много еще нерешенных вопросов, связанных с учетом вязкости, магнитного поля и других факторов. Поэтому какие-либо категорические утверждения относительно тонких дисков, по-видимому, преждевременны.

Если вещество в диске настолько плотно, что оно стано-

вится оптически непрозрачным, то в диске накапливается излучение, и в конце концов давление излучения сравнивается по величине с гравитационным притяжением, т. е. оно способно удерживать диск от падения на дыру. Возникает толстый радиационный, или лучистый диск. Но не только давление радиации может играть главную роль в образовании толстого диска. Если тепловая энергия в диске выделяется настолько быстро, что не успевает излучаться, то газ быстро нагревается и тепловое давление частиц ионизованного газа — ионов — сдерживает сжатие, тормозит аккрецию. В этом случае говорят об ионном диске.

В обоих случаях правильное, может быть, говорить не о дисках, а о торах: поскольку в центральной части в области воронки газа почти нет (попадая туда, он быстро «проваливается» в дыру или выбрасывается наружу давлением излучения), то газовая конфигурация больше напоминает тор, чем диск.

Если давление радиации уравнивает гравитационное притяжение, как это имеет место в радиационных дисках (или торах), то нетрудно оценить энергию, излучаемую телом. Она близка к так называемому эддингтоновскому пределу светимости

$$L_E = \frac{4\pi G m_p c}{\sigma_T} \approx 1,3 \cdot 10^{46} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right) \text{ эрг/с},$$

где M — масса тела, m_p — масса протона, $\sigma_T = 6,65 \times 10^{-25} \text{ см}^2$ — томсоновское сечение рассеяния (рассеяние света на электроны); L_E определяется как светимость, при которой сила лучевого давления на электроны равна силе гравитационного притяжения. Кстати, если при этом размеры излучающего тела близки к гравитационному размеру r_g , то соответствующая этой светимости температура черного тела равна

$$T_E \approx 3,5 \cdot 10^5 (M/10^8 M_\odot)^{-1/4} \text{ К}.$$

Крайне интересным свойством радиационных торов с длинными, узкими воронками является то, что основная часть излучения идет как раз из этих воронок, с их внутренних поверхностей (это обусловлено тем, что здесь, ближе к черной дыре, сильнее гравитационное притяжение, значит, излучение должно быть интенсивнее, чтобы удерживать вещество от падения на дыру). Такой объект похож на сильный прожектор, светящий в двух противоположных направлениях.

Ионные торы образуются, когда скорость аккреции мала, т. е. когда мало количество вещества, продвинувшегося за единицу времени к дыре. Из-за малой скорости аккреции в ионных торах не может выделяться столь много энергии (при сжатии и из-за вязкого трения), как в радиационных. Зато они, по-видимому, могут эффективно «вычерпывать» внутреннюю энергию самой дыры; откачка энергии происходит при взаимодействии вращающейся черной дыры с магнитоплазменным телом тора.

Впрочем, и радиационный тор может также добавлять к своему энергетическому балансу энергию, определяемую вращением черной дыры. Важно, что в обоих случаях отбираемая мощность может быть чрезвычайно большой и вполне может объяснить энергетику квазаров и активных ядер. Единственная проблема — необходимо направить отбираемую у дыры энергию вдоль узкой оси воронки тора, иначе эта энергия «разнесет в куски» сам тор, т. е. разрушит само «устройство» для извлечения энергии из дыры.

Итак, если существуют массивные черные дыры, то не возникает особых затруднений с объяснением и большой энергии и большой мощности (светимости) квазаров и ядер активных галактик. Большие запасы энергии содержатся как в самих черных дырах (вращающихся), так и в аккрецирующих дисках; процессы в этих дисках и процессы их электромагнитного взаимодействия с вращающимися дырами вполне могут объяснить наблюдаемую мощность квазаров и активных ядер. Но совершенно иной вопрос: можно ли этими процессами объяснить конкретную форму активности, конкретные проявления энерговыделения у этих объектов?

Чтобы объяснить мощность излучения радиогалактик активностью черной дыры, масса последней в любом случае должна быть не меньше $10^7 M_{\odot}$. Но тогда наблюдаемое тепловое излучение из центра, в среднем составляющее 10^{42} эрг/с, значительно меньше эддингтоновского предела светимости: $L \leq 10^{-3} L_E$. А это означает, что оно не может создаваться радиационным тором: он излучает всегда на уровне L_E . Поэтому американские астрофизики Р. Бландфорд, М. Бегелман, М. Рис, Е. Пинни пришли к выводу, что ядра радиогалактик представляют собой массивные вращающиеся черные дыры, окруженные ионным тором. Электромагнитное взаимодействие тора с дырой обеспечивает извлечение энергии вращения дыры в виде двух противоположно направленных релятивистских струй вещества. Поддерживать существование такого тора может даже чрезвычайно слабая аккреция, всего около $10^{-3} M_{\odot}$ в год.

Большая часть квазаров, как известно, сравнительно мало излучает в радиодиапазоне («радиотихие» квазары). Основная часть их излучения, сосредоточенная в ультрафиолетовой области, может быть объяснена излучением радиационного тора вокруг дыры с массой $(10^7 - 10^{10}) M_{\odot}$. Крайне любопытно, что главным источником энергии такого тора может быть не энергия сжатия газа в гравитационном поле и не энергия вязкого течения газа к центру, а термоядерная энергия превращения водорода в гелий — как и в обычных звездах!

Конечно, это одна из возможностей, и картина в целом должна быть гораздо сложнее. Чтобы объяснить широкий спектр излучения квазаров, надо предположить, что помимо теплового излучения действуют нетепловые механизмы: синхротронные, комптоновские. По-видимому, важную роль играют при этом ударные волны, магнитные вспышки (типа солнечных вспышек, но совершенно других масштабов). Возможно, с такими процессами связано мощное рентгеновское излучение квазаров.

3. Как рождаются джеты

В мощных радиогалактиках энергия радиоизлучающих областей, удаленных от центра системы часто на сотни килопарсек, как правило, заметно больше, чем энергия центрального источника. Так, в гигантской радиогалактике Лебедь А все излучение из центра в 10 раз меньше, чем радиоизлучение этих областей. Поскольку далекие области «питаются» энергией, переносимой струями из центрального источника, то следует заключить, что в данном случае подавляющая часть энергии центрального источника трансформируется в энергию релятивистских струй — джетов.

Как это происходит и какова природа струй? К сожалению, уверенного ответа пока нет. Проблема сильно осложняется тем, что даже в близких радиогалактиках мы можем различать (с помощью радиоинтерферометрических систем со сверхдлинной базой, РСДБ) масштабы не более нескольких парсек. Это на несколько порядков больше размера сверхмассивной черной дыры, тогда как исходя из физики черных дыр, рассмотренной выше, мы должны ожидать, что релятивистская струя начинает формироваться в области воронки аккреционного диска (тора) как раз на масштабах порядка r_g . Поэтому сейчас мы еще не можем наблюдать непосредственно рождение струй.

Впрочем, анализ возможных физических процессов в окрестности черной дыры показывает, что сжатие, точнее, коллимация струи в невероятно тонкий пучок направленной энергии окончательно может происходить только за пределами 1 пк; но природа этого коллимирующего сопла еще не очень ясна. Представляется, что главную роль в коллимации и сдерживании струи играет магнитное поле, связанное с механизмом формирования релятивистской струи и с ее взаимодействием с окружающей средой. В джете могут возникать довольно замысловатые системы электрических токов, и их магнитное поле стягивает поток плазмы в тонкую струю. Сдерживать струю от разлета может и давление окружающего ее газа, особенно в центральных частях системы. Но этот механизм сталкивается с большими трудностями. Неизвестно также, что именно выбрасывается вначале в струю. Это может быть раскаленный ионизованный газ, электронно-позитронная плазма или просто электромагнитное излучение. Важно постоянно помнить, что «впрыскиваемая» в струю энергия далее подвергается непрерывной трансформации на всем пути продвижения до самых удаленных точек радиоизлучающих областей.

Действительно, наблюдаемое радиоизлучение — это излучение ультрарелятивистских электронов, движущихся в магнитных полях, т. е. синхротронное излучение. Но такие электроны практически мгновенно теряют энергию, высвечивая ее. Значит, электроны с релятивистскими скоростями непрерывно рождаются в самой струе на всем ее протяжении в сотни килопарсек, т. е. сама струя представляет собой какое-то удивительное устройство, непрерывно ускоряющее электроны до ультрарелятивистских скоростей. Вдоль струи идет постоянный поток энергии, питающий это устройство. И хотя природу потока мы не знаем, ясно одно — это не первоначальная струя частиц, ускоренная в воронке аккреционного тора или диска.

Рассмотрим несколько подробнее, как джеты могут возникать в центральном источнике, на расстоянии порядка нескольких r_g .

Начальное формирование двусторонней струи происходит, скорее всего, в воронке, создаваемой аккреционным диском вокруг черной дыры. Здесь вещество может ускоряться до релятивистских скоростей несколькими путями. Если центральный источник может выделять энергию на уровне, значительно большем эддингтоновского предела, т. е. $L \gg L_E$, а в область воронки попадают облака газа, непрозрачные к излучению, то излучение захватывается

облаками, и его энергия эффективно переходит в энергию движения облаков. Этот механизм ускорения вполне может разгонять газ вдоль оси воронки до релятивистских скоростей, может «перекачивать» огромное количество энергии излучения в кинетическую энергию движения вещества струи.

Другая возможность — электромагнитное ускорение. Во вращающемся аккреционном диске, пронизанном магнитными полями, возникает гигантское электрическое поле, с разностью потенциалов порядка 10^{20} вольт. Столь сильное поле способно быстро ускорить заряженные частицы до сверхвысоких энергий. При этом может развиваться каскадный процесс рождения электрон-позитронных пар, например, по такой схеме. На электронах высоких энергий происходит так называемое комптоновское рассеяние фотонов, в результате которого фотонам передается большая энергия и они становятся гамма-квантами. Гамма-кванты с энергией больше 511 кэВ (это энергия, соответствующая массе покоя электрона), взаимодействуя друг с другом, рожают электрон-позитронные пары. Те в свою очередь ускоряются до сверхвысоких энергий, и т. д. В результате из воронки будет выбрасываться релятивистская струя электронно-позитронной плазмы.

Возможно также ускорение газа просто давлением излучения. Теоретические исследования показали, что в этом случае трудно ускорить вещество до ультрарелятивистских скоростей, пока оно находится внутри воронки, вблизи центрального источника. Ускорению препятствует ряд процессов. Например, из-за многократных рассеяний фотонов на внутренней поверхности воронки многие из них приобретают импульс в обратном направлении, т. е. к источнику. Такие фотоны тормозят вылетающую плазму, и ее скорость не может вырасти заметно выше параболической скорости. Другой эффект в мощном поле излучения вблизи источника, светящего на уровне эддингтоновского предела L_E , ускоренные до больших энергий частицы передают энергию фотонам при комптоновском рассеянии, а сами в результате тормозятся. Возможно, поэтому в мощных квазарах энергия из центра выходит в виде электромагнитного потока, и сколько-нибудь заметной струи вблизи центрального источника не должно быть. Вероятно, передача импульса от электромагнитного потока струе вещества происходит на расстояниях 1—10 пк от центра, потому что именно здесь, согласно данным наблюдений на РСДБ, начинается область интенсивного радиоизлучения, связанного со струями.

В настоящее время разработано большое количество моделей формирования и коллимации джетов, моделей ускорения в них частиц до релятивистских энергий. Главное, что мешает принять какие-то из них безоговорочно, — наше «многознание»: о джетах известно столько, что для любой модели почти обязательно найдется факт, который ей противоречит. Даже исходная идея о релятивистской струе, как мы видели в предыдущей главе, не очень-то согласуется, например, со свойствами изогнутых, искривленных джетов. Поэтому решение многочисленных загадок этих замечательных объектов потребует еще немало сил и энергии.

4. Подсчеты квазаров

Главная трудность в решении вопроса, что же на самом деле происходит в центре квазаров и активных ядер, заключается в том, что излучение центральной области, где и происходит генерация энергии, имеет непрерывный спектр, содержащий в себе мизерное количество информации. Подавляющую часть информации о физических условиях и процессах астрофизики извлекают из линейчатых спектров. К сожалению, линии и в квазарах, и в ядрах активных галактик формируются далеко от центра, и об этих далеких областях мы действительно знаем довольно много; но это уже другая тема.

Некоторую информацию о характеристиках центрального объекта можно получить, анализируя подсчеты числа квазаров; такие подсчеты в сопоставлении с энергетикой квазаров и ядер активных галактик интересны, кроме того, сами по себе. Они приводят к весьма интересным числам, позволяющим, например, судить о том, сколько времени живут квазары, имели ли все галактики в начале у себя в центре квазар или нет и т. д.

Поскольку квазары наблюдаются на больших красных смещениях, то можно думать, что они в большом количестве рождались на ранних стадиях эволюции Вселенной и сравнительно быстро угасали. Подсчеты показали, что в эпоху $z \approx 2$ число мощных источников излучения уменьшается с характерным масштабом времени $t_{ev} \approx 10^9$ лет (при постоянной Хаббла H_0 , равной 50 км/(с·Мпк)). Если в течение этого периода не рождаются постоянно новые квазары, то величина t_{ev} давала бы оценку времени существования отдельного квазара.

Излучение большого числа далеких квазаров и галактик с активными ядрами мы воспринимаем как фон электромагнитного излучения в самых разных диапазонах спектра. Плотность энергии излучения достигает $3 \cdot 10^3 \text{ Мпк}^{-2} \text{ Мпк}^{-3} \approx 5,4 \cdot 10^{57} \text{ эрг/Мпк}^3$, причем она обусловлена в основном квазарами с видимыми звездными величинами в диапазоне $19^m < B < 21^m$ (основная часть измеряемой плотности энергии приходится на ультрафиолетовый диапазон). Эти звездные величины соответствуют светимости до $4 \times 10^{46} \text{ эрг/с}$, если их отнести на расстояние $z \approx 2$. Пространственная плотность таких квазаров около $5 \cdot 10^{-6} \text{ Мпк}^{-3}$.

Пусть доля массы покоя, превращаемая центральным объектом в излучение, равна ϵ . Тогда масса центрального объекта в этих квазарах составляет $\sim 6 \cdot 10^8 \epsilon^{-1} (t_Q/t_{ev}) M_\odot$, где t_Q — характерное время существования квазара. Если $t_Q \approx t_{ev}$, то эта масса будет $\sim 6 \cdot 10^8 \epsilon^{-1} M_\odot$, что при $\epsilon = 0,1$ составляет $10^9 - 10^{10} M_\odot$. Но приведенное выше характерное значение светимости квазара соответствует эддингтоновскому пределу светимости для массы $10^8 M_\odot$. Отсюда сразу приходим к выводу, что если квазары существуют долго, т. е. $t_Q \approx t_{ev}$, то центральный объект не может быть радиационным тором, так как в этом случае светимость должна быть близка к эддингтоновской. Но это может быть ионный тор: у него светимость может быть существенно меньше эддингтоновской, поэтому большая масса центрального объекта не противоречит приведенным значениям светимости квазаров.

Кстати, если $t_Q \approx t_{ev}$, то пространственная плотность объектов, которые когда-то были квазарами с $L \approx 10^{46} \text{ эрг/с}$, близка к плотности числа мощных радиогалактик. Если же предположить, что все достаточно массивные галактики, скажем, с абсолютной звездной величиной $M_V < -21^m$, имели в центре квазар, то оценка времени существования квазаров становится меньше величины t_{ev} , а именно $t_Q \approx 2,5 \cdot 10^{-2} t_{ev} \approx 2,5 \cdot 10^7$ лет. Соответственно уменьшается оценка массы центрального объекта, она тогда равна $2 \cdot 10^6 \epsilon^{-1} M_\odot$.

Однако данные наблюдений, похоже, противоречат последней гипотезе, и подавляющее большинство галактик никогда не имело квазара в центре. Об этом говорят результаты Гэстон, которые мы рассматривали в гл. 5 в связи с проблемой нагрева межгалактического газа. Даже просто свойство активности ядра и то возможно «закреплено» за галактикой навечно: обычные галактики никогда не имели сейфертовского ядра, а сейфертовские всегда были сейфер-

товскими. И если это так, то мы можем говорить о квазарах как о чрезвычайно редкой популяции объектов во Вселенной, имеющих в центре черную дыру, масса которой сравнима с массой гигантских галактик; при этом излучение квазаров создается ионным тором.

5. Что происходит в области формирования широких линий?

Самая информативная часть излучения квазара возникает далеко за пределами центрального источника, на расстояниях порядка парсека от центра. Именно в этой области рождаются широкие эмиссионные линии, являющиеся самой характерной чертой спектрального «портрета» квазаров. Она получила особое название — область широких линий.

С самого начала было ясно, что широкие линии излучаются облаками ионизованного газа, движущимися со скоростью порядка тысяч километров в секунду. Каждое облако в отдельности излучает узкие линии, соответствующие температуре $T = (1-2) \cdot 10^4$ К, но из-за доплеровского смещения, обусловленного движением облаков, в их суммарном излучении каждая линия размывается в широкий профиль. По ширине профиля, собственно, и оценивают среднеквадратичную скорость облаков.

Но откуда берутся столь большие скорости? Ведь они в десятки, а то и сотни раз больше, чем скорости звезд в ядрах галактик! Широко известное объяснение состоит в том, что в квазарах, а также в ядрах активных галактик, имеющих в спектре широкие линии, в пределах нескольких парсек вокруг центра происходит ускорение оптически толстых, т. е. непрозрачных для излучения, облаков газа до многих тысяч километров в секунду давлением излучения центрального источника. Мощное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение поглощается в процессах ионизации и возбуждения атомов водорода, гелия и тяжелых элементов, при этом импульс квантов электромагнитного поля передается атомам.

Расчеты показали, что этот механизм ускорения деформирует облака таким образом, что они сжимаются в тонкий «блин», ориентированный поперек направления движения, т. е. перпендикулярно радиальному направлению. Одновременно выяснилось, что при тех значениях плотности и температуры облаков, которые вытекают из характеристик линий в спектре квазаров, т. е. $10^8 \text{ см}^{-3} \leq n \leq 10^{10} \text{ см}^{-3}$,

$T \approx (1-2) \cdot 10^4$ К, облака, прежде чем успевают ускориться до наблюдаемых скоростей, должны буквально разорваться внутренним давлением. Поэтому оказалось необходимым предположить, что пространство между облаками заполнено разреженным горячим газом, который препятствует их разлету. Температура газа должна составлять десятки и сотни миллионов кельвинов, т. е. в тысячи раз больше, чем температура облаков; плотность же во столько раз меньше, так что давление $P = nkT$ в облаках и в окружающем газе примерно одинаково. В таком случае облака могут длительное время сохраняться и вполне успеют ускориться до скоростей порядка тысяч километров в секунду.

Такая картина области широких линий остро поставила вопрос: а откуда берется здесь газ? Ведь вылетающие с огромной скоростью облака очень быстро опустошат запасы газа в этой области. Оценки показывают, что за год отсюда вылетает до $1 M_{\odot}$. Если квазар существует 10^7 лет, то из области широких линий будет вынесено до $10^7 M_{\odot}$! Но откуда взять такое огромное количество газа в столь крошечной по размерам, всего $0,1-1$ пк, области? Для сравнения напомним, что в нашей Галактике вся масса звезд в центре, внутри радиуса $r=1$ пк, не превосходит значения $10^7 M_{\odot}$.

Найти столь мощный источник пополнения газа очень непросто, и проблема истечения газа из области широких линий, возможно, потребует самых радикальных решений. Крайне любопытный механизм, уж наверняка самый неординарный из всех предложенных, рассмотрел американский астрофизик У. Мэтьюз. Вначале он отметил, что масса вещества, которую сбрасывают звезды в процессе нормальной звездной эволюции, совершенно недостаточна для пополнения газа в области широких линий, даже если каким-то образом собрать все вещество, сбрасываемое звездами балджа (т. е. в радиусе $r \approx 1$ кпк) в область с радиусом $r=1$ пк (предполагается, что квазар находится в центре галактики с обычным звездным балджем, типичная масса которого $M \approx 10^{10} M_{\odot}$). Затем он анализирует взаимодействие рентгеновского излучения квазара со звездами малой массы, $M \approx 0,1 M_{\odot}$ (обычно это карлики спектрального класса М), в которых, по-видимому, сосредоточена большая часть звездной массы галактик. Эти звезды полностью конвективны, т. е. вещество в них от центра до поверхности активно перемешивается. Так вот, вблизи центрального источника энергии в квазаре, в области широких линий, рентгеновское излучение источника способно быстро разогревать такую звезду! Это излучение поглощается в верхних слоях звезды и

конвекцией уносится внутрь. Температура и давление в звезде растут, и она начинает раздуваться, становясь чем-то подобным красному гиганту с его огромной разреженной атмосферой, слабо удерживаемой гравитацией звезды. Этот процесс Мэтьюз назвал обратной звездной эволюцией. Далее лучистое давление центрального источника без труда срывает распухшую атмосферу звезды, унося ее в межзвездное пространство. В результате карлики поздних спектральных классов могут очень эффективно пополнять запасы газа в области, где возникают широкие линии. Так ли это на самом деле — трудно сказать, но в красоте и остроумии этому механизму отказать нельзя. Мэтьюз привлекает внимание к факту, что по некоторым данным в звездном ядре нашей Галактики аномально мало карликов поздних типов. Не «сгорели» ли они подобным образом в «пламени» квазара, который некогда мог быть в центре Галактики? Впрочем, мы только что говорили, что в обычных галактиках квазаров, скорее всего, никогда не было.

Если вопрос о происхождении газа в области широких линий и о причине его больших скоростей не столь ясен (некоторые авторы считают, что газ в этой области не ускоряется и не вылетает из нее, а вращается со скоростью $\sim 10^3$ км/с вокруг сверхмассивной черной дыры и удерживается ее гравитационным полем), то происхождение энергии свечения газа не вызывает сомнения: это ионизирующее излучение центрального источника. Об этом говорит связь между светимостью широких балмеровских линий H_α , H_β и светимостью в непрерывном спектре L_c , которая обусловлена уже не облаками газа, а центральным источником. Было установлено, что такая связь есть и что она линейна:

$$L_{H_\alpha} \propto L_c, \quad L_{H_\beta} \propto L_c.$$

Если свечение в линиях возникает в результате рекомбинаций, то интенсивность линий пропорциональна числу актов ионизаций, так как каждый ион, превращаясь в нейтральный атом при рекомбинации, даст спектральную линию (или набор разных линий). А количество ионизаций (в единицу времени), очевидно, пропорционально числу ионизирующих квантов, т. е. ультрафиолетовой светимости источника. Отсюда ясно, что в этом случае интенсивность линии прямо пропорциональна интенсивности ионизирующей, ультрафиолетовой части непрерывного спектра.

Совсем иная картина была бы, если бы свечение в линиях возникало, например, вследствие возбуждений атомов при

столкновениях с электронами и последующих переходов атомов в основное состояние. Такой механизм действует, в частности, при прохождении через газ мощных ударных волн, сопровождающих сильные взрывы. В этом случае светимость центрального источника не имела бы никакого отношения к светимости линий.

Подобного рода связи, корреляции между различными характеристиками излучения в разных диапазонах спектра вообще не позволяют слишком фантазировать о происходящем в ядрах активных галактик и квазаров, о природе этих объектов; они подсказывают, что там на самом деле может быть, и не позволяют сбиться с пути при теоретическом конструировании модели объекта.

Так, обнаруженная корреляция между рентгеновской светимостью L_X и оптической светимостью $L_{\text{опт}}$ квазаров свидетельствует о том, что оба типа излучений возникают в одной и той же компактной области, например, в аккреционном диске вокруг черной дыры. При этом сам вид корреляции:

$$L_X \propto L_{\text{опт}}^{1/2}$$

еще нуждается в объяснении, и правильной будет только такая теория, которая даст пропорциональность L_X именно корню квадратному из $L_{\text{опт}}$.

Еще пример. Энергия излучения центрального источника превращается не только в энергию свечения облаков в области широких линий, но и в кинетическую энергию их движения. Если это так, то можно ожидать, что чем больше светимость центрального источника, тем больше скорость облаков, тем больше доплеровская ширина линий. И действительно, такая зависимость обнаружена. Наблюдается сильная корреляция между рентгеновской светимостью ядер сейфертовских галактик и шириной линий H_α , H_β . У самых мощных ядер $L_X = 10^{44} - 10^{45}$ эрг/с, при этом доплеровская ширина линий равна $v = 3000 - 10000$ км/с. У слабых ядер (галактики Sy 2) $L_X = 10^{41} - 10^{42}$ эрг/с и $v = 300 - 700$ км/с. Любопытно, что при переходе к более мощным объектам — квазарам, у которых $L_X = 10^{46} - 10^{47}$ эрг/с, доплеровская ширина перестает увеличиваться; обычно у них $v = 5000 - 7000$ км/с.

Крайне важную информацию дает отношение интенсивностей широких линий. Здесь два главных факта: во-первых, отношение светимостей линии L_α к линиям H_α и H_β примерно на порядок меньше, чем должно быть при фотоионизационном механизме свечения; аналогично значение

$L_{H\beta}/L_{H\alpha}$ намного меньше расчетного. Во-вторых, детальное изучение корреляции между светимостью центрального источника и светимостью облаков показало, что наблюдаемая энергия ионизирующего ультрафиолетового излучения в несколько раз меньше, чем требуется для объяснения ионизации, и соответственно, светимости линий. Оба факта говорят о том, что светимость коротковолновой части спектра меньше, чем необходимо для объяснения данных наблюдений. Куда же «пропадают» высокоэнергичные кванты?

Астрономы уже давно знают механизм потери таких квантов в галактиках — это селективное поглощение межзвездной пылью. Пыль сильно поглощает коротковолновое излучение, и слабо — длинноволновое (напомним, что по этой причине мы хорошо видим далекий центр нашей Галактики в инфракрасных лучах, а в видимой части спектра он из-за пыли совершенно не просматривается). Поэтому для объяснения «недостачи» ультрафиолетовых квантов в спектрах квазаров в первую очередь была привлечена пыль. Она может быть в самой области, где формируются широкие линии, или же в промежуточных галактиках, через которые проходит свет квазара по пути к нам; но, скорее всего, она находится в родительской галактике самого квазара. Это чрезвычайно важный вывод для проблемы формирования галактик; если он подтвердится, то это, по-видимому, будет означать, что практически нормальный, солнечный химический состав имеет не только центр квазарной галактики, т. е. область эмиссионных линий, но и вся галактика. В таком случае тяжелые элементы в спиральных галактиках, с которыми чаще всего и связывают квазары, возникают в течение первого миллиарда лет их существования, в период формирования и эволюции звезд гало спиральной галактики, задолго до образования звездного диска (см. в гл. 8 раздел 5).

И еще одно крайне важное обстоятельство вытекает из существования пыли на больших расстояниях (большие красные смещения). При наблюдениях объектов, например, квазаров или галактик, с красными смещениями $z > 5$, в видимый диапазон спектра будет попадать их далекая ультрафиолетовая область. А она уже настолько сильно поглощается пылью, что до нас это излучение вообще не «прорвется». Сейчас самый далекий квазар имеет красное смещение $z \approx 4,5$. Не исключено, что из-за пыли мы никогда и не увидим (в оптическом диапазоне) квазары и галактики с красными смещениями $z > 5$, даже если они уже успели сформироваться к этому времени.

ПРОТОГАЛАКТИКИ И КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

В течение длительного времени после Большого взрыва, в котором родилась наблюдаемая Вселенная, вещество равномерно заполняло все пространство. Мы видим один из периодов той далекой эпохи, исследуя реликтовое излучение. В это время температура в процессе расширения Вселенной упала до 4000 К, и первоначально ионизованное вещество — водородно-гелиевая плазма — рекомбинировало, превращаясь в нейтральный газ. Реликтовое излучение — это свет, идущий из области рекомбинирующей плазмы, сдвинутый для нас из оптического диапазона в радиодиапазон из-за большого красного смещения эпохи рекомбинации, $z \approx 1500$ (см. гл. 7).

К моменту рекомбинации прошли уже миллионы лет после начала расширения, но во Вселенной все еще нет ни звезд, ни звездных галактик. Более того, равномерная яркость реликтового излучения по всему небу, отсутствие заметных флуктуаций его яркости (или температуры) говорит о том, что вещество в это время вообще в высшей степени однородно, в нем нет заметных флуктуаций его плотности.

В наши же дни Вселенная крайне неоднородна, ее вещество находится в звездах, галактиках, скоплениях галактик. Значит, между стадией рекомбинации ($z \approx 1500$, $t \approx 10^7$ лет после Большого взрыва) и эпохой первых квазаров ($z \approx 4$, $t \approx 10^9$ лет) произошли какие-то события, в результате которых Вселенная стала звездной, заполнилась галактиками — словом, произошло рождение галактик.

В связи с этим возникают два вопроса, несомненно, важнейших в современной астрофизике. Как и когда в первоначально однородном веществе расширяющейся Вселенной возникли неоднородности, которые в конечном итоге обособились от окружающей среды и привели к образованию структуры, к образованию сверхскоплений, скоплений, протогалактик? Как газовая протогалактика становится звездной системой, т. е. как формируются собственно галактики? Первый вопрос составляет сегодня содержание теории крупномасштабной структуры Вселенной, второй — теории формирования галактик (ей посвящена следующая глава). Разумеется, они тесно связаны друг с другом. Так, зная из наблюдений свойства галактик, можно сделать некоторые заключения о свойствах протогалактик, которые, увы, до сих пор не удается наблюдать. Это дает возмож-

ность судить о правильности той или иной картины происхождения крупномасштабной структуры. С другой стороны, наблюдательные данные о крупномасштабной структуре: о скоплениях и сверхскоплениях галактик, о гигантских пустотах, о сетчато-ячеистой структуре Вселенной в целом — могут подсказать, как происходило формирование галактик (очень много здесь дали наблюдения горячей межгалактической среды, не меньше ожидается от исследования содержимого гигантских пустот — *войдов*). Как же представляется сегодня образование крупномасштабной структуры Вселенной и происхождение протогалактик?

1. Теория «блинов»

Возникновение и развитие этих представлений в 70-х годах связано главным образом с теорией блинов, которую предложил академик Я. Б. Зельдович с сотрудниками. Происхождение структуры в ней связывается с первоначально малыми адиабатическими возмущениями (неоднородностями) плотности, скорости и других параметров в однородной Вселенной. Чтобы объяснить современную структуру, амплитуда возмущения плотности в эпоху рекомбинации должна составлять около 0,05 средней плотности. Расчеты показали, что вследствие нелинейных газодинамических эффектов с течением времени возмущения нарастают, и к периоду образования протогалактик возникают обширные области высокой плотности, имеющие вид тонких, плоских слоев вещества. Они были названы блинами. В центральной части блина вещество сильно сжато, и в натекающем на центр холодном газе возникает ударная волна. Температура сразу за фронтом ударной волны чрезвычайно высока, но затем вследствие лучистого охлаждения она должна падать, причем особенно быстро в центральной, наиболее плотной области. Вот здесь уже под действием гравитационной и тепловой неустойчивости должен происходить распад, фрагментация блина на протогалактические газовые облака, и он должен превращаться в скопление протогалактик.

Отождествление со скоплением не случайно: характерная масса блинов составляет $10^{13}—10^{14} M_{\odot}$, т. е. совпадает с типичной массой скоплений галактик. Этот важнейший количественный результат теории получается из анализа поведения малых возмущений в горячей Вселенной. Такой анализ чрезвычайно информативен и для других моделей

образования структуры, разрабатываемых в наши дни, поэтому небезынтересно познакомиться с ним чуть ближе.

Естественно ожидать, что относительное возмущение плотности, $\delta\rho(l)/\rho$, в среднем тем больше, чем меньше размер l рассматриваемой области. Часто эту зависимость описывают законом

$$\frac{\delta\rho(l)}{\rho} \propto l^{-2},$$

где ρ — средняя плотность, $\delta\rho$ — отклонение плотности от среднего значения. Если в этом соотношении перейти к массе, $\delta M \approx l^3 \delta\rho(l)$, $M \approx l^3 \rho$, то получим спектр возмущений массы

$$\frac{\delta M}{M} \propto M^{-2/3}.$$

Такой спектр автоматически возникает в теоретических моделях Вселенной, в которых есть начальная стадия быстрого расширения — *стадия инфляции*. Возмущения разных масштабов в расширяющейся Вселенной ведут себя неодинаково. Адиабатические флуктуации в масштабах, превышающих размер горизонта (напомним, что это расстояние, которое свет успевает пройти за время от начала расширения Вселенной, $R=ct$), возрастают линейно со временем. Поскольку размеры горизонта увеличиваются (со скоростью света), то рано или поздно каждая флуктуация окажется внутри горизонта. И тогда она уже ведет себя как звуковая волна, распространяющаяся в среде из фотонов и водородно-гелиевой плазмы. Такая волна затухает из-за диффузии фотонов из области их повышенной концентрации (эффект фотонной вязкости). Очевидно, этот процесс идет быстрее в меньших масштабах. В итоге оказывается, что после рекомбинации, когда фотоны практически перестают взаимодействовать с атомами и излучение «отрывается» от вещества, все флуктуации, которым соответствуют массы $M < (10^{13}—10^{14}) M_{\odot}$, исчезают. А поскольку флуктуации, соответствующие большим массам, имеют меньшую амплитуду, то величине $(10^{13}—10^{14}) M_{\odot}$ соответствует наибольшая амплитуда среди всех оставшихся возмущений, и они будут выделяться в первую очередь.

Такая картина образования скоплений галактик и протогалактик сформировалась к середине 70-х годов. Она построена в рамках «стандартной» горячей модели Вселенной, состоящей из барионного вещества (водород и гелий) и излучения (фотонов); другие формы вещества в этой модели

никак не влияют на ее динамику (например, безмассовые нейтрино).

В этой схеме скопления образуются из первичных, «космологических» неоднородностей, но протогалактики могут возникать только в результате фрагментации блина, из неоднородностей, которые должны рождаться в нем и расти вследствие неустойчивости.

Теория блинов в стандартной модели столкнулась с серьезными трудностями. В частности, данные наблюдений о флуктуациях яркости (температуры) реликтового излучения показали, что возмущения плотности во Вселенной (в эпоху рекомбинации) не могут иметь столь большой амплитуды, которая требуется в этой теории для объяснения современной структуры. Поэтому в дальнейшем возникла необходимость усложнить рассмотренную картину и ввести в нее новые элементы. Одновременно возникли новые идеи объяснения происхождения скоплений и галактик. Современный этап развития проблемы связан с признанием решающей роли нового «действующего лица» — скрытой массы, или как теперь часто говорят, темного (несветящегося) вещества; есть основания считать, что его плотность примерно на порядок больше плотности обычного барионного вещества и в нем сосредоточена большая часть массы Вселенной.

2. Горячая, теплая и холодная скрытая масса

Хотя существование скрытой массы не вызывает больших сомнений, до сих пор она остается для нас темной, т. е. невидимой; мы не знаем, из каких частиц, из каких форм вещества она состоит. Тем не менее уже к середине 80-х годов в ней выделили три формы: холодную, теплую, горячую. Наиболее вероятным сейчас представляется, что темное вещество образовано нейтрино с ненулевой массой покоя и (или) другими элементарными частицами, которые перестают взаимодействовать с обычным веществом на самых ранних стадиях расширения Вселенной.

Развитие возмущений во Вселенной со скрытой массой обладает рядом особенностей по сравнению со стандартной горячей моделью. В их числе — явление свободного растекания и существование фазы застойного расширения — *стэспансии*.

Роль свободного растекания невзаимодействующих, «бесстолкновительных» частиц скрытой массы аналогична роли диффузии фотонов, фотонной вязкости. Растекание приводит к затуханию возмущений и выделению в спектре

возмущений масс вполне определенных значений; эти массы мы связываем затем с той или иной структурной единицей во Вселенной (галактика, скопление, сверхскопление). Суть явления такова. Пока размеры возмущений больше горизонта, $l > ct$, они нарастают линейно со временем, независимо от того, из каких компонент состоит вещество и как они взаимодействуют друг с другом. Ситуация меняется, когда горизонт превысит размер возмущения, т. е. возмущение «выйдет» из-под горизонта. Обычное (барионное) вещество с излучением представляет собой упругую среду; в ней адиабатические возмущения плотности становятся колебательными и распространяются в виде звуковых волн. Невзаимодействующие частицы темного вещества образуют газ с нулевой упругостью; поэтому в такой среде колебания возмущений, звуковые волны невозможны. Частицы свободно растекаются из областей повышенной плотности, и возмущения сглаживаются. Явление свободного растекания приводит, таким образом, к затуханию возмущений, вышедших из-под горизонта, и тем самым меняет вид спектра возмущений.

Поскольку речь идет о масштабах $l \approx R = ct$, то этот эффект будет сколько-нибудь замечен, если только скорости частиц близки к скорости света: только тогда за космологическое время t частицы успеют пройти область неоднородности ($l \approx ct$). Значит, затухание существует только до тех пор, пока газ темного вещества является релятивистским. Но в ходе расширения Вселенной температура уменьшается. Поэтому рано или поздно скорости частиц упадут до нерелятивистских значений, и тогда этот механизм затухания «выключается». Момент времени, когда газ становится нерелятивистским, можно оценить, приравняв среднюю кинетическую энергию частиц $3kT/2$ энергии массы покоя $m_x c^2$ (коэффициент $3/2$ опустим): $kT = m_x c^2$. Известно, что температура падает со временем по закону $T \propto t^{-1/2}$. Если температура газа темных частиц убывает во времени так же, как температура излучения во Вселенной, то отсюда находим, что этот момент времени зависит от массы частиц m_x :

$$t_x \propto \frac{1}{m_x^2}.$$

Из формулы видно, что чем массивнее частицы темного вещества, тем раньше они становятся «холодными», т. е. нерелятивистскими, тем раньше «выключается» затухание, тем меньше размер (и соответствующая ему масса) неоднородности, «выживающей» после выключения затухания.

Это обстоятельство и привело к разделению темного вещества на холодное, теплое и горячее. Горячим называли нейтрино. Возможная масса электронных нейтрино чрезвычайно мала, в десятки тысяч раз меньше, чем у электрона; в энергетических единицах она оценивается величиной $m_\nu \approx 10$ эВ (у электрона $m_e = 5,1 \cdot 10^5$ эВ). Поэтому нейтринный газ во Вселенной очень долго остается «горячим», т. е. релятивистским. В момент, когда он «остывает», масса в пределах горизонта составляет уже огромную величину, $M \approx 10^{13} M_\odot$. Возмущения (неоднородности), которым соответствует меньшая масса, к этому времени исчезли из-за эффекта свободного растекания. Следовательно, $M \approx 10^{13} M_\odot$ — наименьшая масса, которую могут иметь структурные единицы Вселенной, возникающие из начальных возмущений. Сейчас ее отождествляют с массой сверхскоплений галактик. Масса галактик и даже скоплений значительно меньше, поэтому они могут родиться только путем фрагментации сверхскопления, из вторичных неоднородностей.

Электронные нейтрино перестают взаимодействовать с веществом примерно через $t \approx 0,2$ с после начала расширения Вселенной. Они рождаются в основном в реакции превращения электрон-позитронных пар в нейтрино-антинейтринные пары (реакция аннигиляции): $e^- + e^+ \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$ (при $t < 0,2$ с скорости этого процесса в прямую и обратную сторону одинаковы). При $t \approx 10$ с оставшиеся электрон-позитронные пары аннигилируют окончательно, но уже с образованием фотонов. При этом плотности числа нейтрино и всех фотонов оказываются примерно одинаковыми, $n_\nu \approx n_\gamma$. Плотность фотонов мы знаем из наблюдений реликтового излучения, она равна $n_\gamma \approx 400 \text{ см}^{-3}$. Плотность массы нейтринного газа равна $\rho_\nu = m_\nu n_\nu$. Поскольку она не должна превышать наблюдаемое значение плотности во Вселенной, то отсюда и получается космологическое ограничение на массу нейтрино:

$$m_\nu \leq \frac{\rho_0}{n_\nu} \approx \frac{\rho_0}{n_\gamma}.$$

Если взять $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$, то $m_\nu \leq 10$ эВ.

На более ранних стадиях расширения Вселенной, при $t \ll 0,2$ с, могли рождаться и отрываться от вещества более массивные, чем нейтрино, частицы, но в гораздо меньшем количестве. Есть основания считать, что масса некоторых из них была $m_x \approx 10^3$ эВ. В соответствии с формулой $t_x \propto m_x^{-2}$ они «остывают» гораздо раньше нейтрино, и потому были

названы теплыми (на самом деле средняя кинетическая энергия частиц горячего и теплого вещества, конечно же, одинакова). К моменту «остывания» масса в пределах горизонта порядка $10^9 - 10^{12} M_\odot$. Таким образом, если во Вселенной доминирует теплое вещество, то избежать затухания (из-за эффекта растекания) удастся неоднородностям с массой, сравнимой с массой галактик, $M \approx 10^9 - 10^{12} M_\odot$.

В качестве частиц, которые могли бы образовать теплое вещество, рассматривались гравитино, фотино, глюино и другие. Но каждый раз возникали те или иные затруднения, так что «надежных» кандидатов, в отличие от случая горячей и холодной скрытой массы, для частиц теплого вещества пока не найдено.

Наконец, холодным темным веществом называли газ частиц, которые оказываются нерелятивистскими на еще более ранних стадиях эволюции Вселенной и для которых эффект растекания перестает действовать, когда масса в размерах горизонта гораздо меньше массы типичной галактики, $M \ll 10^{10} M_\odot$.

Носителями холодного вещества могут быть аксионы — гипотетические частицы с массой $m_a \approx 10^{-5}$ эВ, которые были введены в рамках современного раздела теории элементарных частиц — квантовой хромодинамики. Они приобретают отличную от нуля массу покоя, когда в процессе расширения Вселенной квантовохромодинамические взаимодействия, в соответствии с предсказаниями теории Большого (Великого) Объединения, становятся сильными. Аксионы оказываются нерелятивистскими сразу же после этого перехода, и их температура не связана с температурой остального вещества Вселенной (иначе при столь малой массе они были бы горячее, чем даже нейтрино).

Другой кандидат на роль частиц холодного вещества — тяжелые фотино с массой $m_\gamma > 2 \cdot 10^9$ эВ. И этим список кандидатов, который предоставляет космологам современная теория элементарных частиц, теория Большого Объединения отнюдь не исчерпывается.

Наряду с моментом «выключения» растекания t_x , для эволюции спектра возмущений, следовательно, для последующего характера крупномасштабной структуры Вселенной, важную роль играет стадия стэгспансии. С ней связан еще один характерный момент времени, а именно: момент, когда полная плотность энергии (темного) вещества $\rho_x c^2$ сравнивается с плотностью энергии излучения $c_2 T^4$:

$$\rho_x c^2 = c_2 T^4,$$

где c_2 — постоянная излучения. Зная сегодняшнюю температуру, $T_0 = 2,7$ К, и плотность, $\rho_x \approx \rho_0 \approx 10^{-30}$ г/см³, из этой формулы нетрудно найти соответствующий момент, $t = t_{eq}$, используя зависимости ρ и T от времени ($T^4 \propto \rho \propto t^{-2}$): он оказывается близким к $t = 10^9$ лет после начала расширения, и наступает незадолго перед рекомбинацией. При $t > t_{eq}$ во Вселенной доминирует гравитация вещества, при $t < t_{eq}$ доминирует излучение.

Для нейтринного газа оба момента t_{eq} и t_x наступают почти одновременно, т. е. $t_{eq} \approx t_x$. Поэтому когда неоднородности при $t = t_x$ «выходят» из-под горизонта, они тут же «подхватываются» собственной гравитацией и под ее воздействием продолжают расти, правда, уже не линейно со временем, а лишь как $t^{1/2}$.

Иное дело в случае теплой и холодной скрытой массы. Для них $t_x \ll t_{eq}$, и когда при $t = t_x$ из-под горизонта начинают впервые выходить незатухающие возмущения, их гравитационное поле ничтожно мало по сравнению с гравитационным полем возмущений плотности излучения. Поэтому вначале неоднородности вообще не нарастают, и лишь постепенно, по мере приближения к моменту $t = t_{eq}$, амплитуда возмущений начинает расти. Этот период «застоя» в развитии возмущений на интервале от $t = t_x$ до $t = t_{eq}$ и был назван стэгспансией.

В то же время возмущения, у которых размеры больше горизонта, продолжают нарастать со временем по линейному закону. В результате первоначальный спектр возмущений плотности, $\delta\rho(l)/\rho \propto l^{-2}$, «выпрямляется» и становится почти плоским в той части, которая «вышла» из-под горизонта. Это весьма важное обстоятельство для понимания того, как возникла иерархическая структура Вселенной: галактики, скопления, сверхскопления.

3. Образование структуры во Вселенной со скрытой массой

Из сказанного выше ясно, что формирование структуры Вселенной, да и сама структура будет разной в зависимости от того, какая форма темного вещества доминирует: горячая, теплая или холодная; от этого зарисуют также и свойства галактик разных типов. И если разобьются, к чему, к какой структуре приводит развитие возмущений в каждом случае, то можно будет решить вопрос, какая форма скрытой массы существует на самом деле во Вселенной.

Во Вселенной с горячим (нейтринным) темным веществом в виде первичной структурной единицы выделяется масса $\sim 10^{15} M_\odot$, типичная масса сверхскопления галактик. Как показали исследования группы Я. Б. Зельдовича, рост возмущений плотности в бесстолкновительном газе нейтрино также приводит к образованию блинов — тонких плоских областей сильно сжатого вещества. При этом линии пересечения разных блинов образуют особо плотные «нити», а пересечения нитей — еще более плотные «узлы». Сами блины образуют тонкие стенки, которые ограничивают гигантские пустые области. В результате возникает сетчато-ячеистая структура. Такая структура стала вырисовываться с начала 80-х годов, когда накопившиеся измерения красных смещений (следовательно, и расстояний) далеких галактик и скоплений позволили установить картину устройства Вселенной в очень больших масштабах. Были обнаружены гигантские пустоты с размерами в десятки мегапарсек, не содержащие ярких галактик (первая пустота найдена в направлении на созвездие Волопаса); границы пустот окаймляют цепочки галактик и их скоплений. Существование сетчато-ячеистой структуры стало аргументом в пользу теории нейтринных блинов, в пользу гипотезы о горячей скрытой массе.

Однако тут же возникли и осложнения. Более мелко-масштабная структура — скопления и галактики — в этой теории должна получаться в результате коллапса и фрагментации сверхскоплений. Но расчеты показывают, что этот процесс начинается при красных смещениях $z < 2$. Поскольку мало сомнений в том, что галактики стали рождаться на самом деле гораздо раньше, при $z \geq 4$, то модель с горячей скрытой массой сталкивается с затруднением. И еще одна проблема. При фрагментации и последующем сжатии фрагментов под действием собственной гравитации газ бесстолкновительных (не взаимодействующих друг с другом) частиц — нейтрино — «нагревается» до высоких «температур», порядка равновесной (вириальной) температуры (строго говоря, бесстолкновительный газ нельзя характеризовать термодинамической температурой, но этот термин обычно сохраняют для величины $T = \frac{m\sigma_v^2}{3k}$, где σ_v — среднеквадратичная скорость частиц, m — их масса). Для протоскопления галактик она равна $T \approx 10^7 - 10^8$ К. В этих условиях дальнейшая фрагментация протоскопления невозможна, следовательно, галактики с массивными темными гало образоваться не могут.

Иная картина в моделях с теплой и холодной скрытой массой. Если во Вселенной доминирует теплая материя, то первыми из начальных возмущений выделяются объекты с массой $M \approx 10^9 - 10^{12} M_\odot$. После момента времени $t = t_{eq}$ они начинают сжиматься в собственном поле тяготения. Несколько позже, после рекомбинации, когда ставшее нейтральным обычное (барионное) вещество перестает взаимодействовать с излучением и давление в нем резко падает (от $P_{изл} = \epsilon/3 = \sigma T^4/3$ до $P_{бар} = nkT$), это вещество захватывается гравитационным полем возмущений и «сваливается» к центру потенциальной ямы. Таким образом, здесь происходит сразу образование протогалактик (в поле ранее образовавшихся темных гало). Более мелкомасштабная структура (звезды) должна возникать в результате фрагментации газовой протогалактики, а более крупномасштабная (скопления, сверхскопления) — в результате сгущивания.

Представляется такая картина сгущивания. Поскольку амплитуда начальных возмущений максимальна для наименьших масштабов, т. е. $M \approx 10^{10} - 10^{12} M_\odot$, то они быстрее всего проэволюционируют («выйдут» на нелинейный режим, $\delta\rho/\rho \approx 1$), и попавшее в них барионное вещество успеет сильно сжаться к тому моменту, когда неоднородности больших масштабов начнут выходить на нелинейный режим. Следовательно, в масштабе, скажем, скопления, сжимается уже не однородно распределенное вещество, а система, состоящая из отдельных протогалактик. Это должно объяснить, почему в больших масштабах образуются не сверхгалактики, а качественно иная совокупность — скопления галактик. Дополнительно имеется в виду, что формирование протогалактик и скоплений не слишком сильно разделено во времени, так как фаза стэгспансии заметно сгладила различия начальных амплитуд возмущений больших и малых масштабов. Без нее сгущивание в больших масштабах могло бы и не успеть сформировать (в рамках модели с теплой материей) скопления и сверхскопления.

В модели с теплой скрытой массой также возникает сетчато-ячеистая структура Вселенной. Отчасти это происходит по тем же причинам, что и в модели с «горячими» нейтрино: ведь спектр возмущений в области больших масштабов в обоих случаях одинаков.

Аналогичная картина представляется и в модели с холодной скрытой массой, причем здесь в результате сгущивания должны формироваться не только скопления,

но и сами галактики. Эта картина имеет по сравнению с предыдущей дополнительные особенности. Одна из них связана с тем, что барионное вещество может захватываться гравитационным полем только в масштабах, превышающих масштаб так называемой джинсовской массы для барионов $M_{бар}$:

$$M_{бар} = \left(\frac{\pi k T_{бар}}{G m_H} \right)^{3/2} \rho_{бар}^{-1/2}.$$

Величина $M_{бар}$ сразу после рекомбинации близка к массе шарового скопления, $M_{бар} \approx 10^6 M_\odot$, а к эпохе с красным смещением $z \approx 10$ она равна $M_{бар} \approx 10^3 M_\odot$ (отсюда видно, что для модели с теплой материей это обстоятельство несущественно, так как $M_{бар} \ll 10^{10} - 10^{12} M_\odot$). Тем не менее неоднородности мелких масштабов не выделяются в отдельные системы. При сгущивании они взаимодействуют друг с другом и разрушаются — и так вплоть до масштабов галактик. При переходе к еще большим масштабам этого уже не происходит, как и в модели с теплой скрытой массой, потому что характерное время взаимодействия протогалактик друг с другом становится слишком большим. И лишь в центре скоплений протогалактики, а затем даже и галактики могут сливаться друг с другом, образуя однородную единую систему; возможно, так образуются центральные cD-галактики в скоплениях.

Конечно, не все неоднородности данного масштаба могут стать четко выделенными объектами — галактиками, скоплениями и т. д. Естественно предположить, что этого могут достичь только те, у которых начальная амплитуда исключительно велика. И в настоящее время развивается теория, которая количественно рассчитывает, какая структура и какие объекты могут возникнуть во Вселенной, если считать, что образование галактик связано лишь с теми начальными возмущениями, амплитуда которых значительно больше среднеквадратичной для масштаба данных размеров (теория «смещенного» образования галактик; максимальная вероятность этого процесса смещена в «хвост» гауссовского распределения возмущений по амплитудам, в область больших амплитуд).

Мы кратко обрисовали основные направления проблемы происхождения структуры Вселенной, бурно развивающиеся в последние годы. Ожидается, что многие вопросы здесь могут быть решены уже в 90-е годы, когда пойдут данные с двухметрового космического телескопа им. Хаббла, с будущих космических радиоинтерферометров

и т. д. Впрочем, не будем забывать, что новые открытия всегда ставят больше новых вопросов, чем дают ответов на старые.

Глава 11

РОЖДЕНИЕ ГАЛАКТИК

Тайна рождения галактик — пожалуй, самая притягательная в современной астрофизике. К ней ищут ключи чуть ли не во всех разделах наблюдательной астрономии: в движениях, пространственном распределении и химическом составе звезд нашей Галактики, в структуре звездных населений других галактик, в характеристиках межгалактической среды и в структуре скоплений галактик, в свойствах квазаров и лацертид, в свойствах скрытой массы. Эти усилия к настоящему времени дали очень много. Свойства галактик в огромной степени определились условиями и обстоятельствами их появления на свет, начальным периодом их жизни. Поэтому, если задуматься над тем, как могли возникнуть те или иные особенности их структуры, те или иные связи между разными их свойствами, связи со свойствами скоплений, то можно прийти к довольно однозначной картине рождения галактик.

Теория рождения, теория формирования галактик должна количественно объяснить в первую очередь самые простые вещи: почему у галактик массы равны 10^7 — 10^{12} M_{\odot} , почему у них именно такие размеры, какие мы видим, а не гораздо большие или гораздо меньшие, почему есть спиральные, эллиптические и иррегулярные галактики, почему у галактик есть несколько совершенно не похожих друг на друга подсистем, почему, в конце концов, они вообще состоят из звезд. Но хорошо известно, что труднее всего дать ответы как раз на самые простые вопросы!

Еще совсем недавно казалось, что здесь главная проблема — объяснить происхождение протогалактик; явно или неявно предполагалось, что если мы построим теорию, описывающую их появление во Вселенной и их свойства, то тем самым объясним появление и главные свойства галактик. Причиной такого подхода, скорее всего, было убеждение (чаще всего неявное), что свои главные характеристики — массу, угловой момент, размер — звездная система наследует практически в неизменном виде от протогалактического газового облака.

Но это оказалось не так. Выяснилось, что в процессе превращения протогалактики в звездную систему происходит потеря значительной, иногда подавляющей, части начальной массы. Вместе с массой теряется и угловой момент, следовательно, и эта характеристика не остается неизменной. Размер системы определяется не тем, каким был размер протогалактики, а особенностями процесса звездообразования, и т. д. Другими словами, наблюдаемые свойства галактик имеют лишь слабое отношение к тому, какими были протогалактики, и определяются главным образом самим процессом формирования звездной системы из протогалактического газового облака.

Эта точка зрения сейчас представляется очевидной, поэтому в современных моделях образования галактик главным фактором, «управляющим» этим процессом, является звездообразование и эффекты обратного влияния рождающихся звездных населений на протогалактическое облако (имеются в виду взрывы сверхновых). Еще один, очень важный фактор, вошедший в современные теории это — скрытая масса, массивное темное гало, в гравитационном поле которого происходит превращение газовой протогалактики в звездную систему. В то же время сама протогалактика — ее масса, размер, соотношение между барионной и скрытой массой и т. д. — должна найти объяснение в теории происхождения структуры Вселенной.

1. «Горячая» модель и активные фазы эволюции

Существуют три группы фактов, обладающих той или иной степенью надежности, которые приводят, как представляется автору, к одной и той же картине формирования и ранней эволюции галактик; мы назвали эту картину «горячей» моделью. Одна группа связана со свойствами нашей Галактики, вторая — с данными о внешних галактиках, третья — с данными о горячей межгалактической среде.

О них рассказывалось в разных главах этой книги; часть из этих фактов в виде краткой сводки приведена в таблице 2.

Они говорят о двух вещах. Во-первых, звездообразование и обогащение тяжелыми элементами в нашей и других гигантских галактиках протекало не непрерывно, а дискретно: было несколько вспышек звездообразования, разделенных длительными периодами, когда рождение

Таблица 2

Факты, свидетельствующие о «взрывах» (прото)галактик и дискретности процесса звездообразования

Наша Галактика	Другие галактики	Горячая межгалактическая среда
<p>1. Разрыв в возрасте между гало и диском, $\Delta t \approx 5 \cdot 10^9$ лет \Rightarrow дискретность звездообразования.</p> <p>2. Дефицит звезд с металличностью $[Fe/H] \approx -1,0; -0,5; -0,1 \Rightarrow$ дискретность обогащения тяжелыми элементами.</p> <p>3. Дискретность подсистем: скачки параметров пространственного распределения и кинематики звездных населений \Rightarrow дискретность звездообразования.</p>	<p>1. Зависимость между металличностью и массой галактик, $Z \propto M^{0,4} \Rightarrow$ сброс массы при «взрыве» (прото)галактики.</p> <p>2. Рентгеновские короны Е-галактик, $T_X \approx 10^7$ К \Rightarrow нагрев (прото)галактики при «взрыве».</p> <p>3. Вспышки звездообразования с интервалом $\Delta t \approx 5 \cdot 10^9$ лет (например, в галактиках скопления 3С 295) \Rightarrow дискретность звездообразования.</p>	<p>1. Масса $M_X \approx \sum M_{\text{гал}}$, температура $T_X \approx 10^7 - 10^8$ К, энергия $E_X \approx 10^8 - 10^9 M_{\odot} c^2$, металличность $Z \approx 0,5 Z_{\odot} \Rightarrow$ сброс горячего газа с нормальным химическим составом при «взрывах» (прото)галактик</p>

звезд прекращалось. Во-вторых, в галактиках были периоды мощного энерговыделения, когда газ разогревался до десятков и сотен миллионов кельвинов и под действием внутреннего давления с огромной скоростью выбрасывался в межгалактическое пространство; по существу, происходил взрыв (прото)галактики. При этом карликовые галактики теряли 90% и более начальной массы, а гигантские, такие как наша, около половины; у гигантских эллиптических галактик часть массы горячего газа при температуре $T_X \approx 10^7$ К сохранилась до наших дней в виде рентгеновских корон; сбрасываемый газ был уже обогащен тяжелыми элементами, имел нормальный химический состав.

Естественно, возникает два вопроса: как объяснить дискретность звездообразования и обогащения, вспышечный характер звездообразования? Какие процессы нагрели газ до рентгеновских температур и привели к «взрыву»,

разлету протогалактического облака? И здесь мы обнаруживаем чрезвычайно важное обстоятельство. Оказывается, что факты, заставляющие нас задать первый вопрос, подсказывают ответ на второй, и наоборот.

Действительно, с одной стороны, мощное энерговыделение легко объяснить вспышками звездообразования на ранних стадиях эволюции галактик, когда в течение короткого времени на свет появлялось сразу огромное число звезд. Необходимое количество энергии с большим запасом обеспечивают взрывы большого числа сверхновых, ударные волны от которых разогревают газ, не успевший войти в звезды. С другой стороны, мощное энерговыделение объясняет, почему звездообразование носит вспышечный, циклический характер: нагрев газа до температур порядка $10^7 - 10^8$ К автоматически прерывает процесс рождения звезд. Новый цикл звездообразования может начаться лишь после того, как газ вновь сожмется и остынет, а на это уйдет много времени.

Взрывы сверхновых не только нагревают газ, но и обогащают его тяжелыми элементами. Поэтому одновременно с нагревом в газе скачком возрастает содержание тяжелых элементов. Поскольку нагрев прерывает звездообразование, то вновь созданные химические элементы войдут во вновь формирующиеся звезды только в следующем цикле звездообразования. В результате разогрев газа во время фазы звездообразования нарушает не только непрерывность процесса рождения звезд, но и непрерывность процесса обогащения.

Эти важнейшие этапы в жизни галактик, когда идет интенсивное звездообразование, энерговыделение и обогащение, мы называли активными фазами эволюции. Активная фаза сменяется длительным периодом остановки процесса рождения звезд.

До недавнего времени практически общепринятой схемой формирования галактик, в частности, нашей Галактики, служила модель, разработанная и обоснованная в работе О. Эггена, Д. Линден-Белла и А. Сэндиджа в начале 60-х годов. Согласно этой модели сферическая подсистема (гало) нашей Галактики сформировалась очень быстро, за время не более нескольких сотен миллионов лет, в процессе свободного сжатия (коллапса) протогалактического газового облака под действием собственной силы тяжести. Эта стадия завершается образованием тонкого газового диска, в котором рождаются звезды уже дисковой подсистемы.

Модель коллапса предполагает, что давление газа в облаке ничтожно мало по сравнению с собственной гравитацией протогалактики, и совершенно не препятствует сжатию. А это означает низкую температуру газа (обычно ее считают равной $T \approx 10^4$ К), тогда как, например, в случае нашей Галактики давление становится существенным при температуре $T \geq 10^6$ К. Таким образом, в этой модели протогалактика должна быть «холодной».

Формирование звездной системы здесь является по существу одноактным процессом: коллапс, на фоне которого рождаются звезды. Вначале это звезды гало, а когда сжатие затормозится нарастающей центробежной силой и сформируется газовый диск, то дальнейшее звездообразование дает звезды дисковой подсистемы. В этой модели нет разрыва в возрасте между гало и диском. В эллиптических галактиках все звездообразование должно завершиться на стадии коллапса, так как из-за отсутствия углового момента диск не может сформироваться.

Данные наблюдений, которые привели к идее активных фаз эволюции, существенно меняют эту картину. Во-первых, совершенно иной оказывается история звездообразования: вместо непрерывного рождения звезд этот процесс идет вспышками с длительными перерывами между ними. Во-вторых, иной оказывается динамическая эволюция протогалактического облака, в которой теперь помимо фазы начального коллапса выделяется еще ряд

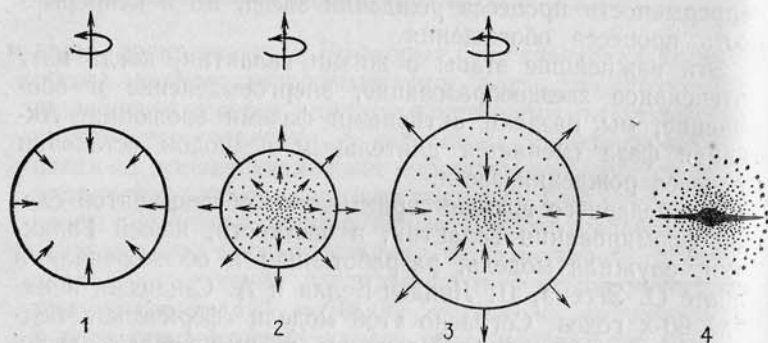


Рис. 47. Схема формирования дисковой галактики в «горячей» модели: 1 — коллапс «холодной» протогалактики ($t \approx 10^9$ лет); 2 — формирование звездного гало ($t \approx 10^8$ лет); нагрев протогалактики под действием вспышек сверхновых; разлет «горячей» протогалактики; 3 — сброс оболочки в межгалактическую среду и сжатие центральной части протогалактики в диск; остановка звездообразования ($t \approx 5 \cdot 10^9$ лет); 4 — формирование звезд дисковой подсистемы

качественно других фаз (рис. 47). Это видно из следующих соображений. Наблюдения показывают, что галактики сбрасывают большую массу газа. Чтобы это произошло, газ в гигантских галактиках должен быть нагрет до температуры $T \approx 10^7 - 10^8$ К. Значит, на какой-то стадии эволюции, когда лишь небольшая часть начальной массы газа перешла в звезды (это звезды с дефицитом тяжелых элементов), протогалактика становится «горячей» — внутреннее давление в ней теперь гораздо больше гравитационного притяжения, и сжатие (коллапс) сменяется разлетом протогалактического облака.

Далее, формирование «горячей» протогалактики сопровождается обогащением тяжелыми элементами, и ее химический состав является нормальным — это тоже дают наблюдения (зарегистрирован нормальный химический состав межгалактической среды). Значит, звезды с нормальным содержанием тяжелых элементов, которые составляют подавляющее большинство в гигантских эллиптических галактиках, а в спиральных образуют звездный диск, могут сформироваться только после стадии «горячей» протогалактики. А это может произойти только в том случае, если разлет вновь сменится сжатием, по крайней мере во внутренних областях протогалактики; в процессе нового коллапса газ охладится, фрагментирует на отдельные холодные облака, из которых и родятся звезды нового поколения.

В итоге — следующая картина: фаза «первого» коллапса сменяется фазой разлета и в свою очередь переходит через длительное время к новой фазе сжатия, к фазе «второго» коллапса. За этот цикл сформируются две разные подсистемы, два типа звездных населений с совершенно разными характеристиками.

Существование более двух подсистем в галактике означает, что таких циклов было несколько. Это относится, например, к нашей Галактике, где в окрестности Солнца обнаружены четыре подсистемы. Правда, эти циклы были, скорее всего, не равнозначны. В Галактике сильно различаются друг от друга гало и диск в целом; именно между гало и диском наблюдается гигантский разрыв в возрасте, $\sim 5 \cdot 10^9$ лет, именно между ними существует большой скачок металличности. Следовательно, наибольшее энерговыделение и обогащение металлами произошло в цикле, который завершился перед началом формирования диска. Разделение как гало, так и диска в свою очередь еще на две подсистемы выражено слабее, поэтому соот-

ветствующие фазы эволюции протекали, видимо, спокойнее.

В эллиптических галактиках дисковой подсистемы нет, но у ряда гигантских систем этого типа обнаруживается дискретная структура эллипсоидальных подсистем, вложенных одна в другую наподобие матрешек.

А как быть с карликовыми галактиками, предельно простыми по своей структуре? Можно думать, что «левые» и новорожденные галактики с дефицитом металлов и большим количеством газа — это такие системы, в которых не было и не может быть стадии «горячей» протогалактики. Возможно, из-за слабости гравитационного поля (малый параметр компактности M/R) звездообразование в них, как и вся эволюция в целом, с самого начала идет «вяло»; здесь невозможна вспышка звездообразования, которая бы разогрела газ до высоких температур.

В противоположность этому, в эллиптических карликовых галактиках, где звезды также с дефицитом тяжелых элементов, но газа вообще нет, вся эволюция, вероятно, закончилась стадией «горячей» протогалактики: нагретый и обогащенный металлами газ полностью покидал такие системы.

Описанная картина формирования и эволюции галактик в целом и представляет собой «горячую» модель, название которой подчеркивает принципиальную важность фазы «горячей» протогалактики.

Ряд важных моментов в проблеме формирования галактик продолжает оставаться не до конца ясным как в рамках «горячей» модели, так и в рамках предшествующих теорий. Например, остаются открытыми вопросы: как проходила эволюция до стадии формирования звезд с дефицитом металлов? Где и как произошло первичное обогащение, которое дало тяжелые элементы для этих звезд? Последний вопрос уже длительное время интригует астрономов. Много говорилось и о догалактическом нуклеосинтезе, и о самом первом поколении звезд, которые состояли только из водорода и гелия; предполагается, что они имели большие массы, и потому не могли существовать долго; все они взорвались как сверхновые, производя тяжелые элементы для нынешних звезд с дефицитом металлов (гипотетические первые звезды часто называют населением III, в отличие от населения II — звезд гало, и населения I — звезд диска). Но ответа на этот вопрос так и нет. Единственно, что не вызывает сомнений, так это одинаковость процессов нуклеосинтеза, которые дали

тяжелые элементы для звезд гало и для звезд диска; она следует из одинаковости относительного содержания разных элементов в звездах обоих типов населений.

Что касается состояния протогалактического облака в период формирования звезд гало, т. е. 15—17 миллиардов лет назад, то на этот счет можно сделать некоторые заключения на основе наблюдений нашей Галактики. Например, размеры протогалактики в это время были как минимум в 10—20 раз больше современных размеров Галактики, т. е. радиус был около 100 кпк. Средняя плотность вещества при этом соответственно была порядка на три меньше современной, т. е. $\rho \approx 10^{-22}$ г/см³ (сейчас средняя плотность в Галактике близка к 10^{-24} г/см³). Этот результат получили еще в начале 60-х годов О. Эгген, Д. Линден-Белл и А. Сэндидж в работе, о которой мы уже упоминали. Он следует из простых соображений. Исследования кинематики и орбит звезд гало в окрестности Солнца, в основном субкарликов, показали, что сейчас подсистема гало имеет на расстоянии $R=10$ кпк от центра такой же угловой момент на единицу массы, какой имеют звезды диска, находящиеся раз в десять ближе к центру. Отсюда и вытекает, что уже после образования субкарликов протогалактика сжалась в 10 раз: то вещество, которое в период рождения звезд гало находилось на расстоянии 10 кпк, к моменту рождения звезд диска приблизилось к центру до 1 кпк.

2. Рождение звездной галактики

Как же раскаленное газовое облако «горячей» протогалактики превратилось в конце концов в звездную систему? Расчеты «горячей» модели, которые автор выполнил совместно с В. Г. Берманом и Ю. Н. Мишуровым в Ростовском университете, показали следующее. Чтобы гигантские галактики смогли сбросить такое количество вещества, которое необходимо для объяснения массы горячего межгалактического газа, т. е. примерно половину начальной массы, внутренняя (тепловая) энергия облака протогалактики должна стать заметно больше гравитационной энергии связи. В дальнейшей эволюции облака выделяются несколько характерных стадий. В течение первых десятков или даже сотен миллионов лет оно расширяется во всем своем объеме, везде газ течет от центра наружу. На втором этапе, когда внутренняя энергия центральной части облака уменьшится (в значительной степени она

переходит в кинетическую энергию движения внешних слоев облака) и расширение газа вблизи центра затормозится гравитационным полем системы, здесь начинается обратное движение к центру. Со временем оно охватывает все большую и большую область. Таким образом, начиная с этой стадии, протогалактика имеет любопытную внутреннюю структуру движений: ее внешняя часть разлетается, а внутренняя — сжимается.

При сжатии центральной области там растет плотность, и в какой-то момент времени происходит качественный скачок в состоянии вещества, связанный с нарушением баланса нагрева и охлаждения газа. Сжатие в гравитационном поле сопровождается нагревом; характерное время этого процесса равно

$$t_f = \frac{R}{v_G} = R \left(\frac{GM}{R} \right)^{-1/2},$$

где v_G — характерная скорость в гравитационном поле массы $M(R)$, $M(R)$ — масса внутри радиуса R . Одновременно газ охлаждается путем лучеиспускания; характерное время охлаждения равно

$$t_c = \frac{3}{2} \frac{k\mu m_H}{\Lambda} \frac{T}{\rho},$$

где μ — молекулярная масса (при $T \approx 10^4$ $\mu = 0,6$), ρ — плотность газа, Λ — количество энергии, излучаемой в расчете на один атом водорода за одну секунду (напомним, что Λ — это известная функция, зависящая только от температуры и химического состава газа (см. рис. 4)). Пока плотность ρ мала, время охлаждения t_c велико, поэтому температура все время остается высокой. Но когда плотность достаточно увеличится, это время станет настолько малым, что скорость охлаждения превзойдет скорость нагрева. Тогда газ будет быстро охлаждаться, давление в нем резко упадет и он станет беспрепятственно падать на центр. Переход к этой третьей стадии эволюции протогалактики произойдет тогда, когда, очевидно, выполнится условие

$$t_c \leq t_f.$$

В это время в системе, по существу, происходит фазовый переход: в центре образуется плотное, холодное и очень компактное ядро, а за границей ядра — протяженная, горячая, разреженная оболочка. В протогалактике возникают две совершенно разные области, две фазы вещества с резкой границей между ними.

На этой стадии и происходит превращение внутренней области «горячей» протогалактики в звездную систему. При фазовом переходе, с ростом плотности и уменьшением температуры возникают условия для быстрого развития тепловой неустойчивости. Поэтому газ в области ядра на самом деле «разваливается» тепловой неустойчивостью на отдельные облака с чрезвычайно высокой плотностью и низкой температурой. Такие облака в конце концов оказываются связанными собственной гравитацией, которая их окончательно стягивает, превращая в звезды. После формирования «горячей» протогалактики проходит несколько миллиардов лет, прежде чем в ядре окажется заметная доля массы. Это обстоятельство объясняет большой разрыв в возрасте между звездами гало и диска.

В то же время через три-пять миллиардов лет дальнейшая эволюция «горячей» протогалактики сильно замедляется. Оставшаяся внешняя горячая оболочка существует, практически не меняясь, многие миллиарды лет. По свойствам она совпадает с горячими коронами гигантских эллиптических галактик, поэтому, скорее всего, короны представляют собой остатки «горячей» протогалактики.

3. Размеры галактик, и еще раз о скрытой массе

Картина формирования звездной галактики из «горячей» протогалактики дает возможность объяснить важнейшую характеристику звездных систем — их размер. Из соотношения светимость — дисперсия скоростей звезд, $L \propto \sigma^4$ (соотношение Фабера—Джексона), следует, что радиус галактики R_S пропорционален корню квадратному из ее массы M_S :

$$R_S \propto M_S^{1/2}$$

(см. подробнее в гл. 2). Разгадка этой зависимости должна лежать в механизме формирования галактики, и предлагался не один сценарий этого процесса, который мог бы дать рассматриваемую связь между R_S и M_S .

Но надо объяснить не только эту пропорциональность, но и саму величину R_S при данной массе. Действительно, почему, например, эллиптические галактики с массой $M_S \approx 10^{11} M_\odot$ имеют характерный размер $R_S \approx 5-10$ кпк, а не 100 пк и не 100 кпк? Ответ на этот вопрос дает идея о фрагментации «горячей» протогалактики на отдельные облака в результате тепловой неустойчивости. Когда плотность газа в процессе сжатия достигает критического

значения, при котором охлаждение начинает превалировать над нагревом (т. е. $t_c \leq t_f$), система оказывается неустойчивой. В первоначально однородной среде появляются холодные и плотные сгустки газа, которые сжимаются горячим разреженным межоблачным газом, и затем, уже под действием собственной силы тяжести, превращаются в протозвездные облака. Система облаков (протозвезд) вначале еще продолжает сжиматься к центру, но недолго. В процессе сжатия она сохраняет кинетическую энергию, которую получает от гравитационного поля (в отличие от газа; газ «высвечивает» энергию сжатия). Поэтому в конце концов кинетическая энергия станет равной половине гравитационной: это произойдет, когда система облаков сожмется примерно в два раза. Согласно теореме вириала, такое соотношение энергий соответствует стационарному состоянию, т. е. меньшие размеры стационарной системы уже не может иметь. Значит, размер звездной системы R_s будет равен примерно половине размера протогалактического облака, который оно имело на стадии формирования облачной структуры. Оценка этого размера получается из условия $t_c = t_f$; с учетом зависимости Λ от температуры и при нормальном химическом составе оно приводит к формуле

$$R_s \approx 10 \left(\frac{M_s}{10^{11} M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{T}{10^7 \text{ К}} \right)^{-1} \text{ кпк.}$$

Результат этот удивителен. Ведь заранее ниоткуда не следует, что наши рассуждения соответствуют истинной картине превращения протогалактики в звездную галактику. И то, что вытекающий из них размер R_s получается как раз таким, какой мы видим у галактик, т. е. ~ 10 кпк для гигантских систем, убедительно говорит в их пользу (при $M_s \approx 10^{11} - 10^{12} M_\odot$ величина T , как следует из данных о горячих коронах галактик, равна $\sim 10^7$ К, поэтому в этом диапазоне масс формула для R_s дает значения $10 - 30$ кпк).

Конечно, на самом деле фрагментация протогалактики на облака происходит не сразу и не во всем объеме, а сначала в центре, но для оценок по порядку величины это не существенно. И точные расчеты динамики горячей протогалактики действительно приводят к примерно такому же значению размера: радиус квазистационарного холодного ядра, которое, как мы уже говорили, соответствует области, где протогалактика превратилась в звездную систему, при массе $M \approx 10^{11} M_\odot$ равен около 5 кпк,

всего лишь в два раза меньше, чем в приведенной выше оценке R_s .

Таким образом, теперь у нас есть основания говорить, что мы понимаем, почему галактики имеют такие размеры, какие наблюдаются.

Из формулы для R_s видно, что она в точности соответствует соотношению Фабера—Джексона, если отвлечься от возможной зависимости температуры T протогалактики (перед фрагментацией) от массы. И это обстоятельство неожиданно и причудливым образом переплетается с проблемой темного гало, или скрытой массы в галактиках. Данные о рентгеновских коронах гигантских эллиптических галактик показывают, что температура корон T_x если и зависит от массы галактики, то очень слабо; и у галактики M 87 с массой $M_s \approx 10^{12} M_\odot$ и у более чем десятка галактик с $M_s \approx 10^{11} M_\odot$, для которых известна температура короны, эта величина приблизительно одинакова и равна $T_x \approx 10^7$ К. В соответствии с условиями равновесия между тепловым давлением и гравитационным притяжением она определяется отношением массы темного гало M_v к его размеру R_v (при этом имеется в виду, что $M_s \ll M_v$):

$$T_x \approx \frac{G \mu m_H}{3k} \frac{M_v}{R_v} \approx 1 \cdot 10^7 \left(\frac{M_v}{10^{12} M_\odot} \right) \left(\frac{10 \text{ кпк}}{R_v} \right) \text{ К.}$$

Тогда из одинаковости T_x следует, что у эллиптических галактик с $M_s \geq 10^{11} M_\odot$ по какой-то причине одинакова степень компактности темного гало, т. е. отношение M_v/R_v .

Этот факт, по существу полученный путем наблюдений, крайне интересный сам по себе, имеет следующее отношение к размеру галактик и его связи с соотношением Фабера—Джексона. Сжатие «горячей» протогалактики вплоть до стадии фрагментации происходит квазиравновесно, под действием в основном гравитационного поля темного гало. Но тогда ее температура, независимо от массы, совпадает с величиной T_x , т. е. равна 10^7 К. Если это так, то формула для R_s принимает совсем простой вид:

$$R_s \approx 10 \left(\frac{M_s}{10^{11} M_\odot} \right)^{1/2} \text{ кпк,}$$

и мы получаем вытекающую из соотношения Фабера—Джексона зависимость R_s от M_s , т. е. $R_s \propto M_s^{1/2}$. Таким образом, картина формирования звездной галактики в рамках «горячей» модели и гипотеза о скрытой массе галактик говорят взаимно в пользу друг друга.

Есть еще одна связь между этими проблемами: «горячая» модель вообще невозможна, если нет скрытой массы. Расчеты показывают, что газовое облако с температурой $T \approx 10^7$ К и массой $M \approx 10^{10} - 10^{11} M_{\odot}$ не в состоянии удержать даже мизерной доли массы; оно полностью разлетается и растворяется в межгалактическом пространстве. Лишь темное гало с массой не менее $10^{12} M_{\odot}$ в пределах 10—20 кпк способно удержать значительную долю начальной массы «горячей» протогалактики, которая может объяснить звездную массу гигантских эллиптических галактик, $M_S \approx 10^{11} M_{\odot}$.

Правда, протогалактика могла бы удерживаться от разлета горячей межгалактической средой. Но в этом случае она практически не остывает и не может превратиться в звездную систему. А главное, сама горячая межгалактическая среда возникла в результате разлета протогалактик, т. е. в рассматриваемую эпоху ее просто еще не было.

Формула для размера R_S , вытекающая из «горячей» модели, предсказывает существование связи между параметрами компактности звездной и скрытой массы и величиной звездной массы:

$$\frac{M_S}{R_S} \propto M_S^{1/2} \frac{M_v}{R_v}.$$

В гл. 2 мы видели, как эти результаты связаны с вопросом о происхождении хаббловской последовательности; было отмечено, что по крайней мере два фактора, M_S и M_S/R_S , которые имеют к нему отношение, похоже, не независимы. Приведенная формула показывает, что в «горячей» модели это действительно так и что обе величины связаны с компактностью темного гало. Поэтому не исключено, что «горячая» модель поможет объяснить прирост хаббловской последовательности галактик.