



П. ХОДЖ

ГАЛАКТИКИ

П. ХОДЖ

ГАЛАКТИКИ

Перевод с английского
А. К. ДАМБИСА

Под редакцией
Ю. Н. ЕФРЕМОВА



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1992

ББК 22.66
Х-69
УДК 524.6(023)

Paul W. Hodge

GALAXIES

Cambridge, Massachusetts
and London, England
Harvard University Press

1986

Ходж П.

Х-69 Галактики: Пер. с англ./Под ред. Ю. Н. Ефремова. –
М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992 – 192 с.
ISBN 5-02-014359-6

В доступной и яркой форме рассказывается о гигантских звездных системах – галактиках. Рассматриваются вопросы об их происхождении, о природе спиральных рукавов, причинах выделения огромной энергии в ядрах многих галактик и в их разновидности – квазарах. Решение этих проблем необходимо и для понимания структуры и эволюции нашей собственной Галактики - системы Млечной Пути, без чего невозможно судить и о происхождении Солнечной системы. Книга богато иллюстрирована фотографиями галактик, полученными на крупнейших телескопах мира.

Для школьников старших классов, лекторов, преподавателей и лиц, интересующихся строением Вселенной.

X¹⁶⁰⁵⁰⁶⁰⁰⁰⁰⁻⁰³⁹
053(02)-92 103 – 91 ББК 22.66

ISBN 5-02-014359-6 © «Наука». Физматлит, перевод
на русский язык, 1992

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Книга, перевод которой мы предлагаем читателю, принадлежит перу известного американского астронома, заведующего кафедрой астрономии Университета штата Вашингтон (столица г. Сиэтл – место проведения Игр доброй воли 1990 года) профессора Пола Ходжа. Она входит в знаменитую «Гарвардскую серию книг по астрономии» и заменила в этой серии книгу Харлоу Шепли с таким же названием, блестяще написанную, но, увы, безнадежно устаревшую. В свое время именно книга Шепли стимулировала интерес к миру галактик у многих молодых тогда астрономов, в том числе и советских, и Ходж с успехом принял эстафету из рук своего учителя. Написанная им книга ясно и образно излагает результаты исследований самых живописных и разнообразных объектов Вселенной: гигантских звездных систем – галактик, одной из которых является и наша система Млечного Пути. Несмотря на небольшой объем, книгу П. Ходжа можно назвать настоящей энциклопедией наблюдательных данных о галактиках и их интерпретации, полезной и любителю, и специалисту-астроному. Хотя в оригинале книга вышла довольно давно, она практически не устарела, поскольку ее автор является одним из крупнейших специалистов, редактором «*Astronomical Journal*» и с важнейшими результатами исследований знакомится сразу же (а не через два года, как большинство отечественных исследователей), причем многие результаты принадлежат ему самому или его сотрудникам.

В своей книге Ходж избегает упоминания имен астрономов, считая это неподходящим для популярной литературы. Однако полностью ему это все же не удалось и по этому поводу хотелось бы сказать несколько слов. В книге, повествующей о бурных событиях в современной внегалактической астрономии, все же было бы полезно отметить авторство наиболее ярких идей и открытий, и сам Ходж не мог не назвать имена Сендиджа и Вокулёра, не говоря уже о классиках 30-х и 40-х годов. Но кроме них можно было бы упомянуть М. Шмидта, который первым понял, что такое квазары, Я. Оорта – основоположника современной галактической астрономии, отмечающего ныне свое 90-летие, ван ден Берга, Арпа. Вербиджа и многие другие имена. Не пощадил Ходж и самого себя, и мы должны отметить, что упоминаемые в книге первые исследования молодых шаровых скоплений в Магеллановых Облаках, рассеянных скоплений в галактике Андромеды, обнаружение группировок скоплений в Большом Магеллановом Облаке, ряд исследований спиральных рукавов галактик и некоторые другие результаты впервые были проведены автором этой книги.

Необходимо, конечно, расширить и перечень имен советских исследователей мира галактик, и в первую очередь это Я. Эйнасто и его коллеги в Тарту, обосновавшие наличие массивных корон у галактик и ячеистую структуру Вселенной. И. Д. Караченцев показал, что огромные массы двойных галактик получались из-за слишком либеральных критериев отбора физических, реальных пар. А. В. Засов исследовал кривые вращения и динамику многих интересных галактик. А. А. Сучков обосновал дискретность эпох интенсивного звездообразования в галактиках... Всех не перечислишь, но к списку ныне здравствующих теоретиков надо, конечно, добавить имена В. А. Амбарцумяна, И. Д. Новикова, Т. А. Агекяна, А. Д. Чернина, В. А. Антонова, Л. С. Марочника, Л. М. Озерного...

Несколько слов надо сказать о достижениях последнего времени, еще не отмеченных в книге. Прежде всего это фантастические результаты, полученные недавно с твердотельными приемниками излучения (ПЗС-матрицами) на больших американских телескопах. Звезды типа RR Лиры найдены и в галактике Андромеды, и в ее спутниках, а также в туманности Треугольника; их блеск составляет 25–27^м, и теперь у нас есть уверенность в том, что расстояние М 31 мы знаем с погрешностью не более 0,3^м, а расстояние М 33 явно ближе к старому значению Хаббла. Разрешена на звезды и внешняя часть одного из шаровых скоплений галактики Андромеды.

Невидимая (и огромная) масса обнаружена недавно в далеких скоплениях галактик. Она воздействует (описанный в книге эффект гравитационной линзы) на свет более далеких галактик, искажая их форму, и по этим искажениям удалось установить, что эта масса концентрируется к центру скопления. Ее реальность, таким образом, установлена вне всяких сомнений, присутствует она и в коронах галактик ранних типов (т. е. E, S0, Sa), а вот в двойных галактиках, как мы упоминали, ее, по-видимому, нет. Природа носителей этой массы остается загадкой. Заметим здесь также, что трудно согласиться ныне с гипотезой о том, что галактики S0 лишились газа (и возможности сформировать спиральные рукава) вследствие столкновения с другими галактиками. Высокая поверхностная яркость, как отмечает А. Сендидж, роднит эти галактики с эллиптическими, особенности их врожденные, а не приобретенные.

Разрешилась загадка звездных ассоциаций необычайно больших размеров в М 31. В независимых исследованиях П. Ходжа, а также редактора перевода и его болгарских коллег выяснилось, что образования, которые в нашей Галактике классифицируются как ОВ-ассоциации, и в М 31 имеют примерно тот же диаметр (50–100 парсеков), но почти все они входят в состав более разреженных группировок – звездных комплексов, достигающих размеров в 500 парсеков и более. Комплексы или их более яркие части и были приняты за ассоциации в более ранних работах. Существование гигантских звездных комплексов, объединяющих, по-видимому, 70–90% звезд высокой светимости, ассоциаций и скоплений с возрастом до 100 млн. лет, отражает, очевидно, фундаментальные особенности звездообразования в галактиках, а сверхассоциации, яркие из-за обилия О-звезд и областей НП, являются, очевидно, молодыми комплексами.

Наконец, уже после выхода книги в свет пришел праздник и к исследователям звезд и галактик. 23 февраля 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке вспыхнула Сверхновая, достигшая в максимуме блеска величины около 3^m. Впервые со времен Кеплера Сверхновую можно было увидеть невооруженным глазом. Поток (точнее, небольшой избыток над фоном) нейтрино, зарегистрированный в США и Японии, подтвердил выводы теории о том, что взрыв был следствием исчерпания источников энергии в массивной звезде. О том же говорит, конечно, и исчезновение этой звезды – голубого сверхгиганта, который был на ее месте. Отождествление вызвало споры: теоретики ожидали увидеть скорее красный сверхгигант или звезду Вольфа–Райе, но ныне вопрос исчерпан... Очень странно глядеть на пластинку и знать (впервые за всю историю астрономии!), что вот этой звезды больше нет. И мы знаем, почему ее нет. Природа подарила нам доказательство могущества нашего разума.

Но не будем больше отвлекать внимание читателя. Его ждет увлекательное путешествие по Вселенной галактик, вмещающих в себя все многообразие нашего Мира.

Август 1990 г.

Ю. Н. Ефремов

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Мне доставляет особое удовольствие иметь возможность написать это краткое предисловие к русскому изданию «Галактик». Предшественница этой книги была написана Харлоу Шепли сорок лет назад, и она способствовала наведению мостов между астрономией в США и СССР, поскольку Шепли был среди первых и горячих сторонников укрепления контактов между американскими и советскими астрономами. Будучи аспирантом в Гарварде, я слушал лекции Шепли о галактиках, и он постепенно воспитывал во мне глубокий интерес ко многим важным открытиям и плодотворным идеям, приходившим в те времена из СССР.

Прогресс внегалактической астрономии в СССР явился результатом вдохновенной и упорной работы многих исследователей. Поскольку эта книга предназначена не для специалистов, имена в ней встречаются редко, но влияние выполненных в СССР работ можно обнаружить на многих ее страницах. Достаточно упомянуть обширные каталоги интересных в том или ином отношении галактик, составленные Воронцовым-Вельяминовым, а также Маркаряном и его сотрудниками, которые привели к ряду важных результатов; проницательные исследования звездных ассоциаций в галактиках, выполненные Ефремовым и приведшие к упорядочению важной проблемы; пионерские работы Шарова и Лютого о туманности Андромеды и других близких галактиках, приведшие к лучшему пониманию этих объектов. Ряд крупнейших теоретиков (Шкловский, Сюняев, Зельдович и многие другие) оказали громадное воздействие на различные области астрофизики и космологии...

Особенно удачно, что русский перевод этой книги выходит под наблюдением д-ра Ефремова. Его познания в области изучения галактик, как и принадлежащие ему доступные и авторитетные книги по астрономии, делают его идеальным редактором, и я рад выразить ему большую благодарность.

Пол Ходж

ПРЕДИСЛОВИЕ

Почти пятьдесят лет назад Харлоу Шепли написал для этой серии книгу с таким же названием. Книга стала классикой. Энтузиазм Шепли, его способность к драматическому описанию и возбуждению читательского любопытства – все это сделало книгу одним из лучших образцов популяризации науки. Это была легко читаемая и увлекательная книга на удивительную тему, она перерабатывалась три раза и последний раз вышла в 1972 г.

В конце концов поток связанных с галактиками новых фактов и свежих проблем переполнил книгу, и даже увлекательного стиля Шепли стало недостаточно для удержания ее на плаву. Надо было спускать на воду новое судно. Когда сотрудники издательства Гарвардского университета предложили спустить его на воду мне, я не колебался, хотя, наверное, должен был бы.

Задача оказалась настолько же трудной, насколько пленительной была перспектива. Область внегалактической астрономии стала столь обширной, что казалось невозможным представить себе легкую и неформальную книгу, охватывающую весь предмет. Пытаясь проплыть по современной внегалактической астрономии, я много упустил: почти ежедневно происходит так много событий, что в одной книге просто невозможно все их рассмотреть. Но если это издание не может удовлетворить полностью читательское любопытство по части великолепных объектов, называемых галактиками, то, быть может, оно сможет поддержать и повысить этот интерес. Если так, то книга послужит своему предназначению.

Чтобы выразить признательность всем, кому я благодарен за помощь в этом предприятии, начну с дерзости: я хочу поблагодарить Харлоу Шепли за тот созданный им образец, которого я не смог достичь, но который помог мне избежать множества прегрешений по отношению к науке и языку. Я хочу также выразить благодарность за существенную помощь Сэнди Ларсен, которая перепечатала первые четыре главы и потом показала, как набрать остальные на компьютере, чтобы они сами распечатывались. Наконец, я должен поблагодарить сотрудников обсерваторий, где было взято большинство используемых в этой книге фотографий, многие из них я взял с радостью: Межамериканской обсерватории Серро Тололо, Обсерватории Гарвардского колледжа, Национальной обсерватории Китт Пик, Ликской обсерватории, Обсерватории Манасташ Ридж и Паломарской обсерватории. Следует отдать должное мужчинам и женщинам, построившим и поддерживавшим эти учреждения, за все вдохновение, которое почувствует читатель, рассматривая помещенные в этой книге фотографии галактик, одного из самых великолепных изобретений природы.

Пол Ходж

Глава 1

ГАЛАКТИКИ И ВСЕЛЕННАЯ

С древнейших времен людей интересовало, что же находится за горизонтом, и они отправлялись исследовать далекие и незнакомые земли. По мере того как Земля открывала человеку большинство своих белых пятен, астрономы стали выходить в область новых и не исследованных территорий за пределами нашей маленькой планеты. Сегодня исследователи Вселенной, используя современные телескопы и ЭВМ, продвигаются в направлении всё больших расстояний в поисках предела Космоса – последней его границы.

Столетия мы были узниками Солнечной системы, считая звезды просто украшениями сферы, расположенной за планетами. Потом человек признал в этих крошечных светящихся точках другие солнца, настолько далекие, что их свет идет до Земли многие годы. Казалось, что космос населен редкими одинокими звездами, и ученые спорили о том, простирается ли звездное население в пространстве неограниченно или же за некоторым пределом звезды кончаются и начинается пустота. Проникая все дальше и дальше, астрономы нашли такой предел, и оказалось, что наше Солнце – одна из огромного числа звезд, образующих систему под названием Галактика. За границей Галактики была тьма.

XX век принес новое открытие: наша Галактика – это еще не вся Вселенная. За самыми далекими звездами Млечного Пути находятся другие галактики, похожие на нашу и простирающиеся в пространстве до пределов видимости наших крупнейших телескопов. Грандиозные звездные системы – одни из самых потрясающих и наиболее изучаемых современной астрономией объектов, и именно о них пойдет речь в этой книге.

РАЗМЕРЫ И РАССТОЯНИЯ

Млечный Путь – весьма характерный представитель своего типа галактик – столь огромен, что свету требуется более 100 тысяч лет, чтобы со скоростью 300 000 километров в секунду (670 миллионов миль или 2 миллиарда километров в час) пересечь Галактику от края до края. Земля и Солнце находятся на расстоянии около 30 тысяч световых лет от центра Млечного Пути^{*)}. Если бы мы попытались послать сообщение гипотетическому существу, проживающему вблизи центра нашей Галактики, то ответ получили бы не раньше, чем через 60 тысяч лет. Сообщение же, посланное со скоростью самолета (600 миль или 1000 километров в час) в момент рождения Вселенной, к настоящему времени прошло бы лишь половину пути до центра Галактики, а время ожидания ответа составило бы 70 миллиардов лет.

Некоторые галактики гораздо крупнее нашей. Диаметры самых больших из них – обширных галактик, излучающих огромное количество энергии в виде радиоволн, как, например, известный объект южного неба – Центавр А, в сто раз превосходят диаметр Млечного Пути. С другой стороны, во Вселенной много сравнительно небольших галактик. Размеры карликовых эллиптических галактик (типичный представитель находится в созвездии Дракона) составляют всего около 10 тысяч световых лет. Разумеется, даже эти неприметные объекты почти невообразимо

^{*)} Когда речь идет о галактиках, то обычно используют две единицы – световой год и парсек. Световой год равен расстоянию, которое свет проходит за год (около 6 миллионов миллионов миль или 10 миллионов миллионов километров). Парсек – это необычная единица длины, определяемая через видимое перемещение (параллакс) объекта на фоне неба, вызванное движением Земли по орбите вокруг Солнца. В одном парсеке 3,26 световых года, 1000 парсеков составляют 1 килопарсек, а 1000 000 парсеков – 1 мегапарсек.

огромны: хотя галактику в созвездии Дракона можно назвать карликовой, ее диаметр превосходит 100 000 000 000 000 000 миль или 160 000 000 000 000 000 километров.

Хотя космос населяют миллиарды галактик, им совсем не тесно: Вселенная достаточно огромна, чтобы галактики могли удобно в ней разместиться, и при этом еще остается много свободного пространства. Типичное расстояние между яркими галактиками составляет около 5–10 миллионов световых лет; оставшийся объем занимают карликовые галактики. Однако если принять во внимание их размеры, то оказывается, что галактики относительно гораздо ближе друг к другу, чем, например, звезды в окрестности Солнца. Диаметр звезды пренебрежимо мал по сравнению с расстоянием до ближайшей соседней звезды. Диаметр Солнца всего около миллиона миль или 1,5 миллиона километров, в то время как расстояние до ближайшей к нам звезды в 50 миллионов раз больше.

Для того чтобы представить огромные расстояния между галактиками, мысленно уменьшим их размеры до роста среднего человека. Тогда в типичной области Вселенной «взрослые» (яркие) галактики будут находиться в среднем на расстоянии 300 футов или 100 метров друг от друга, а между ними расположится небольшое число детей. Вселенная напоминала бы обширное поле для игры в бейсбол с большим свободным пространством между игроками. Лишь в некоторых местах, где галактики собираются в тесные скопления, наша масштабная модель Вселенной похожа на городской тротуар, и уж нигде не было бы ничего общего с вечеринкой или вагоном метро в час пик. Если же до масштабов человеческого роста уменьшить звезды типичной галактики, то местность получилась бы чрезвычайно малонаселенная: ближайший сосед проживал бы на расстоянии 60 тысяч миль или 100 тысяч километров – около четверти расстояния от Земли до Луны.

Из этих примеров должно стать ясно, что галактики довольно редко разбросаны во Вселенной и состоят, в основном, из пустого пространства. Даже если учесть разреженный газ, заполняющий пространство между звездами, то все равно средняя плотность вещества оказывается чрезвычайно малой. Мир галактик огромен и почти пуст.

ТИПЫ ГАЛАКТИК

Галактики во Вселенной не похожи друг на друга. Некоторые из них ровные и круглые, другие имеют форму уплощенных разлетающихся спиралей, а у некоторых не наблюдается почти никакой структуры. Астрономы, следуя пионерской работе Эдвина Хаббла, опубликованной в 20-х годах, подразделяют галактики по их форме на три основных типа: эллиптические, спиральные и неправильные, обозначаемые соответственно E, S и Irr.

Эллиптические галактики характеризуются в целом эллиптической формой и не имеют никакой другой структуры, кроме общего падения яркости по мере удаления от центра. Падение яркости описывается простым математическим законом, который открыл Хаббл. На языке астрономов это звучит так: эллиптические галактики имеют концентрические эллиптические изофоты, т. е. если соединить одной линией все точки изображения галактики с одинаковой яркостью и построить такие линии для разных значений яркости (аналогично линиям постоянной высоты на топографических картах), то мы получим ряд вложенных друг в друга эллипсов примерно одинаковой формы и с общим центром.

Подтипы эллиптических галактик обозначаются буквой E, за которой следует число n , определяемое по формуле

$$n = 10(a - b) / a,$$

где a и b – это соответственно большая и малая полуоси какой-либо изофоты галактики. Таким образом, эллиптическая галактика круглой формы будет отнесена к типу E0, а сильно сплюснутая может быть классифицирована как E6 (фото I и II; фотографии в книге объединены в отдельный блок).

У *спиральных галактик* хорошо заметно плоское спиральное распределение яркости вокруг утолщенного ядра. Идеальные спиральные галактики имеют две спиральные ветви (рукава), исходящие либо прямо из ядра, либо из двух концов бара (перемычки), в центре которого расположено ядро. Этот признак позволил разделить спиральные галактики на два основных подтипа: нормальные спиральные галактики (S) и пересеченные спиральные галактики (SB). Нормальных спиральных галактик во много раз больше, чем пересеченных. Дальнейшее разделение спиральных галактик на подтипы проводится по следующим трем критериям: 1) относительной величине ядра по

сравнению с размерами всей галактики; 2) по тому, насколько сильно или слабо закручены спиральные ветви и 3) фрагментарности спиральных ветвей.

К типу Sa (или SBa) относят галактики с очень обширной ядерной областью и сильно закрученными спиральными (почти круговыми) ветвями – непрерывными и гладкими, а не фрагментарными. Галактики Sb и SBb имеют относительно небольшую ядерную область при не очень сильно закрученных спиральных ветвях, которые разрешаются на отдельные яркие фрагменты. Галактики типа Sc (и соответствующие им пересеченные галактики) характеризуются сильно фрагментированными обрывочными спиральными рукавами (см. рис. 1 и фото

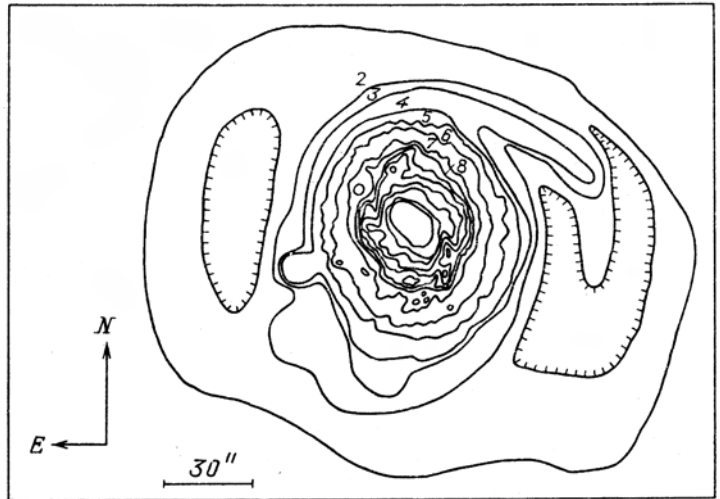


Рис. 1. Контурная карта распределения яркости в NGC 1068 – галактике типа Sb с внешней кольцеобразной структурой (север вверх, восток слева)

III–IX). У галактик SBc даже бар разрешается на отдельные фрагменты.

У всех спиральных галактик ядро представляет собой яркую область, обладающую многими признаками эллиптической галактики. Закон падения яркости, открытый Хабблом для эллиптических галактик, оказался справедливым и для центральных ядерных областей спиральных галактик и поэтому эти области иногда называют «эллиптическим компонентом».

К *неправильным галактикам* Хаббл отнес все объекты, которые не удавалось причислить ни к эллиптическим, ни к спиральным. Большинство неправильных галактик очень похожи друг на друга, чрезвычайно фрагментарны и в них можно различить отдельные наиболее яркие звезды и области горячего излучающего газа. Некоторые неправильные галактики имеют хорошо заметный бар и у многих из них можно различить обрывки структуры, напоминающей фрагменты спиральных рукавов. По мнению Хаббла, этот тип неправильных галактик (названный им Irr I) является крайним продолжением типа спиральных галактик – у таких объектов рукава столь фрагментарны и обрывочны, что их уже нельзя назвать спиральными (см. фото X).

Другие необычные галактики, отнесенные в исходном варианте хаббловской классификации к неправильным, похоже, никак не связаны с более привычными неправильными объектами – из-за неправильной формы, наличия большого количества пыли или других аномалий (см. фото IX). Эти объекты были объединены в тип Irr II, но в ходе последующих пересмотров хаббловской классификации многие из них были отнесены к другим типам. Например, галактики с плоским диском, напоминающим диски спиральных галактик, но без спиральных ветвей, были объединены в тип S0 (см. фото XII и XIII). Некоторые галактики до сих пор не удается классифицировать, и многие из них, как оказалось в дальнейшем, либо представляют собой взаимодействующие пары, либо являются местом бурных процессов.

КЛАССЫ СВЕТИМОСТИ

В 1960 г. Сидней ван ден Берг обнаружил на фотографиях спиральных галактик ряд морфологических признаков, позволяющих классифицировать галактики по их светимости. Классификация Хаббла выстраивает галактики в ряд по степени преобладания и контраста спиральной структуры, а критерии светимости ван ден Берга как бы расслаивают их в перпендикулярном направлении. Спиральная галактика определенного хаббловского типа (например, Sc – с яркими слабо закрученными и контрастными рукавами) может быть отнесена к любому из классов ван ден Берга – от I до IV. При этом чем меньше номер класса, тем больше светимость соответствующей галактики. Калибровка по галактикам с известной светимостью показала, что объекты I класса имеют примерно в 5 раз большую светимость, чем объекты IV класса того же хаббловского типа. Хотя классификация ван ден Берга носит качественный характер, многие астрономы, основываясь на результатах тестовых исследований, говорят о возможности ее применения для получения количественных оценок светимостей, свободных от систематических погрешностей.

ПОЧЕМУ ГАЛАКТИКИ РАЗНЫЕ

Еще со времен Хаббла астрономы пытались установить, под действием каких процессов галактики принимают ту или иную форму. В некоторых из ранних теорий предполагалось, что разные типы галактик представляют собой эволюционную последовательность. Считалось, что галактики возникают как объекты одного типа и постепенно в ходе эволюции превращаются в объекты другого типа. Согласно одной из таких гипотез, галактики начинают свой эволюционный путь как эллиптические, потом у них развивается спиральная структура и, наконец, эта структура распадается и объект превращается в хаотическую неправильную галактику. Другие астрономы предполагали противоположное направление эволюции: галактики возникают как неправильные, закручиваясь, превращаются в спиральные и завершают свою эволюцию в простой и симметричной эллиптической форме. В основе обеих теорий была гипотеза о том, что тип галактики связан с ее возрастом. Ни одна из теорий не опиралась на какой-либо физический фундамент и обе были опровергнуты многолетними исследованиями. Как только астрономы поняли процесс звездной эволюции и научились определять возраста звезд (это стало возможно в 50-х годах), оказалось, что галактики всех типов имеют примерно одинаковый возраст. Почти в каждой галактике присутствует хотя бы несколько звезд с возрастом в несколько миллиардов лет. Отсюда следует, что ни эллиптические, ни неправильные галактики не могут быть старше остальных.

Однако эллиптические галактики состоят почти исключительно из старых звезд, в то время как галактики других хаббловских типов содержат относительно больше молодых звезд. Таким образом, хаббловская последовательность все же имеет некоторое отношение к возрастам. Повидимому, форма галактики связана со скоростью образования в ней новых молодых звезд уже после ее рождения, а следовательно, и с распределением звезд по возрастам. В эллиптических галактиках очень мало звезд возникло после стадии образования галактики и поэтому мы наблюдаем здесь ничтожное количество молодых звезд. В галактиках типа Sa звезды продолжают образовываться до сих пор, но скорость этого процесса невелика, в галактиках типа Sb темп звездообразования выше, галактики типа Sc очень активны, а наиболее бурно звездообразование протекает в галактиках типа Irr I.

Эти результаты навели исследователей на мысль о том, что последовательность хаббловских типов упорядочивает галактики по степени сохранения ими газа и пыли: неправильные галактики сберегли большую часть своего газа и своей пыли для постепенного рождения все новых и новых звезд, в то время как эллиптические галактики израсходовали почти весь свой исходный газ на первую взрывную вспышку звездообразования. Но как различие в количестве сохранившегося газа и пыли привело к столь сильно отличающимся формам? Этот вопрос будет рассмотрен в главе 3, посвященной рассмотрению процесса образования галактики. Согласно современным представлениям (теперь уже подтвержденным результатами всевозможных исследований) два важнейших фактора, определяющих форму галактики, – это, во-первых, начальные условия (масса и момент вращения) и, во-вторых, окружение (т. е. членство в скоплении или наличие близких спутников). В этом отношении галактика похожа на человека: ее характер зависит как от наследственности, так и от общества, в котором она «вращалась».

Глава 2

СТРУКТУРА ГАЛАКТИК

Галактики являются одними из самых красивых по форме объектов в природе. Зрелище фотографии блистающей спиральной галактики, полученной на современном гигантском телескопе, вызывает чувство благоговения. Даже при наблюдении в небольшой телескоп, позволяющий увидеть лишь намек на структуру спиральной галактики, таинственные тусклые изображения галактик способны захватывать дух.

Почему вокруг центров некоторых галактик закручиваются огромные спиральные рукава? Почему другие галактики пересечены яркими образованиями типа перемычек (баров)? Как можно объяснить ровную и чистую бесструктурность третьих? Лучший способ ответить на эти вопросы состоял в измерении структурных параметров галактик и сравнении результатов с математическими моделями, построенными на основе различных предположений о способе образования и

составе галактик. В этой главе мы так и поступим. Сначала исследуем результаты измерений структурных параметров галактик различных типов, а потом посмотрим на модели, чтобы увидеть, насколько хорошо они соответствуют действительности, и постараться понять, почему галактики выглядят именно такими, какими мы их видим.

КАК ПОСТРОИТЬ ЭЛЛИПТИЧЕСКУЮ ГАЛАКТИКУ?

Проще всего выглядят эллиптические галактики: они ровные, однородные по цвету и симметричные. Их почти совершенное строение наводит на мысль об их существенной простоте, и действительно, параметры эллиптических галактик оказалось легче измерить и подыскать под них теоретические модели, чем сделать это для более сложных родственников этих объектов.

Рассмотрим, для примера, строение типичной эллиптической галактики NGC 1399 (см. рис. 2 и фото XIV^{*)}). В ее центре находится яркое ядро, окруженное размытым сиянием, яркость которого падает по мере удаления от центра. Как и у всех эллиптических галактик, падение яркости описывается простой математической формулой. Форма контура галактики тоже остается почти одинаковой на всех уровнях яркости (рис. 3). Все изофоты представляют собой почти идеальные эллипсы, центрированные в точности на ядро галактики. Направления больших осей и отношения большой оси к малой почти одинаковы у всех эллипсов.

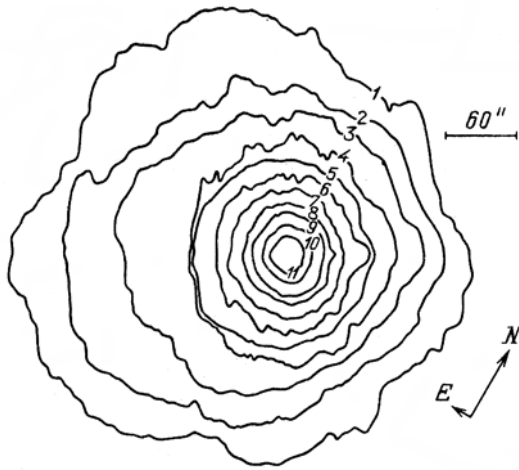


Рис. 2. Изофоты (линии постоянной яркости) большой эллиптической галактики NGC 1399 в созвездии Печи (см. фото XIV)

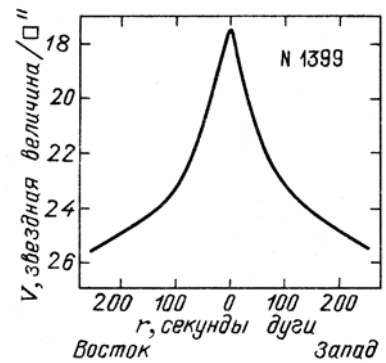


Рис. 3. Распределение излучения в NGC 1399, демонстрирующее типичный профиль яркости для эллиптической галактики. По вертикальной оси отложена яркость (в звездных величинах на квадратную угловую секунду) в точках на прямой, проходящей через центр галактики в направлении восток – запад

Фундаментальная простота эллиптических галактик согласуется с предположением о том, что они управляются небольшим числом сил. Орбиты звезд гладкие и хорошо перемешаны и ничто, кроме гравитации, не влияет на их расположение и никакое непрерывное звездообразование не разрушило их правильности. Когда Хаббл впервые обратил внимание на эти факты, он показал, что строение эллиптической галактики мало отличается от строения простой газовой среды, формируемой лишь гравитационными силами и состоящей из одинаковых частиц примерно одинаковой температуры. Чтобы построить такой объект из звезд, надо лишь взять много похожих звезд, расположить их рядом друг с другом в пространстве, позволить тяготению поработать с ними и долго-долго подождать, пока движения всех звезд не станут похожими. Не следует придавать звездам систематических движений вроде общего вращения, но надо удостовериться в том, что звезды выбраны тихие и благоденствующие, которые не будут извергаться, выбрасывать вещество или иным способом нарушать скучную монотонность неизменного звездного царства. Но нет необходимости с самого начала распределять их в идеальном шаровом объеме. Можно, например, «сделать» из них ящик прямоугольной формы и просто подождать некоторое время. Звезды сами в конце концов расположатся в виде сфероида. Тяготение действует сферически симметричным об-

^{*)} Большинство галактик довольно яркие и были включены в каталог незвездных объектов, созданный в XIX в. Дж. Л. Е. Дрейером, – так называемый Новый общий каталог (по-английски New General Catalogue – отсюда и номера NGC). Слабые галактики называются по каталогам (более поздним), в которые они попали (например, квазар 3C 273 это объект номер 273 в Третьем Кембриджском каталоге радиоисточников).

разом и, если ваша галактика управляется только гравитацией, то она выровняется, потеряет острые углы и станет симпатичной эллиптической галактикой.

Настоящие эллиптические галактики, разумеется, не являются совершенными сферами. Например, изофоты NCG 1399 – это скорее эллипсы, чем окружности, и отношения их осей слегка различаются на разных расстояниях от центра – во внешних частях изофоты менее круглые. Их ориентация тоже немного меняется. Все эти несовершенства говорят нам, что простая модель эллиптических галактик не совсем правильна. Предыстория или особые обстоятельства, наверное, оказали заметное влияние на орбиты звезд. Может быть, дело во вращении или причиной является приливное действие соседних галактик, или же мы наблюдаем проявления особых начальных условий, столь сильные, что тяготению не хватило времени для полного их устранения.

ДИСКИ И БАЛДЖИ

В отличие от эллиптических галактик для спиральных характерно наличие диска и балджа (утолщения). Спиральные рукава уступают диску и балджу по количеству содержащихся в них звезд, хотя и являются важными и выдающимися частями галактики. (Так же, как глаза на лице человека – это небольшая часть тела, но они привлекают наше внимание и много говорят о внутреннем мире человека.)

Диск спиральной галактики довольно плоский. Видимые с ребра галактики говорят о том, что толщина типичного диска составляет около 1/10 его диаметра. В нашей собственной Галактике, где мы можем вести подсчет звезд в диске и измерять его толщину, оказалось, что звездное население быстро редет и на высоте 3000 световых лет над плоскостью галактики становится весьма разреженным. Это в особенности справедливо для самых молодых звезд и сырья (газа и пыли), находящегося в ожидании формирования будущих звезд. У некоторых видимых с ребра спиральных галактик заметны мощные тончайшие прослойки пыли, пересекающие диск в самой его середине, в то время как самые старые звезды диска образуют гораздо более толстый слой.

Данные измерений распределения яркости в дисках спиральных галактик обнаруживают очень важное сходство – это обстоятельство хорошо задокументировано, но до сих пор не получило удовлетворительного объяснения. Яркость весьма регулярным образом падает по мере удаления от центра в соответствии с универсальной математической зависимостью, которая, однако, отличается от аналогичной зависимости для эллиптических галактик (рис. 4). Все диски следуют этой зависимости – начиная от дисков карликовых галактик вроде GR 8 и кончая сверхгигантскими спиральными галактиками вроде M 101.

Наблюдаемые свойства галактических дисков находят естественное объяснение в созданных на ЭВМ моделях быстро вращающихся звездных систем. Рассмотрим описанную выше эллиптическую галактику. Если ее протогалактическому газовому облаку придать быстрое вращение еще до образования большинства звезд, то облако приобретет плоскую форму и распределение звезд будет напоминать диск спиральной галактики. Таким образом, оказывается, что основное структурное отличие эллиптических галактик от спиральных состоит в скорости исходного вращения.

Тогда откуда же появляется балдж? Если быстро вращающееся протогалактическое облако порождает диск, а медленно вращающееся или совсем не вращающееся превращается в эллиптическую галактику, то что же делают в центрах спиральных галактик эти толстые эллипсоидальные балджи? Они обладают большинством структурных свойств эллиптических галактик: правильными изофотами, наличием старых звезд, существенной толщиной и ровно падающим распределением яркости. Ответ следует, по-видимому, искать в том обстоятельстве, что газ ведет себя совсем не так, как звезды. Газовое облако может довольно легко избавиться от энергии – просто нагреваясь и излучая ее. При этом вращающееся газовое облако станет плоским и превратится в диск. Однако если в некоторые моменты времени газ начинает конденсироваться в звезды, то ситуация меняется. Звезды не сталкиваются, как атомы в газе. Их размеры слишком малы по сравнению с расстояниями между ними. Так как звезды не нагреваются столкновениями, то они не рассеивают эффективным образом свою энергию и поэтому не коллапсируют в плоскость. Поэтому, если звезды на-

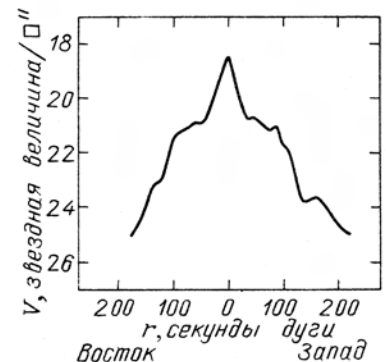


Рис. 4. Распределение излучения в спиральной галактике типа SBc NGC 1365

чинают образовываться – а это происходит сначала в центральных областях, где плотность самая высокая, – то они останутся на месте в большом толстом центральном балдже.

Например, в Млечном Пути первыми должны были образоваться звезды в центральном балдже, которые сейчас являются старейшими. Оставшийся газ сколлапсировал в плоскость, где медленно образовывались и вращались вместе с газом другие звезды. Этот тонкий плоский диск стал местом большей части последующих активных событий в нашей Галактике: звезды, гигантские молекулярные облака, облака возбужденного газа и крупномасштабные спиральные узоры – все это развивалось здесь, в запутанной структуре, бросающей сейчас вызов нашим теоретическим моделям.

ЗАГАДКА СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Спиральные галактики не выглядели бы особенно интересными без своей спиральной структуры – без нее они бы, разумеется, не были спиральными Галактиками, – но все обстоит еще хитрее. Если спиральная галактика образуется потому, что вращение заставляет газ коллапсировать на плоскость, то спиральная форма рукавов кажется естественным результатом – вроде узора, образуемого сливками, которые наливают при помешивании в чашку кофе, или вроде шторма над Карибским морем, или вроде воды, уходящей через сток. Эти ситуации не являются строгими аналогами галактики, но хорошо иллюстрируют закономерность: где есть вращение, там обычно бывает и спиральная структура. Поэтому на протяжении многих лет астрономов особенно не беспокоила спиральная форма многих галактик – она казалась совершенно естественной.

Первая серьезная трудность возникла, когда кому-то пришлось в голову задать вопрос: как долго существует в галактике спиральный рукав? Известны периоды вращения галактик, типичные значения которых для звезд, расположенных на расстоянии от ядра, эквивалентном расстоянию Солнца до центра Галактики, составляют несколько сотен миллионов лет. Известны возрасты ближайших галактик – около 10 миллиардов лет. Если спиральная структура возникает из-за того, что внутренняя часть галактики вращается со скоростью, отличной от скорости внешней части, то рукава должны постепенно закрутиться в спиральный узор. Однако для галактики с возрастом, характерным для окружающих нас галактик, число оборотов узора должно быть очень большим – примерно равным возрасту, деленному на средний период вращения – около 100. У реальных спиральных галактик – по крайней мере у тех, что имеют четкие непрерывные спиральные ветви, наблюдается закрутка спирального узора лишь на один-два оборота. Встает вопрос: «замораживаются» ли спиральные рукава каким-то образом, что позволяет им сохраниться? Или же они закручиваются до исчезновения, чтобы смениться новыми? Или же есть для них возможность не участвовать в общем вращении звезд и газа, что позволяет им вращаться медленнее?

Проблема не в том, что мы не можем придумать, как создать спиральную структуру: любая «капля», вращающаяся, как галактика с различными периодами вращения на различных расстояниях от центра, создает спиральный узор. Проблема в том, как галактика приобретает спиральную форму, которая сохраняется. В настоящее время существует три типа ответов, и мы еще не знаем наверняка, какой же из них правильный. Возможно, что все являются правильными в том или ином случае, и спиральная структура даже одной индивидуальной галактики может иметь смешанное происхождение.

По-видимому, самым аккуратным и элегантным для спиральных галактик является объяснение, известное под названием теории волн плотности. После развития шведским астрономом Бертилом Линдбладом многих связанных с ней теоретических идей, теория волн плотности была полностью разработана и успешно применена в 60-х годах к галактикам Ц. Ц. Лином и его студентами в Массачусеттском технологическом институте. Они показали, используя математический анализ устойчивости плоского звездного диска, что отклонение от регулярной формы в начальном распределении газа может стать устойчивым и постепенно превратиться в двухрукавный спиральный узор, вращающийся значительно медленнее звезд. Входя в рукав, звезды на время замедляются, что приводит к повышенной плотности в рукаве, а потом продолжают движение за фронтом волны. На границе фронта должна возникать ударная волна в газе, которая может вызвать процесс звездообразования, и поэтому в некоторых галактиках наблюдается концентрация активных газовых облаков и новообразованных звезд в рукавах (рис. 5). Форма спиральных рукавов в рамках этой гипотезы очень похожа на форму реальных спиральных рукавов в небольшом количестве галактик с «совершенной» спиральной структурой – таких, как М 81. Однако она не подходит для

описания более распространенного типа галактике чрезвычайно несовершенными рукавами – фрагментарными, размытыми и нечеткими.

Теория, лучше всего применимая в случае таких галактик опирается на действие весьма простых искажений любой структуры, вызываемых дифференциальным вращением галактики. Вместо наличия постоянно существующего набора рукавов эта гипотеза предсказывает непрерывное рождение и распад спиральных сегментов. Многие первооткрыватели в этой области считали, что такой метод может работать, нужно было лишь найти способ восстановления рукавов. В 1965 г. был создан компьютерный фильм, изображавший весь процесс в действии, – в этом фильме в качестве модели использовалась галактика М 31 в предположении случайного (стохастического) процесса возникновения областей звездообразования. При рождении такие области проявляют себя как яркие участки повышенной активности. Вперед дифференциальное вращение вытягивает их в длинные узкие сегменты спиральной формы, и эти области постепенно тускнеют по мере того, как расходится сконцентрированный в них газ. Само собой, результатом является не совершенный двухрукавный спиральный узор, а скорее набор спиральных фрагментов, покрывающих галактику и придающих ей некоторое подобие спиральной формы, но с рукавами, которые нельзя проследить на протяжении более чем нескольких десятков градусов.

Созданные в компьютерном фильме системы по форме напоминают многие спиральные галактики и поэтому вероятно, что в таких объектах преобладают стохастические процессы наподобие упомянутого выше. Это особенно верно для некоторых видов идеальных областей звездообразования, содержащих последовательность участков на разной стадии активности: спереди находится гигантское молекулярное облако, которое собирается конденсироваться в звездное скопление, за ним – газовое облако, освещенное и потерявшее часть газа из-за наличия в нем только что образовавшихся звезд, а за облаком – стареющее и медленно распадающееся звездное скопление, относительно свободное от газа. Эта последовательность областей имеет примерно линейную форму и будет вытянута дифференциальным вращением в сегмент спирального рукава. Результатом является спиральная галактика, образованная разрозненными фрагментами спиральных рукавов. Следовательно, стохастическая теория, кажется, в состоянии объяснить форму как раз тех галактик, которые не могут быть описаны теорией волн плотности. Таким образом, нам, может быть, не нужны другие идеи – нужно всего лишь терпение в проведении подробных измерений, необходимых для сравнения свойств спиральных рукавов с различными версиями каждой из теорий.

Существует, однако, еще одна возможность. Любое возмущение диска может приводить к скоплению газа, что будет проявляться в виде спиральных рукавов или спиральных сегментов. Возмущение может исходить извне или же изнутри – из собственного ядра галактики. Одна из возможностей первого типа состоит в том, что межзвездный газ может втекать в галактику, образуя спиральные рукава. Эта гипотеза не очень привлекательна, так как газ будет преимущественно со стороны полюсов, где нет достаточного количества другого газа для столкновения, и известно очень мало случаев, когда спиральные рукава не лежат в плоскости диска. Более привлекательным внешним агентом может быть приливное воздействие других галактик при близких прохождении. Приливы, порождаемые близкими прохождением, почти столкновениями – воздействуют на звезды и газ и могут исказить форму галактики в достаточной степени для возникновения неправильных образований, которые в ходе вращения приобретут спиральную форму. Это красивая идея, но ее недостаток – в необходимости близкого прохождения другой галактики. К сожалению, расстояния между галактиками слишком велики, чтобы этот механизм мог быть эффективным в большинстве случаев. Однако в том, что касается прохождений галактик вблизи друг друга, нас

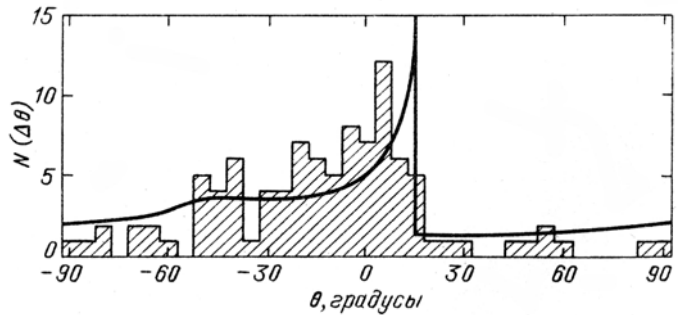


Рис. 5. Для того чтобы изобразить ход плотности областей звездообразования, проходящих через рукав от внутреннего края до внешнего, можно построить распределение областей НП в рукаве галактики. На этом рисунке структура спирального рукава NGC 3136 (представлена штрихованной гистограммой) сравнивается с предсказаниями теории волн плотности (сплошная линия). Сходство двух кривых говорит о том, что рукава этой галактики управляют главным образом волной плотности

могут ожидать сюрпризы. Недавние определения темпов звездообразования показывают, что в близко расположенных друг к другу галактиках темп звездообразования аномально велик — особенно в ядрах. Может быть, окажется, что приливные эффекты включаются гораздо легче, чем мы сейчас думаем.

Нет убедительных свидетельств в пользу возникновения спиральных рукавов в результате активности в ядрах галактик, но в этих таинственных и бурных областях происходит достаточно событий, чтобы появилась подобная гипотеза. В радиогалактиках (глава 11) и квазарах (глава 12) наблюдаются очень высокоэнергетические процессы в ядрах галактик, многие из которых выбрасывают огромные потоки газа даже за видимые пределы галактики. Возможно, активность этого типа может каким-то образом приводить к образованию спиральных рукавов, но в настоящее время эта гипотеза весьма расплывчата и не подкрепляется разумной физической моделью.

БАРЫ

У многих спиральных галактик есть еще одна замечательная структурная особенность, обычно некоторым образом связанная со спиральными рукавами: большая концентрация звезд в форме бруска (*бара*), пересекающая ядро и простирающаяся симметричным образом в обе стороны (рис. 6 и 7). Данные измерений скоростей в них показывают, что бары вращаются вокруг ядра как твердые тела, хотя, разумеется, они на самом деле состоят из отдельных звезд и газа. Бары, встречающиеся в галактиках S0 или Sa, более ровные и состоят исключительно из звезд, в то время как бары в галактиках типов Sb, Sc и Irr часто содержат много газа и пыли. Все еще идут споры о движениях газа в этих барах. Некоторые данные свидетельствуют о том, что газ течет наружу вдоль бара, а по другим данным, он течет внутрь. В любом случае, существование баров не удивляет астрономов, изучающих динамику галактик. Численные модели показывают, что неустойчивости в диске вращающейся галактики могут проявляться в форме бара, напоминающего наблюдаемые.

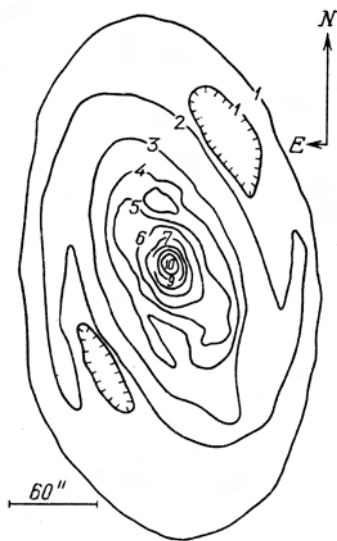


Рис. 6. Изофоты NGC 1350 — галактики типа SBa, демонстрирующие барообразную структуру в центральной области



Рис. 7. Изофоты пересеченной спиральной галактики NGC 1365 типа SBb

ПОРЯДОК ИЗ ХАОСА

Характеристики неправильных галактик не являются совершенно иррегулярными. У них много общих черт, служащих указанием на причины хаотичности их видимой формы (рис. 8). Все эти галактики богаты газом и почти все содержат много молодых звезд и облаков светящегося ионизованного газа, часто исключительно больших и ярких. Ни одна из галактик не имеет центрального балджа или какого-нибудь реального ядра. Распределение яркости неправильных галактик в среднем падает при переходе от центра наружу по такому же математическому закону, как в спиральных галактиках. Многие из них имеют в центральных областях структуры типа бара – особенно хорошим примером является Большое Магелланово Облако (см. главу 6).

Важным намеком на то, как образуются неправильные галактики, являются результаты сравнения их светимостей со светимостями спиральных галактик^{*)}. Почти все они только слабее даже наименее ярких спиральных галактик. Спиральная галактика М 33, лежащая примерно нижнюю границу диапазона светимостей спиральных галактик, все еще ярче Большого Магелланова Облака – одной из ярчайших не правильных галактик. Итак, отсутствие спиральных рукавов у неправильных галактик, по-видимому, связано с их малостью. Возможно, это связано также с величиной углового момента галактики и интенсивностью турбулентных движений в ней. Плоскости неправильных галактик относительно толще, чем у спиральных; это позволяет предполагать, что вращение звезд и газа столь медленное, что спиральные рукава не возникают. С другой стороны, если вращение было бы слишком медленным, то галактика не сплющилась бы до плоскости – неважно, толстой или тонкой – и образовалась бы массивная карликовая эллиптическая галактика.

На самом деле мы не можем с уверенностью сказать, какова связь карликовых эллиптических и карликовых неправильных галактик. Согласно традиционным представлениям, звезды в эллиптических галактиках очень старые (их возраст 10 и более миллиардов лет), в то время как неправильные галактики содержат как старые, так и молодые звезды. Однако существуют некоторые свидетельства в пользу того, что в некоторых карликовых эллиптических галактиках – например, в карликовой галактике в созвездии Киля – еще 2–3 миллиарда лет назад происходил активный процесс звездообразования, и во время этих эпизодов они могли выглядеть, как карликовые неправильные галактики. Это важный вывод, так как динамические объяснения различий галактик этих

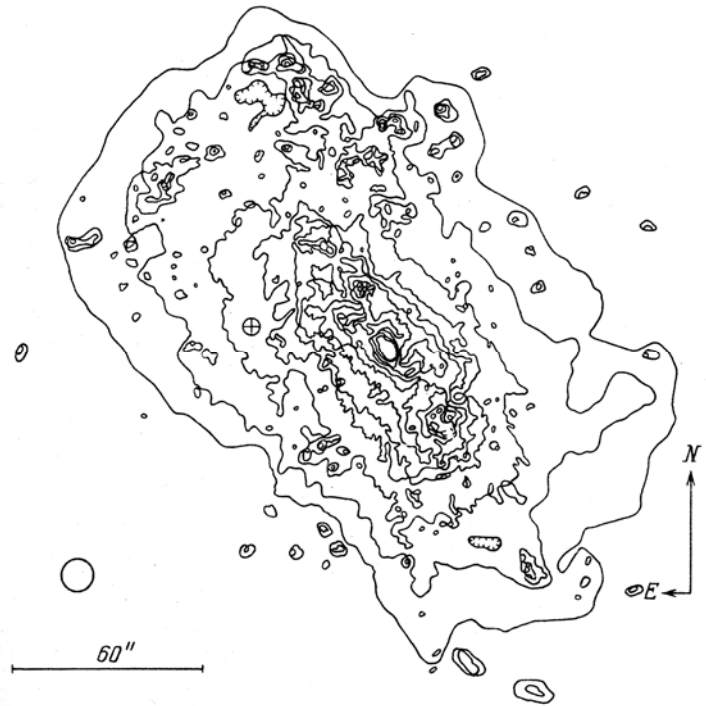


Рис. 8. Изофоты неправильной галактики NGC 4449. Кружком над масштабной линейкой показан размер фотоэлектрической диаграммы направленности

^{*)} Блеск звезды или галактики измеряется в звездных величинах. Звезды с малыми величинами – яркие, а с большими – слабые. Звезды первой величины находится среди примерно дюжины ярчайших звезд ночного неба, в то время как звезда шестой величины – это приблизительно самая слабая звезда, видимая без телескопа. Самые слабые обнаруженные галактики имеют 24-ю величину. Эта логарифмическая шкала устроена так, что ряд шести последовательных звездных величин соответствует изменению блеска в 100 раз.

Обычно упоминаемые величины объектов относятся к их видимому блеску при наблюдениях с Земли. Однако когда астрономы хотят описать истинную светимость звезды или галактики, то они говорят об абсолютной звездной величине, которая представляет собой звездную величину объекта, которую бы он имел, если его поместить на стандартном расстоянии 10 парсеков. Например, абсолютная звездная величина галактики Андромеды составляет –21,6, она имеет исключительно высокую светимость, в то время как видимая звездная величина ее всего 4,4. Это большое различие является результатом большого расстояния галактики от Земли – около 600 000 парсеков (2 000 000 световых лет) вместо стандартных 10 парсеков, используемых для определения абсолютной звездной величины.

двух типов придется отвергнуть в случае, если они могут свободно переходить из одного типа в другой и обратно.

Хотя мы и продвигаемся вперед, еще многое надо узнать о строении галактик. Мы можем достичь большего, чем просто описывать различия, мы можем для многих из них дать объяснения. Однако число нерешенных проблем достаточно велико и астрономам придется творчески обдумывать их на протяжении многих лет.

Глава 3

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Одна из задач современной астрономии – понять, как образовались галактики и как они эволюционируют. Во времена Эдвина Хаббла и Харлоу Шепли было заманчиво верить в то, что типы галактик соответствуют разным стадиям их развития. Однако эта гипотеза оказалась неверной, и задача реконструкции истории жизни галактик оказалась трудной. Самой же трудной оказалась проблема первоначального возникновения галактик.

Природа Вселенной в те времена, когда еще не существовали галактики, неизвестна, и приписываемые ей гипотетические характеристики в значительной степени зависят от выбираемой космологической модели. Большинство принятых в настоящее время космологических моделей предполагает общее расширение, начиная с нулевого момента времени (сразу же после которого Вселенная имеет исключительно высокие плотность и температуру). Физические процессы, описывающие первичный взрыв в этих моделях, могут быть довольно надежно прослежены до момента, когда плотность и температура становятся достаточно низкими, чтобы стало возможным образование галактик. Примерно 1 миллион лет потребовался для того, чтобы Вселенная расширилась и остыла настолько, что вещество стало играть в ней важную роль. До этого преобладало излучение, и сгустки вещества, такие как звезды или галактики, не могли образовываться. Однако, когда температура стала равной примерно 3000 К, а плотность – около 10^{-21} г/см³ (значительно меньше плотности земной атмосферы, но по меньшей мере в миллиард раз больше современной плотности Вселенной), вещество, наконец, смогло формироваться. В это время в достаточных количествах могли образовываться лишь атомы водорода и гелия.

Хотя можно представить несколько механизмов образования галактик из этого водородно-гелиевого газа, найти хотя бы одну модель, работающую в вероятных условиях ранней Вселенной, трудно. Очень мало резонансов для образования галактик в расширяющейся Вселенной с однородным распределением температуры и вещества. В такой идеализированной Вселенной никогда не будет галактик. Существование галактик во Вселенной и видимое преобладание их как форм вещества говорят о том, что догалактическая среда никак не напоминала такое идеализированное газовое облако. Вместо этого должны были существовать какие-то неоднородности. Однако какого типа эти неоднородности и откуда они взялись?

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Большинство попыток найти способы конденсации вещества Вселенной в галактики основаны на гипотезе, впервые подробно разработанной сэром Джеймсом Джинсом. Хотя сейчас принимается, что в ранней Вселенной газ расширялся в соответствии с релятивистской космологической моделью, идеи Джинса основывались на более простой ньютоновской модели Вселенной, где гравитационная неустойчивость возникает, когда сгусток более плотного вещества (называемый возмущением) становится достаточно малым и плотным. Характерный размер возмущений плотности, которые являются только слегка неустойчивыми, называется *джинсовской длиной* и, как было установлено, она зависит от скорости звука в среде, постоянной тяготения и плотности вещества.

Джинсовская масса определяется как масса вещества, которая может стать неустойчивой и начать сжиматься под действием собственного гравитационного поля (рис. 9). Согласно расчетам, в начале «эры вещества» джинсовская масса составляет около 10^5 солнечных масс, и, таким образом, в этот момент истории Вселенной возмущения с такими массами и больше (что включает все известные галактики) должны были стать неустойчивыми и сжаться. Простая модель Джинса не позволяет исследовать ситуацию во время «эры излучения», так как в этом простом анализе не учитывается влияние давления излучения на газ. Однако несколько астрономов и космологов ис-

следовали более сложный случай при наличии излучения, и результаты приблизительно согласуются с результатами, полученными с использованием более простых моделей.

В поисках типа иррегулярности или неустойчивости, которая приводит к современной Вселенной, состоящей из галактик, астрономы исследовали много других видов неустойчивости, кроме гравитационных. Среди них – возможное отсутствие баланса вещества и антивещества, тепловые неустойчивости, флуктуации, связанные с ионизацией и ее зависимостью от температуры и вариации распределения заряда.

Если предполагается из соображений симметрии, что количество вещества во Вселенной было равно и равно сейчас количеству антивещества, то современное существование вещества и антивещества в изолированных областях во Вселенной, естественно, может быть результатом небольшого локального неравенства компонентов в ранней Вселенной после того, как вещество и антивещество отделились от излучения. Во время расширения Вселенной полная аннигиляция произойдет в тех областях, где количества вещества и антивещества равны, а там, где имеется исходный избыток одного из них над другим, часть вещества или антивещества останется (рис. 10). Распределение вещества и антивещества будет клочковатым и сгустки будут сжиматься, образуя скопления галактик. Такая вселенная в конце концов будет состоять из кусочков вещества и антивещества, расположенных в различных местах.



Рис. 10. Аннигиляция вещества с антивеществом

ством вещества, как раз достаточным для образования галактик.

Другой механизм, который мог способствовать конденсации вещества – это тепловая неустойчивость. Области с немного повышенной плотностью остывают быстрее, чем их окружение. Более горячие окружающие регионы сильнее сжимают эти области, повышая их плотность. Таким образом, небольшое возмущение плотности может становиться все более неустойчивым (рис. 11).

Согласно еще одной гипотезе, предложенной Георгием Гамовым, гравитационные силы могут усиливаться «симулированной гравитацией», создаваемой в ранней истории Вселенной интенсивным полем излучения. Частицы в такой Вселенной, как правило, затевают друг друга от излучения и в результате испытывают действие силы, направленной от каждой частицы к другой частице. Эта сила, с которой частицы подвергаются

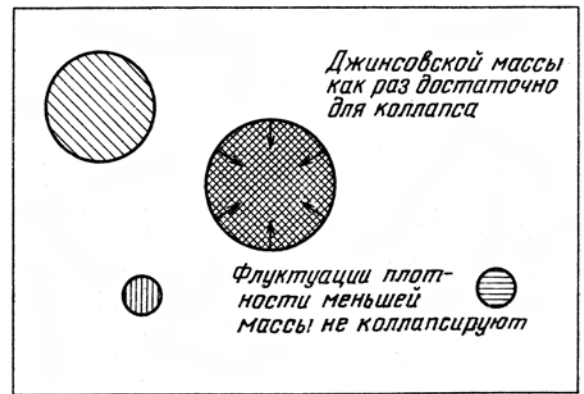


Рис. 9. Джинсовская масса

В этом случае примерно половина видимых нами галактик будет состоять из антивезд. Если мы отправимся в путешествие в такое место и попытаемся совершить посадку на планету из антивещества, то наши атомы бурно провзаимодействуют с атомами антивещества на месте посадки и они аннигилируют друг с другом, что вызовет яркую вспышку света, но вряд ли сделает визит очень приятным. От нас ничего не останется, кроме дыры на поверхности в память о нашей авантюре.

Более вероятная гипотеза утверждает, что вначале количество вещества немного превосходило количество антивещества. Тогда большая часть вещества должна была проаннигилировать с антивеществом на ранних космических фазах при высокой плотности, оставив купающуюся в лучах света Вселенную с количе-



Рис. 11. Флуктуации температуры

действию друг друга, ведет себя по закону обратных квадратов, подобно силе тяготения. Можно, например, представить себе две частицы, разделенные небольшим расстоянием в богатом излучением поле. Частицы поглощают энергию фотонов поля излучения и поэтому находятся под влиянием сил, действующих в разных направлениях. Рассмотрим ситуацию, когда одна частица поглощает фотон, приходящий с направления, противоположного направлению на вторую частицу. На эту частицу действует сила в направлении второй частицы. Так как фотон был поглощен первой частицей, вторая частица оказывается защищенной от поля излучения в этом направлении, и поэтому на нее действует сила преимущественно в направлении первой частицы. В результате возникает эффект взаимного притяжения двух частиц, вызванный их взаимным затенением от поля излучения. Установлено, что этот эффект тени имеет значение лишь на протяжении примерно первых 100 лет существования Вселенной, после чего интенсивность излучения и степень близости частиц уменьшается.

СЖАТИЕ

После достижения индивидуальными протогалактиками гравитационной выделенности через какую-либо форму неустойчивости в догалактическом газе они коллапсируют с образованием галактик значительно меньших размеров и с большими плотностями, оставляя промежуточное пространство почти пустым. Реальный процесс сжатия можно исследовать лишь при помощи теоретического моделирования. Еще не открыта галактика, о которой с уверенностью можно сказать, что она молода по сравнению с оценкой возраста Вселенной, и таким образом, нет объекта, наблюдаемого в стадии сжатия. Вместо этого надо исследовать те ключи к пониманию состояния среды до сжатия, которые можно извлечь из современных характеристик галактик и из их прошлого, наблюдая объекты на больших расстояниях. Можно также подходить к этой проблеме, предлагая правдоподобные начальные условия и производя вычисления, чтобы посмотреть, можно ли прийти к реалистичной картине в результате сжатия исходной протогалактики. Начальные условия, с которых мы должны начинать эти вычисления, включают массу галактики, ее угловой момент, размеры, температуру, химические характеристики, магнитное поле и внутренние турбулентные движения.

Рассмотрим простейшее начальное состояние, в котором свойства протогалактики таковы, что она является холодной, полностью однородной по плотности, совершенно сферической и без турбулентных движений, магнитного поля и внешних воздействий. Для объекта, сравнимого по массе с Млечным Путем, порядка 10^{11} масс Солнца, такой набор начальных условий приводит к совершенно не остановимому коллапсу. Гравитационный потенциал такого объекта достаточно велик, чтобы никакой физический процесс не мог остановить его коллапс в массивную черную дыру, и вычисления показывают, что за короткое по космическим масштабам время такой объект исчезнет (рис. 12). Объект переходит через *предел Шварцшильда*, представляющий собой границу, определяемую в рамках общей теории относительности и возникающую при сжатии массивного тела до столь малых размеров и громадных плотностей, что свет больше не может уйти от него. Объект исчезает для внешнего наблюдателя и наблюдается лишь его гравитационное поле. Таким образом, простейшие начальные условия вообще не приводят к образованию галактики.

Более разумный набор начальных условий следующий: в ходе одного из рассмотренных выше процессов газовое облако уже сжалось до такой степени, что оно стало устойчивым, несмотря на расширение окружающей Вселенной; пусть это будет плотность около 10^{-28} г/см³. Если принять массу равной 10^{11} солнечных масс, то указанная плотность дает для сферического облака начальный радиус около 200 кпк (против 30 кпк – типичного радиуса для этой массы после сжатия). Для того чтобы сжатие было возможным, кинетическая, магнитная и гравитационная энергии должны быть соответствующим образом сбалансированы. Другие начальные условия, необходимые для начала сжатия, следующие: скорость вращения должна быть мала – менее 40 км/с, температура – меньше $2 \cdot 10^{-5}$ К и напряженность магнитного поля должна быть разумно мала – меньше $2 \cdot 10^{-7}$ гаусс.

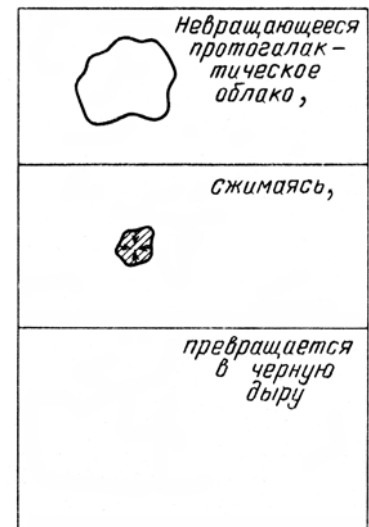


Рис. 12. Судьба невращающейся протогалактики

Если распределение плотности облака остается однородным в ходе сжатия, то гравитационная энергия возрастает обратно пропорционально уменьшающемуся радиусу. С другой стороны, температура остается примерно одинаковой до тех пор, пока плотность вещества не станет настолько большой, что оно станет оптически толстым для излучаемых длин волн. До того, как это произойдет, тепловая энергия (величина энергии движения частиц газа, т. е. температура) газового облака не зависит от радиуса, но после достижения критического значения плотности тепловая энергия при уменьшении радиуса начинает сильно возрастать. Тепловая энергия может остановить сжатие лишь когда радиус меньше этого критического значения – теплового предела. Пока размеры облака больше, турбулентная энергия не важна, так как она быстро рассеивается.

Аналогично, магнитная энергия, возрастающая при сжатии облака, никогда не превышает гравитационную энергию, если она была меньше гравитационной энергии в начальный момент. В некоторый момент радиус становится достаточно малым, чтобы энергия вращения уравновесила гравитационную энергию – это определяет *вращательный предел*. При другом критическом размере из газа конденсируются звезды и начинается быстрый переход от газового облака к галактике, состоящей из звезд. Это *конденсационный предел*. Окончательная судьба сжимающегося облака зависит от соотношения этих трех критических радиусов. В зависимости от того, какой из них наибольший, появляются три интересные возможности.

Если наибольший радиус соответствует вращательному пределу, то сжатие останавливается вращением (рис. 13). Однако центробежные силы ограничены плоскостью вращения, так что сжатие в направлении, перпендикулярном этой плоскости, продолжается до образования тонкого диска. Этот диск выделяется формой и наличием вращения – это спиральная галактика.



Рис. 13. Быстрое вращение приводит к образованию плоской структуры



Рис. 14. Медленное вращение приводит к образованию эллиптической структуры

В случае, если наибольшим является конденсационный предел, звездообразование начинается до того, как эффекты вращения становятся важным фактором торможения сжатия. По мере роста плотности темп звездообразования увеличивается, и большая часть газа проходит через этот процесс. В этом случае, когда сжатие останавливается на соответствующем пределе, для эффективной диссипации энергии почти не остается газа или его остается очень мало. Поэтому диск не образуется. Согласно энергетическим условиям, объект должен после этого несколько расшириться до достижения радиусом другого критического значения. Орбиты звезд будут таковы, что галактика станет почти сферической – в зависимости от величины и распределения начального углового момента. С этими свойствами – почти сферической формой, отсутствием газа и большим количеством звезд, образовавшихся вблизи начала его существования, объект явно будет эллиптической галактикой (рис. 14).

В третьем случае, когда ни вращательный, ни конденсационный предел не являются достаточно большими, чтобы остановить сжатие, облако все уменьшается и уменьшается, пока не образуется сверхмассивный звездообразный объект. Возможно, это будет черная дыра – невидимая и почти необнаружимая.

НАБЛЮДАЯ ЭВОЛЮЦИЮ ГАЛАКТИК

После обретения галактикой формы следующие стадии эволюции являются медленными и гораздо менее эффектными. Звезды образуются, умирают и выбрасывают богатое тяжелыми элементами вещество, образующее новые звезды, галактика постепенно тускнеет и краснеет, химический состав ее звездного населения медленно меняется по мере обогащения газа и пыли, из которых образуются последующие поколения звезд, тяжелыми элементами.

Мы не можем увидеть, как галактика меняется. Человеческая жизнь по меньшей мере в миллион раз короче, чем надо для этого. Но мы можем наблюдать эволюционные эффекты, глядя назад на все более ранние стадии эволюции нашей Вселенной, когда галактики оказываются более молодыми. Самые далекие наблюдаемые нами нормальные галактики мы наблюдаем более молодыми, чем наших соседей. Свету от галактики на расстоянии 10 миллиардов световых лет, например, потребовалось 10 миллиардов лет, чтобы достичь нас, и, таким образом, мы наблюдаем и измеряем изображение галактики, которая на 10 миллиардов лет моложе нашей. Если возраст Вселенной составляет от 15 до 20 миллиардов лет (точное значение еще с уверенностью не установлено), то возраст наблюдаемой галактики составляет всего одну треть возраста галактик вблизи нас, свет от которых доходит до нас быстрее. Разумеется, это соображение опирается на веру в одновременное сжатие и образование всех галактик вскоре после Большого Взрыва, что подтверждается исследованиями близких галактик и предсказывается космологическими моделями.

Для того, чтобы увидеть эволюцию галактик, нужно смотреть все дальше и дальше. Расстояние в первые два миллиарда световых лет слишком мало, чтобы обнаружить изменения, но более далекие галактики демонстрируют реальные различия, особенно заметные в их цветах. Недавно при расстоянии около 10 млрд. световых лет действительно обнаружено настоящее влияние эволюции на цвета галактик. Используя специальные детекторы на 200-дюймовом Паломарском телескопе, астрономы пронаблюдали галактики 23-й и 24-й величины с достаточной точностью, чтобы увидеть, как выглядят молодые галактики. В значительной степени, как это предсказывают теоретические модели, галактики в то время были более яркими и голубыми.

Расчеты Йельского астронома Беатрис Тинсли, которая посвятила большую часть своей короткой, но творческой жизни изучению эволюции галактик, помогли астрономам понять детали этих возрастных эффектов. Из моделей, созданных Тинсли с сотрудниками, нам известно, что скорость падения яркости и изменения цвета зависит от многих обстоятельств: распределения звезд по массам, скорости регенерации вещества в звездах, доли звезд, образованных при начальной вспышке и многих других. В настоящее время наблюдаемые далекие галактики начинают снабжать нас этими подробностями. Это поразительно – иметь возможность узнавать о событиях, происходящих на протяжении миллиардов лет. Мы делаем это, переводя часы на миллиарды лет назад, – глядя на объекты на расстояниях в миллиарды световых лет.

Другим заметным отличием молодых галактик в далеких частях Вселенной от галактик, подобных современным, является наличие в прошлом значительно большего числа активных или взрывающихся галактик. Плотность квазаров и радиогалактик возрастает по мере того, как мы смотрим все дальше и дальше. Поэтому эти объекты должны были быть гораздо более распространены в раннюю эпоху существования Вселенной. Современные теоретические модели предполагают, что они образуются при коллапсе сверхмассивных объектов – возможно, черных дыр – в центрах галактик. Черные дыры довольно безопасны, если в них нечего «бросить», но приводят в действие бурные энергетические процессы, если к их гравитационному полю слишком близко подходят звезды или газ.

Возможно, молодые галактики, все еще богатые переработанным газом, были больше предрасположены к подаче этого газа в центральные ядра, чем это делают сейчас старые галактики. Если там притаились черные дыры, то эти галактики скорее вспыхнут, как квазары или радиогалактики (см. главы 11 и 12). Теперь, по-видимому, подобная исключительно бурная активность по большей части прекратилась.

Глава 4

ЗВЕЗДЫ И СКОПЛЕНИЯ, ГАЗ И ПЫЛЬ

Галактики состоят из многих компонентов. Они могут содержать звезды, звездные скопления, светящиеся газовые облака и пыль. Только радиотелескопы обнаруживают газообразный нейтральный водород, молекулы и облака быстрых заряженных частиц. До сих пор невидимыми для всех наблюдательных средств остаются неизвестные объекты, возможно, составляющие большую часть массы галактики, таинственные всепроникающие объекты, образующие в пространстве своеобразное гало галактик (см. главу 5). Больше всего, разумеется, мы знаем о видимых объектах в галактике, и они могут много рассказать нам о подробностях истории ее жизни.

ЗВЕЗДНЫЕ НАСЕЛЕНИЯ

Одним из многочисленных вкладов Вальтера Бааде в понимание галактик было подразделение звезд на два населения. Используя 100-дюймовый телескоп обсерватории Маунт Вилсон, он исследовал близкие галактики, в особенности спиральную галактику М 31 и ее спутники, и сравнил их со звездами и звездными скоплениями в нашей Галактике – Млечном Пути. В 40-х и начале 50-х годов он разработал схему с двумя населением, понимание которой было в конце концов достигнуто в терминах звездной и галактической эволюции (фото XV).

Два населения состояли из объектов очень различных типов и занимали разные области галактик. Население I включало очень горячие звезды чрезвычайно высокой светимости (звезды классов О и В), звезды других спектральных классов, рассеянные звездные скопления, молодые ассоциации, нейтральный водород и другие формы облаков газа и пыли^{*)}. Это было молодое население, по содержанию тяжелых элементов похожее на Солнце – около 99% массы приходилось на водород и гелий и 1% – на все остальное. Согласно исходному определению, население II включало лишь звезды – красные гиганты вместе со связанными с ними слабыми звездами: никаких ярких голубых звезд, никакого газа, пыли – и только шаровые звездные скопления. Все звезды старые (с возрастом около 10 миллиардов лет или больше), с дефицитом тяжелых элементов: как правило, содержание тяжелых элементов (с массой ядер больше массы ядра гелия) у них в 10–100 раз меньше, чем у Солнца. Таким образом, звезды населения II оказались состоящими почти исключительно из водорода и гелия. Было установлено, что население I существует в дисках спиральных и неправильных галактик вроде Магеллановых Облаков. Звезды населения II населяют центральные балджи спиральных галактик и их разреженные внешние гало. Считалось, что эллиптические галактики состоят только из объектов населения II.

Концепция двух населений Бааде была проста и поразительно эффективна. Она привела к разъяснению сложной взаимозависимости возраста, динамики галактик и синтеза элементов в них и заложила основы понимания эволюции звезд. Но, как и многие другие «озарения» в науке, эта концепция оказалась чрезвычайно упрощенной. Грандиозная схема двух типов звезд не учитывала промежуточные объекты разного вида и совершенно игнорировала все исключения. Сначала астрономы пытались улучшить схему, определяя разные подтипы (население IIa, население I.5 и т. д.), но со временем стала очевидной тщетность таких попыток. По мере улучшения понимания свойств галактик и усовершенствования современного оборудования необходимость в упрощенной схеме отпала. Она великолепно сыграла свою роль, но теперь астрономы могут использовать количественные измерения параметров групп звезд. Сейчас звездному скоплению или части галактики можно приписать их действительный возраст и химический состав. Понятия населений I и II Бааде использовались все реже и реже, вплоть до того, что сейчас астрономы их почти не упоминают.

Одна из причин, по которым эта схема разрушилась, состояла в сильной корреляции, которая сначала была установлена между возрастом и химическим составом. Население I было более молодым и богатым тяжелыми элементами. Население II было старым и бедным тяжелыми элемен-

^{*)} В галактиках в основном обнаруживаются три типа групп звезд. Звездные ассоциации представляют собой слабо связанные молодые группировки недавно образовавшихся звезд, которые бросаются в глаза благодаря их очень высокой светимости и температуре. Рассеянные скопления – это более компактные группы меньших размеров, относительно устойчивые и имеющие разнообразные возрасты. Шаровые скопления – это большие богатые скопления высокой светимости, все очень старые и обычно содержащие самые старые из известных звезд в галактике.

тами. Эта корреляция получила красивое объяснение в 1959 г., когда осознали, что синтез в звездах тяжелых элементов вызывает постепенное изменение содержания химических элементов в звездном населении. В то время, как рано образовавшиеся звезды состоят почти исключительно из водорода и гелия, те, что образовались позже, особенно образующиеся сейчас звезды, состоят из обогащенного вещества, созданного в недрах прошлых поколений звезд. Тяжелые элементы в нашем Солнце, возраст которого составляет всего 4,6 миллиарда лет, были синтезированы в ядрах существовавших до этого звезд. (Это, разумеется, справедливо для Земли и ее жителей.) Таким образом, по мере синтеза элементов звезды становились богаче ими, и наша Галактика могла быть грубо подразделена на звезды населений II и I.

Но в 60-х годах оказалось, что Магеллановы Облака ставят перед нами проблему. Во-первых, эти галактики, по-видимому, содержали шаровые скопления, которые скорее были молодыми, чем старыми. Более того, в Облаках было обнаружено много молодых звезд, которые при подробном спектроскопическом исследовании оказались бедными тяжелыми элементами. Таким образом, для этих двух галактик разделение на население I и II непригодно. Кроме того, в последние годы было показано, что многие эллиптические галактики, которые предполагались состоящими лишь из населения II, оказались удивительно богатыми тяжелыми элементами, так же, как и центральные балджи спиральных галактик. Даже в нашей Галактике имеет место нарушение схемы: в самых внешних частях галактического диска содержание тяжелых элементов в молодых звездах неожиданно низкое, в то время как в шаровых скоплениях вблизи галактического центра и в звездах балджа тяжелых элементов довольно много, несмотря на их большой возраст.

Вместо того, чтобы опираться на эти устаревшие категории, мы сейчас используем для характеристики населения такие параметры как возраст, содержание химических элементов, динамические характеристики, расположение в пространстве. В следующих разделах описываются некоторые из способов определения этих характеристик.

ТИПЫ ЗВЕЗД

Звезды любого типа населения обладают разнообразными свойствами. Основные различия между звездами вытекают из различия их масс, возрастов и химического состава. Однако для типичного набора звезд – такого, как звезды вблизи Солнца, основным различающим признаком является масса, так как большинство звезд, как оказалось, находятся на устойчивом и относительно неизменном этапе жизни, и большая часть звезд имеет почти одинаковый химический состав. В этом случае масса определяет большинство наблюдаемых различий: звезды больших масс горячие, имеют очень высокую светимость и голубой цвет, в то время как маломассивные звезды холодные, имеют низкую светимость и красный цвет. Характеристики звезд промежуточной массы, вроде Солнца, тоже промежуточные: они сравнительно холодные, имеют средний блеск и желтый цвет.

Возраст звезды влияет на ее вид во время некоторых коротких периодов ее жизни. Большую часть своей жизни звезда проводит на стадии, называемой астрономами *главной последовательностью*. В этот период ее цвет, температура, светимость и другие параметры почти не меняются. Но до того, как звезда достигнет этого устойчивого состояния, еще в состоянии *протозвезды*, она имеет более красный цвет и в течение короткого времени большую светимость, чем будет иметь на этапе главной последовательности. К сожалению, протозвезды редко видны, так как эта стадия занимает ничтожную долю жизни звезды. Мы скорее застанем звезду на стадиях после главной последовательности, тоже коротких, но не в такой степени, как ранние стадии жизни. В конце стадии главной последовательности типичная звезда становится *красным гигантом* (очень массивные звезды становятся *сверхгигантами*); ее цвет меняется, она быстро увеличивается в размере и ее светимость возрастает. В этот период большинство звезд наиболее заметны, и их легче всего обнаружить в далеких объектах – например, в других галактиках.

Следовательно, когда мы смотрим на звезды в близкой галактике, мы видим лишь звезды самой высокой светимости, а это яркие голубые массивные звезды и красные проэволюционировавшие гиганты с высокой светимостью. Но реальная средняя продолжительность жизни звезды сильно зависит от ее массы: звёзды с большой массой живут очень недолго – как правило, несколько миллионов лет, в то время как маломассивные звезды светят на протяжении миллиардов лет. (Солнце уже 5 миллиардов лет является звездой главной последовательности со стабильной светимостью, и ему осталось еще 10 миллиардов лет до превращения в красный гигант.) По этой причине мы не видим ярких голубых массивных звезд в галактиках, в которых в последнее время

не происходило звездообразования. В галактике населения типа II, где все звездообразование произошло миллиарды лет назад, мы сможем обнаружить лишь яркие красные гиганты.

Хотя химический состав большинства звезд почти одинаков, у них все же имеются небольшие различия. Они не очень сильно влияют на светимость или цвет звезды, но могут быть обнаружены в спектрах. Почти все звезды состоят в основном из водорода и гелия: например, у большинства звезд в нашей области Галактики лишь 1% массы составляют тяжелые элементы. У очень немногих звезд тяжелые элементы составляют еще меньшую долю – вплоть до 0,01%. Звезды типа Солнца называются звездами, богатыми тяжелыми химическими элементами; в нашей Галактике эти звезды принадлежат к населению I, в то время как звезды, бедные тяжелыми элементами, принадлежат к населению II.

Температура звезды очень сильно влияет на вид ее спектра. В начале XX в. астрономы разработали систему классификации звезд с разными видами спектров, которые являются, как мы теперь знаем, звездами с разными температурами. Самые горячие звезды с температурой 25 000 К и выше называются O-звездами. Звезды с промежуточными температурами примерно от 11 000 К до 25 000 К являются B-звездами, далее идут звезды классов A, F, G, K и, наконец, M-звезды с температурой 3500 К и ниже. Солнце представляет собой G-звезду с температурой на поверхности около 6000 К.

ДИАГРАММА ЦВЕТ–ВЕЛИЧИНА

Удобный способ определения типов звезд в какой-либо области пространства состоит в построении диаграммы их цветов и видимых величин. То, что при этом получается, называется диаграммой цвет–величина. На нее можно нанести не только положения наблюдаемых звезд, но и ожидаемые положения звезд разных масс, возрастов и разного химического состава. Сравнивая наблюдения с теоретическими данными, астрономы могут определять свойства наблюдаемого набора звезд. В галактиках видны только самые яркие звезды, но тем не менее диаграммы цвет–величина разных галактик содержат много информации об их звездных населенностях. Например, в галактике вроде Большого Магелланова Облака (глава 6), видны голубые массивные звезды на яркой части главной последовательности, а также красные проэволюционировавшие звезды-гиганты, и можно определить относительное число молодых и старых звезд (рис. 15). Как будет показано в следующих главах на примере нескольких отдельных галактик, это хороший способ установить, что происходило в течение долгого процесса развития различных галактик (рис. 16).

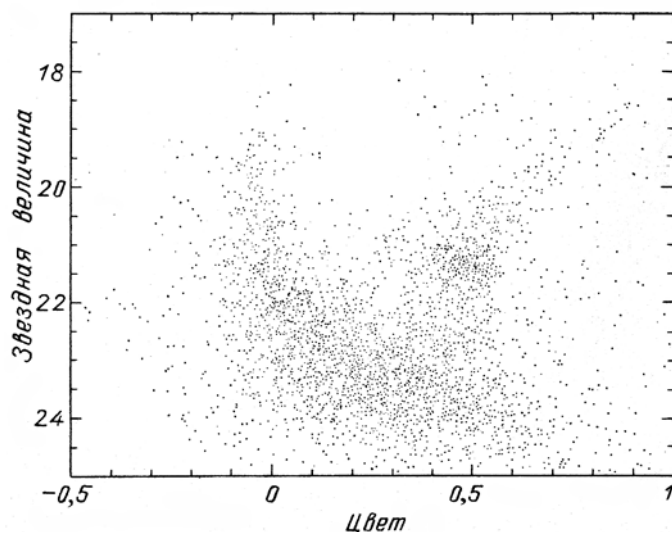


Рис. 15. Диаграмма цвет–светимость для участка Большого Магелланова Облака. По вертикальной оси отложены звездные величины, а по горизонтальной – цвета звезд (от голубых слева до красных справа). Звезды в левой части диаграммы находятся на главной последовательности, в то время как большинство звезд в правой части представляют собой проэволюционировавшие гиганты

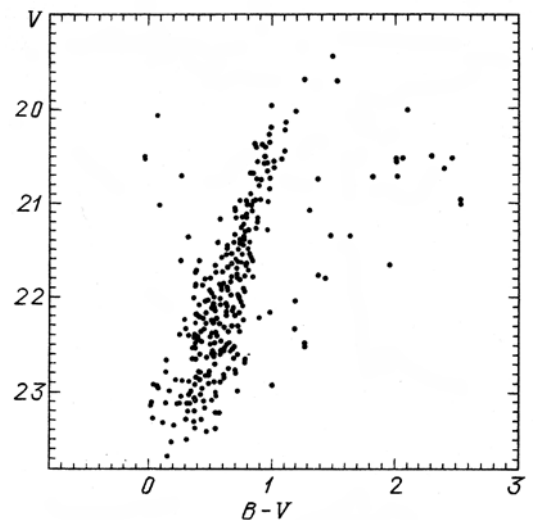


Рис. 16. Диаграмма цвет–величина для карликовой эллиптической галактики Лев I. Все нанесенные на диаграмму звезды – это красные проэволюционировавшие гиганты: главная последовательность слишком слабая, чтобы ее можно было обнаружить в этой старой и далекой галактике

ФУНКЦИИ СВЕТИМОСТИ ДЛЯ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКАХ

Достаточно близкие для получения диаграмм цвет–величина галактики к тому же могут довольно хорошо разрешаться на звезды так, что и в них можно установить число звезд разного блеска. Это дает так называемую *функцию светимости звезд*. Оказалось, что светимости звезд в окрестностях Солнца распределены в соответствии с кривой, известной под названием *функции светимости ван Рейна*, выражающей число звезд в интервале абсолютных величин в данном пространственном объеме. Функция ван Рейна для окрестностей Солнца была определена в ходе статистических исследований близких звезд.

Сейчас функции светимости известны для многих галактик (рис. 17). Например, функция светимости для Малого Магелланова Облака, давно измеренная Шепли с сотрудниками Гарвардской обсерватории при сравнении с функцией ван Рейна демонстрирует относительный избыток звезд высокой светимости. Это, вероятно, общее свойство неправильных галактик, которые, по-видимому, богаче молодыми звездами сверхвысокой светимости и газом, чем спиральные галактики вроде нашей.

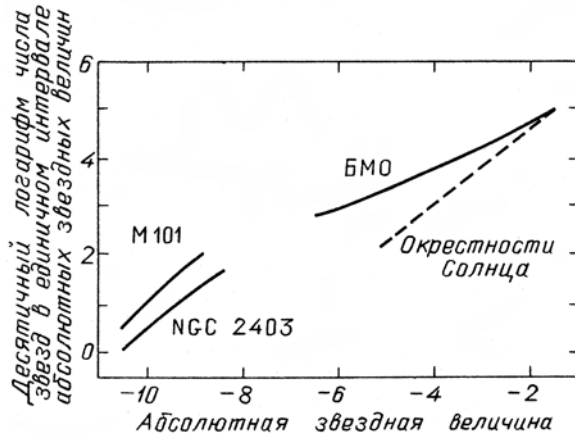


Рис. 17. Функции светимости для спиральных галактик NGC 2403 и M 101 в сравнении с функциями светимости Большого Магелланова Облака и окрестности Солнца. В двух спиральных галактиках, которые расположены от нас дальше БМО, можно провести подсчеты лишь самых ярких звезд. В БМО гораздо меньше очень ярких звезд – это из-за меньшей общей численности населения. Все кривые, кроме той, что относится к окрестностям Солнца, изображают общее число звезд в галактике, попадающих в данный интервал звездных величин

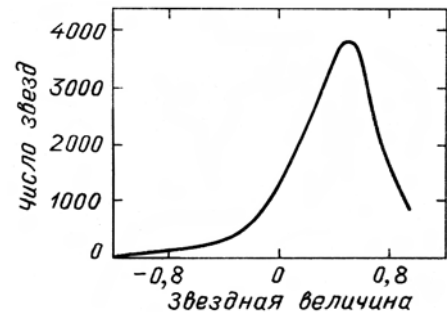


Рис. 18. Функция светимости эллиптической галактики (системы Скульптора), полученная Шепли. По горизонтальной оси отложены абсолютные звездные величины звезд системы, а по вертикальной – число звезд соответствующей звездной величины

Функции светимости эллиптических галактик, таких как галактика в созвездии Скульптора, очень похожи на функции светимости шаровых звездных скоплений (рис. 18). Измерения поверхностной яркости неразрешенных звезд в галактике в Скульпторе показали, что часть функции светимости, соответствующая низким светимостям, тоже должна быть похожа на соответствующую область функции светимости шаровых скоплений, так как общая светимость неразрешенной части, а также ее цвет похожи на соответствующие параметры типичного шарового звездного скопления.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ТИПЫ ГАЛАКТИК

Спектры галактик могут кое-что рассказать об относительном числе звезд различных типов в них и о химическом составе этих звезд. Однако интерпретировать эти спектры нелегко, так как они составные и не всегда просто выделить влияние мириад различных звезд, вносящих свой вклад в спектр.

Из-за важности информации о спектре для проблемы звездного состава галактик были затрачены значительные усилия для достижения высокой точности получаемых спектров. При сочетании этой информации с данными о распределении светимости и массы в галактике, а также с картой содержания нейтрального водорода, возникает довольно полная модель состава галактики.

В большинстве исследований спектров галактик применяется электронный детектор, который с высокой точностью измеряет интенсивность спектра в большом числе разных длин волн. Наблюдательные данные при помощи ЭВМ сравниваются с моделями, предполагающими различные комбинации звезд разных типов и разного химического состава. При достаточном числе типов звезд и различных значений интенсивностей линий химических элементов становится возможным получение хорошего модельного приближения, позволяющего довольно точно определять параметры звезд галактики. Например, если взять галактику М 31 (глава 8), то из параметров многих линий ясно, что ее спектр составной. В голубой части спектра выделяются линии водорода, в то время как в инфракрасной области присутствуют полосы окиси титана, что означает наличие как звезд горячее Солнца, дающих сильные водородные линии, так и звезд значительно холоднее Солнца с молекулами окиси титана. В то же время должно быть много звезд, более или менее похожих на Солнце, – из-за наличия сильной линии магния в зеленой и линий циана в голубой частях спектра. Однако звездная смесь в М 31 сильно отличается от смеси в окрестностях Солнца. В М 31 намного больше слабых красных звезд, чем в нашей Галактике в окрестностях Солнца. Показателем этого различия является отношение массы в единичном объеме к его полной светимости, выраженное в солнечных единицах. Отношение массы к светимости в окрестностях Солнца примерно равно $M/L = 0,7$, в то время как расчеты дают для ядра М 31 значение около 20.

ГАЗ

Межзвездный газ в галактике по большей части представляет собой холодный, нейтральный атомарный водород, обозначаемый НІ. Вблизи горячих звезд водород ионизован и излучает видимый свет, образуя области НІІ. Римская цифра после Н означает степень ионизации (число электронов, потерянных атомом из-за высокой температуры окружающей среды). Отсутствию потерянных электронов соответствует цифра I, однократно ионизованному газу – II и т. д. В космическом пространстве имеются небольшие количества других газов, например, гелия, атомы которых имеют больше электронов и могут находиться в более высоких стадиях ионизации.

Вообще газовый компонент не очень заметен в эллиптических галактиках. Тем не менее, спектроскопические обзоры свидетельствуют о наличии возбужденного газа в ядрах примерно 15% таких галактик. По интенсивности эмиссионные линии находятся в пределах от едва обнаружимых до сильных и хорошо заметных. В плотных скоплениях галактик (таких, как скопления в Персее и Волосах Вероники) эмиссионных линий практически нет – вероятно, потому, что столкновения плотно упакованных галактик между собой начисто вымели весь газ.

Рассмотрим в качестве типичного примера эллиптической галактики, у которой обнаружено излучение газа, NGC 4278 – галактику типа Е1 в скоплении галактик в Деве (рис. 19). На спектрах, полученных таким образом, чтобы можно было наблюдать на разных расстояниях от центра дисперсии скоростей и интенсивности эмиссионных линий, эмиссионные линии наклонены из-за вращения газового облака. Они исключительно широкие в центре по причине больших турбулентных скоростей, что придает линиям в спектре форму ромба. Результаты подробных измерений показывают, что разброс скоростей в центре галактики составляет около 700 километров в секунду. Распределение газа вокруг ядра почти круговое. Турбулентная скорость уменьшается наружу и становится почти нулевой там, где исчезает эмиссионная линия. Диаметр газового облака около 200 парсеков, что больше типичной области НІІ, но не превосходит крупнейшие такие области в спиральных и неправильных галактиках. При удалении от центра наружу скорость меняется примерно на 1,5 километра в секунду на парсек. Линия ионизованного кислорода 3727 \AA в 10 раз интенсивнее других линий. Сравнение относительных интенсивностей различных линий говорит о сходстве облака с типичной областью НІІ, такой как Туманность Ориона в нашей Галактике. Если предположить, что температура газового облака тоже близка к температуре диффузной туманности в Млечном Пути (около 10 000 К), то из интенсивностей линий можно вычислить, что отношение содержания водорода к содержанию кислорода очень близко к солнечному. Так как турбулентные движения должны за относительно короткое время затухать, то каким-то образом должна осуществляться непрерывная подпитка газа энергией.



Рис. 19. Диаграмма, демонстрирующая замечательную форму спектра NGC 4278 – галактики типа Е с облаком газа в центре

Общая масса газа, вычисленная по его плотности и размерам облака, примерно равна 100 000 масс Солнца. Мы не знаем, что ионизовало газ. Возможно, высокая дисперсия скоростей приводит к рассеянию достаточного количества энергии для поддержания газа в ионизованном состоянии, или, может быть, имеется несколько горячих голубых звезд с достаточно мощным ультрафиолетовым излучением для ионизации газа и придания ему турбулентного движения. Скорее всего, газовое облако состоит из газа, выброшенного эволюционирующими звездами, который упал к центру галактики.

Обзоры спиральных и неправильных галактик показывают, что все они содержат газ - как нейтральный водород, так и облака возбужденного газа (фото XVI). У галактик типа Sa самые слабые эмиссионные линии, а у неправильных - самые сильные линии и наибольшее отношение газа к звездам. Доля газа в галактиках монотонно уменьшается при переходе от галактик типа Irt и Sc к Sa-галактикам. Более того, распределение газа также зависит от типа галактики. В спиральных галактиках типа Sa и Sb газ часто заключен в кольцо, но в неправильных галактиках и галактиках типа Sc газ распределен по всей звездной системе (фото XVII и XVIII). Галактики типа SBc и SBb содержат большие количества ионизованного газа в ядре, в то время как это имеет место лишь для немногих Sb и Sc галактик. Как правило, спектры указывают на физические условия, аналогичные условиям в нормальных эмиссионных туманностях в нашей Галактике, с температурами около 10 000 К и электронной плотностью меньше примерно 1000 на кубический сантиметр. Отношение интенсивности водородных линий к интенсивности линий других элементов, таких как азот, уменьшается к центру галактики. Это, по-видимому, вызвано скорее уменьшением отношения содержания водорода к содержанию азота, чем изменением электронной температуры, но могут быть замешаны и другие эффекты.

Существуют три способа использования радиотелескопов для изучения газа в галактиках. Если настроить радиотелескоп на длину волны 21 см, то можно регистрировать и картографировать распределение холодного нейтрального водорода в галактике. Спиральные галактики содержат значительные количества этого газа, распределенного относительно равномерно среди звезд. Этот газ часто простирается далеко за пределы самых далеких видимых звезд, образуя большую плоскую газовую оболочку с центром в звездной галактике.

Другой способ обнаружения газа при помощи радиотелескопа состоит в поиске радиоизлучения от горячих областей НII. Любое горячее газовое облако излучает радиоволны, но вместо того, чтобы излучать только в одной определенной длине волны (*излучение в линии*), оно излучает во всех длинах волн, и это называется *излучением в континууме*. Чем больше и горячее газовое облако, тем больше оно излучает в радиоконтинууме. Для многих близких спиральных и неправильных галактик можно построить карты этих горячих газовых облаков, устанавливая места концентрации в них возбужденного газа.

Наконец, третий способ изучения в радиодиапазоне газа в галактиках состоит в наблюдении излучения частиц высокой энергии. Оно отличается от обычного излучения газа необычным спектральным распределением. Это излучение называется *синхротронным излучением* и наблюдается лишь при особых условиях, предполагающих взрывные или другие бурные события - вроде тех, что наблюдаются в возмущенных галактиках (главы 11 и 12).

Распределение областей НII. На фотографиях или электронных изображениях галактик, полученных с фильтрами, выделяющими эмиссионные линии газообразного водорода, видно распределение областей НII. Самой заметной особенностью распределения НII в спиральных галактиках является их преимущественная конденсация в спиральных рукавах. Однако они существуют не только исключительно там. Есть места, как, например, во внутренней части одного из спиральных рукавов М 33, где области НII занимают узкую полосу вдоль внутреннего края рукава, но обычно они распределены вдоль всей структуры рукава, а также (особенно в галактиках с менее совершенно очерченными рукавами) между рукавами.

Максимальная плотность областей НII в спиральных галактиках наблюдается на расстоянии от центра около одной трети расстояния до края галактики. Областей НII обычно мало в центрах многих спиральных галактик - особенно галактик типа Sa и Sb, а также в самых внешних рукавах. Например, в М 31, области НII заключены в кольцеобразной области вблизи того места, где рукава начинают преобладать над эллиптическим компонентом галактики (см. также в разделе «Газ»).

Галактики, в которых изучено распределение НI и НII, разнообразны. В отличие от М 31, у которой пики нейтрального водорода и областей НII находятся примерно в одних и тех же местах, у большинства галактик наблюдается заметное различие положений максимальной плотности нейтрального водорода и максимальной плотности НII. Пик нейтрального газа обычно расположен

дальше от центра. Это может быть результатом того, как газ конденсировался в звезды на протяжении жизни галактики; возможно, большая часть эффективного звездообразования происходит вблизи центра галактики и степень полноты конденсации газа в звезды с удалением от центра падает.

У неправильных галактик наблюдается довольно хаотическое распределение нейтрального водорода во всем видимом объеме. Например, в Магеллановых Облаках можно видеть концентрации нейтрального водорода в пределах отдельных звездных ассоциаций и даже звездных скоплений. Радионаблюдения в континууме позволили радиоастрономам обнаружить как тепловые радиоисточники, вроде областей НII, так и нетепловые радиоисточники – такие, как остатки сверхновых – во многих ближайших галактиках.

ПЫЛЬ

Надежные данные о наличии пыли в галактиках получить нелегко. Есть три способа ее обнаружения: по покраснению отдельных компонентов галактики (звездных скоплений, переменных звезд, О- и В-звезд), по эффекту поглощения света звезд галактики и видимых за нею далеких галактик, а также по инфракрасному излучению пыли.

В случае Магеллановых Облаков измерения цветов О- и В-звезд высокой светимости – главным образом в ассоциациях и скоплениях – показывают средний избыток цвета около 0,05 звездной величины, что означает поглощение пылью около 15% общего излучения звезд. Это, однако, среднее значение, основанное на измерениях, проведенных для многих участков в Облаках. Гораздо большие покраснения, вызванные более крупными концентрациями пыли, тоже наблюдаются в Облаках, особенно в участках наподобие того, что окружает гигантскую область НII скопления 30 Золотой Рыбы, где присутствуют к тому же большие концентрации газа.

Для некоторых галактик, таких как М 31, измерения цветов шаровых звездных скоплений свидетельствуют о зависимости поглощения света пылью от расстояния до центра галактики. Несмотря на видимые на фотографиях существенные локальные иррегулярности в распределении поглощения, вызванные пылью спиральных рукавов, это распределение обычно симметрично относительно центра, причем поглощение падает при переходе к внешним частям галактики и возрастает вблизи спиральных рукавов.

Для нескольких близких объектов был применен метод исследования пыли в галактике путем подсчета видимых сквозь нее далеких галактик. Среди этих объектов были и очень слабо структурированные карликовые эллиптические галактики Местной группы. Из полученного в ходе подсчетов распределения галактик заднего фона в области нескольких таких карликовых галактик очевидно, что в них нет заметного поглощающего вещества, так как число далеких галактик за ними не уменьшается.

За Магеллановыми Облаками также можно видеть далекие галактики, и это дало астрономам карты *общего* количества поглощающего вещества, особенно для Большого Магелланова Облака. Согласно результатам исследований, в центре этой галактики поглощение составляет около 1,2 звездной величины. Таким образом, сквозь галактику проходит только около одной трети света.

Другой способ исследования пыли в галактиках состоит в изучении пылевых полос, видимых в проекции на аморфном фоне галактики. У некоторых галактик, особенно у видимых почти с ребра, такие полосы очень заметны (фото XIX). Они ясно свидетельствуют о том, что пыль широко распространена в спиральных узорах большинства спиральных галактик и сильно концентрируется в большинстве случаев к галактической плоскости.

Посмотрим на пыль в спиральных рукавах галактики NGC 5194. Эта галактика типа Sc находится перед спутником типа Irr II - NGC 5195 (фото XX). Один из рукавов пересекает половину изображения NGC 5195 и пыль в рукаве хорошо видна – как пересекающая меньшую галактику полоса поглощения. Так как NGC 5195 относительно симметричный объект, то можно измерить полное поглощение, вызванное пылью наложенного спирального рукава; цвет галактики прямо за пылью аномально красный и яркость аномально низкая. Избыточное покраснение почти пропорционально общей величине поглощения. Кроме того, пыль распределена на более обширной области, чем ярчайшая часть спирального рукава. Наиболее заметна пыль во внутренних частях спирального рукава, что наблюдается и в других галактиках. Полное поглощение, вызванное пылью, составляет около 0,4 величины – того же порядка, что и толщина слоя пыли, обнаруженная в местном спиральном рукаве нашей Галактики.

Глава 5

НЕДОСТАЮЩАЯ МАССА

Не так много лет назад одной из наиболее надежных областей внегалактической астрономии было определение масс галактик. Для этой цели были разработаны хорошие методы, собраны данные обширных измерений и мы имели значения масс, которым все доверяли. Несколько вызывающих беспокойство проблем возникло в 60-е годы, особенно в связи с массами, полученными по данным измерений скоростей галактик в скоплениях, которые казались слишком большими. Но в общем было чувство, что такие простые задачи, как определение массы Млечного Пути или галактики в Андромеде, решены.

Однако к 1980 г. произошел удивительный поворот, оставивший нас сейчас в состоянии полного недоумения в вопросе о массах галактик. По-видимому, ни один из полученных в прошлом ответов не верен по причине совершенно неожиданного и до тех пор не осознававшегося затруднения. Перед тем, как броситься с головой в эту загадку, сделаем обзор основных методов, использовавшихся астрономами в этих сложных исследованиях.

ПОДСЧЕТЫ ЗВЕЗД

Нетрудно оценить общую массу галактики, используя очень простые предположения и опираясь на легко измеряемые величины. Например, масса нашей Галактики может быть оценена по ее известному радиусу и числу звезд вблизи Солнца. Все строится на простых, но не очень точных предположениях о том, что мы живем в области с типичной звездной плотностью и по форме наша Галактика близка к сфере. Если сосчитать звезды в окрестности Солнца и добавить сюда массу газа и пыли, то получится плотность около 3/100 солнечной массы на кубический световой год. Радиус Галактики около 15 тысяч световых лет, так что в предположении сферической формы объем составляет около 13 триллионов кубических световых лет. Общая масса, заключенная в сфере, равна произведению объема на плотность, и таким образом наше приближение дает величину 400 миллиардов масс Солнца. Этот результат удивительно близок к значениям, получаемым более точными методами. На самом деле плотность звезд в нашей Галактике сильно меняется от места к месту и, разумеется, звезды не распределены равномерно внутри сферы. Тем не менее простой подсчет отдельных звезд вблизи нас и обобщение локальной плотности дают хорошее первое приближение и наглядное представление об огромности массы нашей Галактики.

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ

Гораздо лучшим методом определения массы галактики является метод, основанный на измерении скорости вращения галактики. Метод ненамного сложнее определения массы Солнца по скоростям орбитального движения планет. Если бы Солнце было массивнее, чем сейчас, то Земле пришлось бы быстрее двигаться вокруг него по орбите, иначе она упала бы на Солнце. Менее массивное Солнце с меньшей силой гравитационного притяжения означало бы необходимость более медленного движения Земли, в противном случае она улетела бы далеко в космическое пространство. Таким образом, скорость движения Земли по орбите в точности соответствует значению для устойчивой орбиты вокруг звезды с массой в одну солнечную.

Точно так же Солнце и другие звезды движутся по орбитам вокруг центра нашей Галактики со скоростями, определяемыми ее массой. Если измерить скорость и определить размер орбиты, то можно вычислить массу, управляющую орбитой. Однако имеется одно затруднение. В Солнечной системе почти вся масса сосредоточена в Солнце – в центре системы, в то время как в галактике звезды распределены таким образом, что на большинство из них действует значительная сила притяжения со стороны массы, расположенной вне (в противоположность той, что находится внутри) их орбит. Это значит, что общую массу галактики можно определить лишь по скоростям звезд во внешних частях, для которых вся галактика находится внутри орбиты звезды. Астроном должен определить скорости звезд или другого вещества (обычно это возбужденный газ, так как его скорость легче всего измерить) на всем протяжении от центра до края в поисках точки, где значения скоростей становятся похожими на те, что соответствуют только внутренней массе. Это называется кеплеровской частью кривой, так как именно Кеплер нашел связь между скоростями

планет и расстояниями их до Солнца – открытие, приведшее Ньютона к открытию закона тяготения. Внутри кеплеровской части кривой скорости звезд увеличиваются по мере удаления от центра (рис. 20). Потом скорость выходит на постоянный уровень, после чего кривая вращения начинает падать. За точкой поворота все скорости кеплеровские и они должны дать величину массы галактики. Для большей точности астрономы подгоняют под весь набор скоростей, измеряемых при различных положениях, разные модели распределения массы в галактике, узнавая таким образом кое-что об этом распределении, а также значение общей массы.

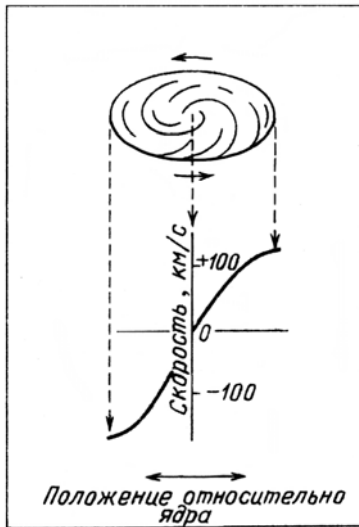


Рис. 20. Типичная кривая вращения галактики растет от нулевого значения в центре до скоростей в 100 км/с и более во внешних частях

В 60-е годы эти исследования велись весьма интенсивно. Астрономы определили массы многих галактик и нашли зависимость между светимостью галактики и ее массой и между хаббловским типом и массой. Обычно галактики типов Sa и Sb имели большие массы на единицу светимости, чем галактики других типов, то есть их звезды в среднем менее яркие, чем звезды в галактиках типа Sc и Igg. Для всех типов было впечатление, будто кривая вращения загибается вниз вблизи границы наблюдаемой области. Казалось, природа так построила галактики, чтобы мы как раз могли увидеть на самых внешних их звездах начало кеплеровского движения. Кривые хорошо согласовывались с моделями распределения массы, и распределение вещества в галактиках выглядело весьма разумным.

В 60-е годы эти исследования велись весьма интенсивно. Астрономы определили массы многих галактик и нашли зависимость между светимостью галактики и ее массой и между хаббловским типом и массой. Обычно галактики типов Sa и Sb имели большие массы на единицу светимости, чем галактики других типов, то есть их звезды в среднем менее яркие, чем звезды в галактиках типа Sc и Igg. Для всех типов было впечатление, будто кривая вращения загибается вниз вблизи границы наблюдаемой области. Казалось, природа так построила галактики, чтобы мы как раз могли увидеть на самых внешних их звездах начало кеплеровского движения. Кривые хорошо согласовывались с моделями распределения массы, и распределение вещества в галактиках выглядело весьма разумным.

ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ

Метод использования круговых орбитальных скоростей звезд не очень хорошо работает в галактиках, у которых звездные орбиты не лежат в одной плоскости. Например, в эллиптических галактиках есть звезды, движущиеся по орбитам вокруг центра во всех плоскостях, и эти орбиты часто имеют очень большой эксцентриситет (рис. 21). Плоский диск отсутствует, хотя имеется, по меньшей мере иногда, преимущественное направление медленного общего вращения. Единственный имеющийся способ определения массы такой галактики – это исследование наблюдаемого разброса скоростей звезд. Скорость, с которой облако звезд движется вокруг центра, как и скорости звезд с более круговыми орбитами, будет чувствительна к массе. Чем больше масса, тем больше средняя скорость звезд. Некоторые звезды будут двигаться к нам, другие – от нас, а некоторые поперек луча зрения, так что в спектре галактики будет наблюдаться разброс скоростей (рис. 22). Ширину этого разброса, называемую *дисперсией скоростей*, можно вместе с информацией о распределении звезд использовать для определения массы галактики.

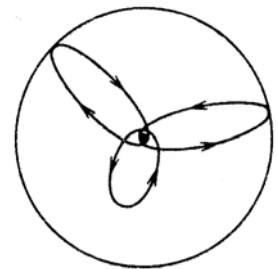


Рис. 21. Орбиты в эллиптической галактике могут быть сильно вытянуты

Для примера рассмотрим эллиптическую галактику М 32 – небольшой яркий спутник спиральной галактики М 31. Это одна из первых галактик, для которых масса была определена именно таким образом. Паломарский астроном Рудольф Минковский измерил в 1952 г. дисперсию скоростей звезд галактики, получив для ширины распределения скоростей значение 100 километров в секунду. Исходя из этой величины дисперсии скоростей в сочетании с размерами М 32 можно оценить, что общая масса галактики должна составлять около 2 миллиардов масс Солнца. Однако следует сделать предположение о сходстве звезд во всей галактике, позволяющем утверждать, что параметры, полученные по скоростям звезд вблизи центра, свойственны всем

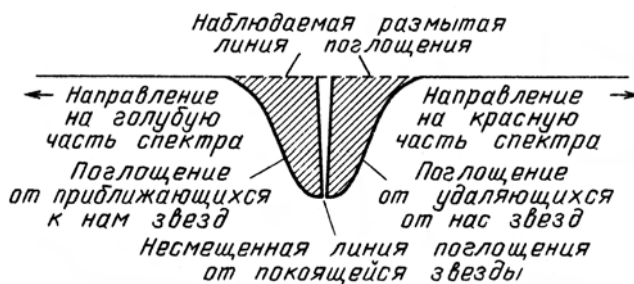


Рис. 22. Дисперсия скоростей в эллиптической галактике приводит из-за эффекта Доплера к размытию линий в спектре

звездам галактики. Делаются также другие предположения – такие, как малое значение скорости очень медленного общего вращения, но большинство из них относительно второстепенны по сравнению с трудностями наблюдений.

К сожалению, этот метод привел к разительным противоречиям между данными различных измерений. Например, результаты для М 32 находятся в пределах от исходных 100 км/с Минковского примерно до половины этого значения – в соответствии с результатами нескольких недавних измерений. Еще меньшее значение получается при применении того же метода к скоростям туманностей вместо скоростей звезд. Многие работы в последнее время сосредоточены на проблеме получения более точных дисперсий скоростей для эллиптических Галактик. Дисперсии скоростей пока измерены примерно для 50 из них и находятся в пределах от 50 до 400 км/с.

Как только методом дисперсий скоростей определена масса эллиптической галактики, полученный результат можно сравнить с ее светимостью, а это, в свою очередь, может кое-что рассказать нам о типе вещества, находящегося в галактике. Астрономы выражают отношение массы к светимости галактики в единицах отношения массы к светимости для Солнца – средней звезды. Таким образом, состоящая исключительно из Солнц галактика будет иметь отношение массы к светимости, в точности равное 1. Считалось, что у большинства спиральных галактик отношение массы к светимости имеет примерно такое же значение. С другой стороны, казалось, что соответствующая величина для эллиптических галактик находится в пределах от 5 до 10, что, по-видимому, говорило о наличии в них большого количества вещества, менее яркого по сравнению с Солнцем в расчете на единицу массы. Это можно было обеспечить большим числом слабых маломассивных звезд вроде красных карликов. При том, что для этих галактик дело может обстоять именно так, существуют другие возможности, в том числе одна весьма тревожная, которая будет рассмотрена далее в этой главе.

Метод дисперсии скоростей можно использовать и для того, чтобы узнать что-нибудь о звездах в центральных балджах спиральных галактик. Таким образом, нельзя ничего узнать о полной массе спиральной галактики, но можно исследовать отношение массы к светимости. Например, для М 31 центральная дисперсия скоростей оказалась равной около 160 км/с. Это приводит к отношению массы к светимости, очень похожему на значение для эллиптических галактик – около 10. Поэтому кажется разумным предположение о том, что звезды в балдже М 31 не сильно отличаются от звезд, населяющих М 32 и другие эллиптические галактики. Данные последующих наблюдений говорят о важных различиях, вызванных разной историей химической эволюции и звездообразования в этих галактиках, но это в основном незначительные эффекты. Обычно эллиптические галактики трудно отличить от центральных балджей спиральных галактик.

Что касается масс эллиптических галактик, то их интересной динамике следует уделить больше внимания. Выше было отмечено, что орбиты звезд очень вытянуты и распределены по всем направлениям без предпочтительной плоскости (последнее свойство называется *изотропностью*). До последнего времени астрономы считали, что совершенно круглые эллиптические галактики состоят из совершенно изотропно движущихся звезд без общего вращения и с совершенно сферическим распределением скоростей вблизи центра. С другой стороны, считалось, что более уплощенные на вид эллиптические галактики медленно вращаются и это вращение придало им форму летающей тарелки. Однако, к великому удивлению создателей моделей, первые измерения вращения в 70-х годах показали почти полное отсутствие вращения у многих сплюснутых эллиптических галактик. У некоторых наблюдается медленное постепенное вращательное движение, но нигде оно не было достаточным для объяснения уплощенной формы (рис. 23).

Одно из возможных объяснений этого удивительного результата состоит в том, что галактики – не сжатые эллипсоиды, а вытянутые. Вытянутая галактика по форме напоминает не тарелку, а сигару и ее форма не имеет никакого отношения к вращению в выделенной плоскости. Другая возможность заключается в том, что галактики все же сжатые, но их форма не является просто результатом вращения – это скорее некоторая смесь движений, существовавших при образовании галактики, и которые теперь проявляются в распределении орбит (несколько концентрирующихся к определенной плоскости). Если примерно одинаковое число звезд движется по часовой стрелке и в противоположном направлении, то галактика в целом не будет вращаться, хотя звезды будут

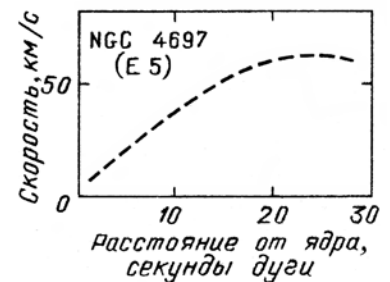


Рис. 23. Кривая вращения эллиптической галактики демонстрирует лишь слабое вращательное движение

обращаться с бешеной скоростью. Общая величина углового момента может быть огромной, но суммарный итог будет очень небольшим, так как звезды, вращающиеся в противоположных направлениях, нейтрализуют вклад друг друга. Какая из этих возможностей объясняет необычно медленное вращение эллиптических галактик, остается предметом дискуссии. Преподносимый нам урок состоит в том, что столь крупные объекты как галактики могут быть гораздо сложнее, чем они выглядят, даже если они кажутся ясными, простыми и бесструктурными.

ДВОЙНЫЕ ГАЛАКТИКИ

Другой метод определения масс галактик может быть применен к тем из них, что являются членами двойных систем (фото XXII). Две обращающиеся вокруг друг друга галактики должны подчиняться закону тяготения Ньютона, утверждающего зависимость размеров орбит и скоростей от масс галактик. Наблюдая всего одну двойную галактику, нельзя надеяться использовать этот факт, так как орбитальные периоды составляют миллионы и миллиарды лет – это слишком долго, чтобы ждать. К тому же галактики видны лишь с одного направления, так что нельзя определить угол наклона орбиты к лучу зрения. Но эти трудности преодолимы, если мы наблюдаем много двойных галактик и определяем их параметры статистически. Хотя мы не можем проследить ни одну данную пару на протяжении всей орбиты, можно пронаблюдать достаточно много двойных галактик, чтобы получить их средние массы.

Чтобы учесть очень большое различие размеров двух галактик при наблюдении двойной системы, астрономы вместо индивидуальных масс вычисляют средние значения отношений массы к светимости. Это позволяет компенсировать то обстоятельство, что более яркая галактика будет также и более массивной. Например, для двойной галактики, состоящей из эллиптической галактики очень высокой светимости и небольшой эллиптической галактики, можно принять одинаковые значения отношений массы к светимости, но их движение не будет одинаковым. Меньшая галактика будет двигаться вокруг общего центра масс быстро, а большая – медленно. Оценка средней массы будет примерно посередине и не будет характеризовать ни одну из галактик, но вычисленные для всей системы отношения массы к светимости позволят астроному определить индивидуальные массы каждой из галактик. На практике это следует проделать для многих пар эллиптических галактик – для учета разных углов наклона и форм орбит.

Результаты исследования пар галактик разных типов удивительны. Вместо того, чтобы получить отношения массы к светимости от 1 до 10 – это диапазон значений для отдельных галактик, исследованных при помощи упомянутых выше методов, – астрономы получили гораздо большие величины. Типичное значение для пар эллиптических галактик около 75, а пары спиральных галактик попадают в интервал от 20 до 40. Эти значения поставили получивших их людей в тупик и настолько отличались от ожидаемых, что были предприняты значительные усилия, чтобы установить, каким образом результаты могли исказиться. Может быть, в чем-то предположения были неверными? Возможно, галактики в парах по какой-то причине эволюционного характера существенно массивнее (для своей светимости), чем уединенные галактики. Или, быть может, статистический подход оказался в чем-то порочен? Из-за этих сомнений астрономы старались относиться к результатам, полученным по двойным галактикам, с осторожностью. Этого не следовало делать, а надо было перенести свои подозрения на более традиционные методы. Как будет видно из следующих разделов, имеющиеся данные говорят о том, что двойные галактики дают лучшие результаты, чем мы думали.

ГРУППЫ И СКОПЛЕНИЯ

Галактики обычно существуют в группах: они объединяются. Некоторые, вроде Млечного Пути, принадлежат к небольшим организациям наподобие Местной группы, в то время как другие являются членами огромных скоплений, содержащих тысячи галактик (фото XXIII). Во всех случаях это обстоятельство дает нам в руки еще один метод определения масс галактик. В скоплении каждая галактика движется в соответствии с силой притяжения со стороны других объектов. Насколько быстро они в среднем движутся, зависит от среднего расстояния между ними и от их масс. Ситуация аналогична ситуации с дисперсией скоростей звезд в галактике, но теперь мы рассматриваем движение отдельных галактик в скоплении. Если предположить, что скопления галактик устойчивы, то есть не охлопываются и не разлетаются, то движение отдельных членов и расстояния между ними должны дать оценку их масс.

Проблема с этим методом в том, что он тоже, как казалось, давал неправильный ответ. Когда в начале 60-х годов таким образом впервые были определены отношения массы к светимости, результаты оказались поразительными. Вместо значений около 1–10 были получены величины, равные сотням и даже тысячам. Как же этот метод может быть неправильным? Предложенные многочисленные гипотезы включали возможность расширения скоплений, их сжатия, возможность, что они состоят из аномально массивных галактик, что в скоплениях много двойных галактик (что ведет к большим значениям измеренных скоростей) или что между галактиками в скоплениях много межгалактического вещества – достаточно, чтобы затмить гравитационное поле самих галактик. Сейчас мы с большим доверием смотрим на результаты, полученные по скоплениям, чем сначала. Нет сомнения, что все перечисленные факторы играют некоторую роль, но главное объяснение совершенно иное. Галактики все время скрывали от нас ужасную тайну: они полны загадочным «темным веществом».

ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО

Знание приходит к нам разными путями, но самый волнующий известен под названием «прорыв». Он происходит после того, как ученые на некоторое время как бы «застревают» и понимают, что чего-то не хватает: какой-то важный фрагмент знания на пороге, но ускользает и остается не найденным. Исследование масс галактик прошло через подобную фазу, когда большинство астрономов чувствовало, что что-то в этой области науки не так, что какой-то важный факт ускользнул. Результаты измерений масс различными способами не согласовывались, и особенно острой была проблема для скоплений галактик. Эта область науки определенно нуждалась в прорыве.

Первым признаком надвигающегося прорыва было недавнее исследование нейтрального водорода в М 31. Когда был обнаружен и измерен газ на очень большом расстоянии от ядра, кривая вращения отказалась загнуться вниз и стать кеплеровской (рис. 24). Далеко за тем местом, где согласно оптическим данным был достигнут загиб кривой,

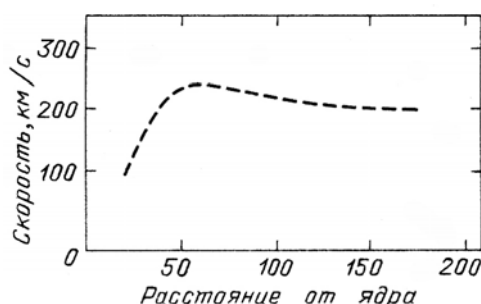


Рис. 24. Кривая вращения нейтрального водорода в М 31 не показывает падения скорости на больших расстояниях от центра. Сравните ее с оптической кривой вращения на рис. 37, ограниченной внутренними частями галактик. (Расстояние выражено в минутах дуги)

новые результаты для нейтрального водорода свидетельствовали о том, что скорость остается почти постоянной. Это возможно, только если большие массы находятся в далеких областях какого-то невидимого гало вокруг М 31 далеко за пределами видимых частей галактики. Были приняты во внимание все возможные типы объектов, которые могли объяснить эту массу. Предполагалось, что это могут быть очень тусклые красные звезды или газ, ионизованный таким образом, что его нельзя наблюдать как нейтральный водород. Но эти простые гипотезы, так же как и другие, включавшие все известные объекты, были опровергнуты разного рода точными наблюдениями. Масса не могла быть ничем простым.

Тем временем появились другие данные, свидетельствовавшие о распространенности подобных массивных гало из невидимого вещества у галактик. Более изощрен-

ные теоретические модели требовали наличия очень массивных гало для сохранения устойчивости наблюдаемой плоской части спиральных галактик. Утверждалось, что плоский компонент галактики разрушится, если не будет удерживаться преобладающим тяготением окружающей массы.

При наблюдении других галактик помимо М 31. Включая нашу собственную, стали обнаруживать, что кажущийся загиб кривой вращения был во многих случаях просто небольшой флуктуацией. К 80-м годам создалось впечатление, что нет галактик, масса которых заключена в видимом диске. Теперь обнаружено несколько галактик, демонстрирующих во внешних частях кеплеровскую кривую, но в большинстве случаев это не так. Большая часть оптических и радиокривых, по-видимому, сохраняет постоянную скорость вплоть до самой далекой доступной наблюдениям точки – даже при использовании для регистрации наиболее слабого излучения самого мощного современного оборудования. Редко большая часть вещества в галактиках располагается в пределах видимых изображений. Наоборот, основная часть массы галактики расположена за теми пределами, где, как нам кажется, она кончается.

Если у галактик действительно есть темные гало, то обсуждавшиеся выше противоречия можно понять. Метод кривой вращения дает лишь массу внутри пределов, ограниченных самой

внешней из точек, где проводились измерения, а метод дисперсии скоростей говорит нам только об отношении массы к светимости в центре, делая необходимой экстраполяцию на внешние области с использованием распределения яркости для определения полной массы. Ни один из этих методов не может обнаружить массивные невидимые гало. Но они обнаруживаются методом двойных галактик, так как галактики обращаются одна вокруг другой по орбитам, которые расположены в основном или полностью вне массивных гало отдельных членов. Аналогично метод скоплений тоже должен быть индикатором общей массы галактик.

В новом ходе развития событий прискорбно то, что если новые большие измеренные значения масс правильны, то при современных астрономических исследованиях большая часть Вселенной не наблюдается. Большая часть вещества в космосе заключена в какой-то неизвестной форме в массивных гало галактик и то, что мы наблюдаем как галактики, — всего лишь вершины очень больших айсбергов. Грандиозные спиральные галактики являются лишь скелетами огромных таинственных призраков, природа которых все еще остается неизвестной.

Для объяснения невидимого вещества в гало галактик было предложено много типов объектов. Когда физики впервые предположили, что у крошечной частицы под названием нейтрино может быть небольшая масса (до этого считалось, что масса покоя частицы равна нулю), кто-то тут же сказал, что гало могут состоять из нейтрино. При появлении сообщения об открытии физиками монополя (отдельного изолированного магнитного полюса) с ничтожно малой массой, кто-то сразу предположил, что гало могут состоять из монополей. При появлении других возможностей всегда, казалось, была надежда объяснить состав гало галактик. К сожалению, сейчас похоже, что нейтрино вообще не имеет массы, а единственный обнаруженный монополь мог быть ошибкой эксперимента, так что, вероятно, ни один из этих объектов не решит нашу проблему. Мы остались с весьма небольшим списком невероятных объектов, ни один из которых, похоже, нам не подходит. В этом списке есть все объекты, которые только можно придумать, имеющие массу и при этом невидимые в галактиках. Например, планеты вроде Земли, не сопровождаемые светящейся звездой, будут иметь массу и излучать при этом слишком мало света, чтобы быть обнаруженными. Подойдут также и более мелкие объекты — каменные глыбы или мелкие камешки. Проблема с подобными объектами в том, что никто не может придумать способ их производства в достаточном количестве. Можно довольно уверенно утверждать, что планета не может образоваться, если поблизости нет звезды, и то же верно для каменных глыб. Единственные достойные рассмотрения объекты — это черные дыры, массивные и ничего не излучающие, которые каким-то образом могут образовываться во внешних частях протогалактик. Но что бы это ни было — черные дыры, каменные глыбы или экзотические субатомные частицы — возможность того, что большая часть Вселенной от нас скрыта, вызывает озабоченность. Мы живем в обширном и подавляюще темном космическом облаке, лишь кое-где освещенном свечами.

Глава 6

МАГЕЛЛАНОВЫ ОБЛАКА

Облака Магеллана, хотя и невидимы на широтах значительно севернее экватора, были на протяжении столетий знакомы южным мореходам. Моряки XV века знали их под названием «Капские Облака» и считали полезными для навигации. К югу от экватора, где Полярная звезда все время находится под горизонтом и нельзя, найти яркой звезды для определения положения Южного полюса, Магеллановы Облака образуют с Южным полюсом почти равносторонний треугольник и таким образом служат грубым средством ориентации. Когда великий Фердинанд Магеллан осуществлял свое эпохальное кругосветное путешествие в 1518–1520 гг., во время которого он погиб на Филиппинах, использование Облаков для этой цели было обычным делом. Когда же корабль Магеллана вернулся в Европу, спутник Магеллана и официальный летописец путешествия Антонио Пигафетта предложил назвать Капские Облака Облаками Магеллана в качестве своеобразного увековечения его памяти.

В темную ясную ночь вдали от городских огней наблюдатель может увидеть Большое Магелланово Облако, растянувшееся на 5° , т. е. примерно в 10 раз больше видимого диаметра Луны, в то время как Малое Магелланово Облако имеет видимый поперечник 2° (фото XXIV и XXV). Это, разумеется, лишь самые яркие части Облаков. На полученных с высокой чувствительностью фото-

графиях Большое Магелланово Облако прослеживается до диаметра 10° , а Малое Облако – до 6° и больше.

Общий блеск двух Облаков, который из-за их большой протяженности и размытости довольно трудно измерить, очень велик. Если бы Большое Магелланово Облако (БМО) было сосредоточено в одной точке, то оно оказалось бы среди дюжины ярчайших звезд на небе. Малое Магелланово Облако (ММО) примерно в 4 раза слабее. Цвет обоих Облаков оказался весьма голубым из-за содержащегося в них большого числа очень ярких голубых звезд.

Магеллановы Облака являются довольно типичными представителями своего класса – неправильных галактик с неразвитой структурой. Каждое Облако имеет ярчайшую часть и множество разных нерегулярно распределенных небольших фрагментов примерно одинаковой яркости. В БМО преобладает яркая длинная линейная структура, напоминающая бары, наблюдаемые в пересеченных спиральных галактиках. У ММО вместо бара имеется центральное ядро в форме топора. Правилom является асимметрия.

Несмотря на неправильность, Магеллановы Облака не хаотичны. Оба Облака демонстрируют сравнительно хорошо организованные движения. В БМО, в частности, наблюдается регулярное вращательное движение, напоминающее движения в спиральных галактиках – таких, как Млечный Путь. Скорость вращения мала, что отражает малую общую массу галактики. Массы оцениваются примерно в 20 миллиардов солнечных для БМО и 5 миллиардов для ММО. Для сравнения, масса нашей Галактики оценивается в более чем 400 миллиардов масс Солнца. (Эти величины относятся к массам основных тел трех галактик – во всех случаях полная масса может сильно недооцениваться из-за большого количества невидимого вещества во внешних частях галактик.)

СКОПЛЕНИЯ

В одном лишь БМО около 6500 звездных скоплений, а в ММО – почти 2000. Этот богатый набор скоплений включает удивительное разнообразие объектов: от больших групп из миллионов звезд до тусклых крохотных агрегатов из дюжины слабых карликовых звезд (фото XXVI). В действительности Магеллановы Облака демонстрируют еще более широкую гамму скоплений, чем наш Млечный Путь, что вначале привело к путанице при отнесении скоплений к разным типам.

В нашей Галактике шаровые скопления обычно большие, очень старые и с пониженным содержанием тяжелых элементов, в то время как рассеянные скопления почти всегда небольшие, относительно молодые и по химическому составу похожи на Солнце. Диаметры шаровых скоплений свыше 100 световых лет, они, как правило, включают почти миллион звезд и выглядят как огромные яркие звездные рои, в то время как рассеянные скопления имеют диаметры всего от 2 до 10 световых лет, содержат самое большее несколько сотен звезд, и часто малозаметны, и поэтому обнаружить их нелегко.

Опираясь на скопления Млечного Пути, Харлоу Шепли сначала подразделил скопления Магеллановых Облаков на два типа. Некоторые явно были шаровыми, но большинство казалось маленькими бедными рассеянными скоплениями. Однако одно наблюдение даже в 20-е годы сбивало всех с толку. Энни Кэннон в Гарварде исследовала спектры нескольких шаровых скоплений из списка Шепли и обнаружила, что некоторые из них гораздо голубее шаровых скоплений в Млечном Пути. В те время этот факт ставил астрономов в тупик, так как еще не был понят процесс эволюции звезд, но сейчас мы знаем, что спектры этих скоплений указывали на наличие горячих молодых звезд.

Спустя десятилетия фотоэлектрические измерения цветов шаровых скоплений в Магеллановых Облаках преподнесли нам сюрпризы. Ярчайшие скопления, казалось, делятся на две группы: «нормальные» красные шаровые скопления и аномальные голубые шаровые скопления. После многих лет исследований астрономы сейчас признали в голубых шаровых скоплениях молодые скопления – большие и богатые, подобно шаровым скоплениям в Млечном Пути (фото XXVII). По возрасту их диапазон простирается от инфантильных объектов вроде гигантского скопления NGC 2100 (всего 20 миллионов лет) до скоплений среднего старшего возраста вроде NGC 1978 (около миллиарда лет – фото XXVIII).

Трудности определения возраста более старых красных скоплений не были преодолены до установки в 70-х годах в Южном полушарии телескопов с диаметром зеркала от 3,6 до 4 метров. Только тогда оказалось возможным увидеть слабые непроэволюционировавшие звезды, которые надо пронаблюдать для получения надежной оценки возраста скопления.

Красные скопления задали еще одну загадку. Когда для них были построены первые диаграммы цвет–светимость, оказалось, что детали некоторых диаграмм довольно необычны – последовательность звезд-гигантов у них менее крутая, чем обычно. Когда в 80-х годах стали внедрять высокоэффективные линейные приемники излучения вроде приборов с зарядовой связью (ПЗС), заменившие старые фотографические методы, ответ на загадку стал ясен. Многие из предполагавшихся нормальными шаровых скоплений на самом деле несколько моложе шаровых скоплений Млечного Пути, хотя и достаточно старые, чтобы выглядеть красными и немолодыми. Для таких хорошо изученных объектов как NGC 2231 в БМО и NGC 419 в ММО были получены возрасты в несколько миллиардов лет. Возрасты других скоплений все еще вычисляются (на обработку огромного объема данных, получаемого на современных больших телескопах при работе со скоплением из тысяч звезд с использованием высокоэффективных детекторов с высоким разрешением, уходят месяцы, а то и годы). Оказалось, что в Облаках обнаружено лишь небольшое число по-настоящему старых шаровых скоплений: в ММО одно – NGC 121, а в БМО около шести, хорошим представителем которых является NGC 2257. Большинство этих скоплений содержит переменные типа RR Лиры^{*)}, как и шаровые скопления Млечного Пути, и для их возрастов получены значения около 15 миллиардов лет – они почти ровесники Вселенной. Оставшиеся из примерно 40 больших красных скоплений, по-видимому, являются более молодыми объектами. В отличие от нашей Галактики Магеллановы Облака были способны порождать гигантские богатые скопления вплоть до настоящего времени. По до сих пор не до конца понятным причинам в Млечном Пути такие скопления перестали образовываться примерно 15 миллиардов лет назад и с тех пор наша Галактика в состоянии производить лишь небольшие скопления, которые в течение миллиарда лет и меньше разрываются на части приливными силами или другими разрушительными эффектами.

Скопления Облаков иллюстрируют драматические отличия этих двух неправильных галактик от нашей звездной системы. Магеллановы Облака представляют собой слабо связанные медленно вращающиеся системы малой массы, не заключенные в пределах тонкого плоского слоя и, вероятно, не имеющие больших сферических гало из старых звезд, как наш Млечный Путь. В этом более «вежливом» окружении звездные скопления могут возникать и процветать так, как это невозможно в напряженной приливными силами среде нашей гораздо более массивной Галактики.

Богатство и диапазон возрастов скоплений Магеллановых Облаков оказались очень полезными для теоретиков. Так как рассеянные скопления Млечного Пути довольно слабо населены, имея всего несколько (если таковые вообще имеются) звезд, проходящих последние стадии эволюции – стадию звезд-гигантов, то наши возможности сравнить теории звездной эволюции с реальными звездами ограничены отдельными участками диаграмм. С другой стороны, богатые скопления в Магеллановых Облаках дают много звезд на разных фазах стадии гигантов, которые расширяются, сжимаются и снова расширяются перед тем, как окончательно сколлапсировать, став невидимыми как белые карлики или нейтронные звезды. Таким образом, скопления в Облаках продемонстрировали нам то, что происходит в реальности, позволив сравнить теоретические расчеты с примерами, взятыми с натуры (рис. 25). Так как основные параметры – такие, как возрасты звезд, – выводятся из этих теоретических предсказаний, то очень важно проверить саму теорию. Мы хотим быть уверенными в том, что необходимые многочисленные предположения и приближения, входящие в подобную математическую теорию, не уведут нас с правильного пути. До сих пор сравнение с данными о скоплениях Магеллановых Облаков было для теории удивительно благоприятным.

Скопления Облаков дали нам важный ключ, который помог решить еще одну загадку. Как мы уже видели, в нашей Галактике имеется корреляция между возрастными скоплениями и химическим составом их звезд. Самые старые скопления – шаровые – имеют тенденцию состоять из звезд с

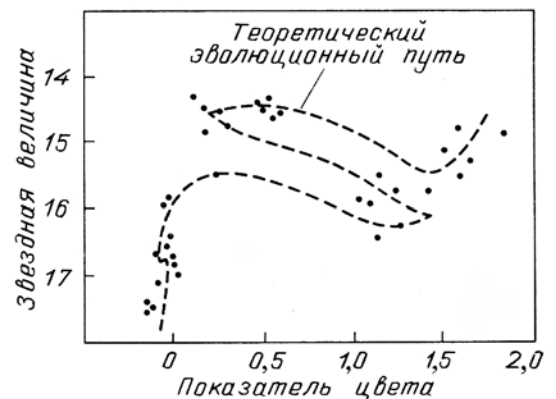


Рис. 25. Сравнение диаграммы цвет - величина для скопления БМО NGC 2164 с теоретическим эволюционным треком скопления с возрастом 50 миллионов лет

^{*)} Переменные типа RR Лиры представляют собой пульсирующие звезды с периодами изменения блеска в несколько десятых долей суток. Они обнаруживаются среди старых звезд населения II.

дефицитом элементов тяжелее водорода и гелия – таких, как кальций, железо и марганец. У более молодых звезд – например, звезд в рассеянных скоплениях вроде Плеяд, – доля этих элементов больше, их содержится примерно столько же, сколько на Солнце. Это считается результатом постепенного обогащения нашей Галактики тяжелыми элементами в ходе эволюции звезд: в стадии гиганта эволюционирующая звезда синтезирует в своем ядре углерод и, возможно, некоторое количество азота, в то время как очень массивные звезды взрываются как сверхновые, разрушаясь в течение короткого мига славы и светя при этом как миллиард нормальных солнц, синтезируют в небольших количествах более тяжелые элементы. Чем дольше живет галактика и чем больше было в ней сверхгигантов и сверхновых, тем больше тяжелых элементов разбросано в ее межзвездной среде. Тогда последующие поколения становятся все богаче и богаче тяжелыми элементами.

Обстановка в Облаках иная, и возникает вопрос, как это могло сказаться на истории их химической эволюции. Когда мы наблюдаем молодые объекты вроде областей НП или молодых звезд, то видим в их спектрах доказательства того, что современное содержание тяжелых элементов в Облаках меньше, чем на Солнце. В ММО их меньше примерно в пять, а в БМО – примерно в три раза. Так как есть возможность получить надежные возрасты для отдельных скоплений, то можно проследить, как это получилось. Вывод такой: похоже, что оба Облака «стартовали» примерно 15 миллиардов лет назад с таким же низким содержанием тяжелых элементов, как и у нашей Галактики в ту эпоху. Но в течение последующих лет тяжелые элементы в Облаках накапливались медленнее, что в конце концов привело к довольно низким современным значениям, которые, по-видимому, являются результатом скорости образования и разрушения звезд. Менее массивная галактика – ММО – медленнее перерабатывала звезды, в то время как более массивная – Млечный Путь – перерабатывала их быстрее всего. Экстраполируя, можно предположить, что еще менее массивные галактики, такие как GR 8 или IC 1613, должны иметь еще меньшие значения современного содержания тяжелых элементов, и в действительности все именно так и обстоит. Аналогичным образом, очень массивные галактики вроде ярчайших в скоплении в Деве должны быть необычно богатыми тяжелыми элементами – это тоже подтверждается имеющимися спектроскопическими данными.

Скопления Облаков также дали нам средство изучения истории недавней эволюции. Проследить историю галактики от ее образования до сегодняшнего дня нелегко, так как очень многое зависит от различных (гравитационных и других) сил, действующих в разных частях галактики. Нужно использовать методы, немного напоминающие археологию: начинаем с современности и копаем все глубже слой за слоем, чтобы посмотреть, появится ли структура, дающая ключ к истории жизни галактики.

Цель состоит в определении темпа звездообразования в различные эпохи в разных местах галактики. Один из способов заключается в наблюдении распределения звездных скоплений разных возрастов в Магеллановых Об-

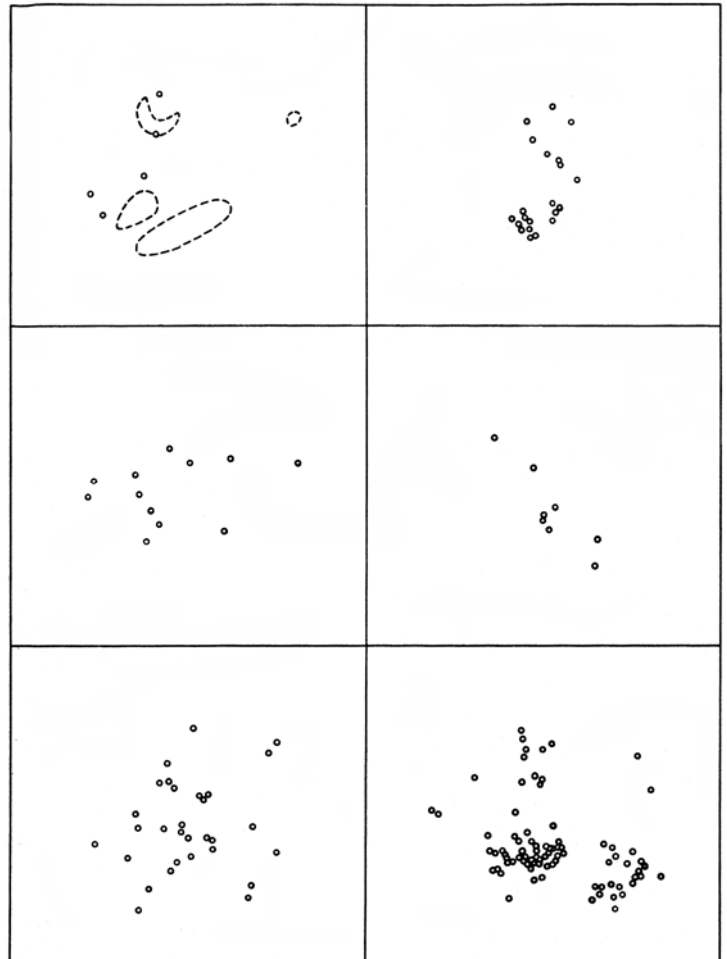


Рис. 26. Последовательность карт, изображающая места образования скоплений в БМО на протяжении его недавней истории. Начиная с левого верхнего рисунка, на котором изображены образующиеся в настоящее время скопления, карты изображают все более далекое прошлое с интервалом около 10 миллионов лет, так что нижний правый рисунок изображает места, где скопления образовывались около 50 миллионов лет назад

лаках. В БМО, например, образование скоплений, кажется, происходило спорадически и преимущественно группами при средней численности групп – около 25 скоплений, среднем диаметре группировок скоплений примерно 5 000 световых лет и средней продолжительности стадии повышенной интенсивности образования скоплений от 1 до 2 миллионов лет (рис. 26).

ЯРЧАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ

Большая часть нашей Галактики скрыта от нас. В видимой области спектра мы можем проникнуть в толстый покров пыли, пронизывающий Млечный Путь, в большинстве направлений лишь примерно на тысячу световых лет; затем поглощение и покраснение, вызванное действием пыли, закроет более далекие звезды. Поэтому Магеллановы Облака являются важным источником информации о редчайших типах звезд – слишком редких, чтобы их можно было в достаточном количестве наблюдать в нашей собственной системе.

Самые яркие звезды – это редко встречающиеся сверхгиганты, звезды со светимостью, в 100 000 раз превосходящей солнечную. Несколько таких экстремальных объектов было обнаружено в толще Млечного Пути, но у нас нет и намека на поголовную перепись. В Магеллановых Облаках, как бы специально растянувшихся у нас на виду для получения выборок, при гораздо меньшем количестве пыли, нам видны практически все сверхгиганты – можно изучать их самих, их историю, их замечательный облик и устанавливать среднюю продолжительность жизни. Можно исследовать эволюцию самых массивных звезд галактики и проверить возможность применения этих ярких объектов для оценки расстояний до гораздо более далеких галактик, где разрешаются только ярчайшие звезды (см. главу 10).

Современные исследования самых ярких сверхгигантов в Магеллановых Облаках начались в 50-х годах. Для установления членства в Облаках и свойств объектов этого класса собирались данные многочисленных фотоэлектрических наблюдений. Проблема членства нетривиальна. Звезды Облаков так редки, что их трудно выделить на фоне гораздо более многочисленных в этих интервалах видимых звездных величин звезд нашей Галактики, имеющих существенно меньшую светимость. Как могут астрономы определить, является ли данная яркая звезда сверхгигантом в Облаках или это просто звезда обычных размеров из переднего фона, случайно оказавшаяся перед Облаками? Первый ключ к ответу на этот вопрос был найден много лет назад в Гарварде, когда проведенные Анни Кэннон спектроскопические исследования звезд в направлении Облаков выявили наличие очень горячих молодых звезд – в том числе нескольких необычных звезд с оболочками расширяющегося газа (на это указывали спектроскопические профили). Оба типа звезд относятся к ярчайшим в наших окрестностях и обнаруживаются только внутри Млечного Пути или вблизи него и почти не попадают в таких удаленных от галактической плоскости участках неба, как тот, где расположены Облака. Следовательно, можно утверждать, что обнаруженные Кэннон звезды принадлежат Облакам и являются одними из ярчайших их членов. Применение этого метода теперь расширено и включает спектроскопические исследования с высокими дисперсиями, позволяющие непосредственно по ширине спектральных линий определять, является ли звезда сверхгигантом. Были измерены скорости сотен исследуемых звезд для того, чтобы исключить звезды, малые скорости которых указывали на то, что они близки к нам и не принадлежат к Облакам (скорости Облаков большие – 168 км/с у ММО и 276 км/с у БМО).

Ярчайшие звезды в Облаках на самом деле не самые горячие. Это звезды класса А с температурой около 10 000 К. Наиболее горячие звезды в видимом свете примерно в 10 раз слабее и большую часть энергии излучают на очень коротких волнах – это молодые голубые звезды классов О и В. Светимость самых холодных сверхгигантов с огромными протяженными оболочками разреженного газа примерно в два раза меньше светимости А-звезд. Самые массивные звезды галактики с массами от 20 до 100 масс Солнца проводят на стадии горячей звезды главной последовательности лишь часть своей короткой жизни перед тем, как расширяться и перейти в более холодную стадию сверхгиганта.

Проведенная в последнее время целенаправленная работа расширила наши знания о сверхгигантах Магеллановых Облаков. Группа французских астрономов применила остроумный метод с использованием расположенных перед телескопом в двух положениях объективных призм для отделения звезд Облаков от переднего фона по их лучевым скоростям. Этот метод может охватывать сотни кандидатов при помощи всего лишь одной пары экспозиций и в данном случае он увеличил число известных членов для каждого Облака до многих сотен звезд (фото XXIX).

Новое орудие для исследований появилось в 1978 г., когда специально оборудованный космический телескоп для изучения ультрафиолетового излучения – IUE (International Ultraviolet Explorer – Международный Ультрафиолетовый исследовательский спутник) – был впервые опробован на сверхгигантах в Магеллановых Облаках. Большая часть излучения горячих звезд поглощается земной атмосферой, так как приходится на ультрафиолетовую область спектра. Поэтому для регистрации основной части излучения звезд с очень высокой светимостью и температурой астрономы должны использовать инструменты на околоземной орбите, осуществляющие заатмосферные наблюдения звезд. Пристальное изучение ярчайших звезд Магеллановых Облаков в ультрафиолетовом диапазоне показало, что большинство их являются проэволюционировавшими сверхгигантами, которые сначала, будучи звездами главной последовательности, имели в два-три раза меньшую светимость в видимой области спектра. Эти звезды демонстрируют признаки выброшенного с поверхности газа, но они не столь выражены, как у звезд в Млечном Пути. Это указывает на более медленную постепенную потерю вещества в ходе эволюции сверхгигантов в Облаках, что, возможно, связано с отличием их химического состава.

ЦЕФЕИДЫ

Исторически важнейшую роль Магеллановы Облака сыграли, когда в них была открыта и исследована зависимость между светимостью и периодом у некоторых переменных звезд, блеск которых меняется со временем. В каждом из Облаков найдено свыше 2000 переменных звезд (фото XXX), большинство которых относится к так называемому типу *цефеид* – это сравнительно яркие желтые звезды с правильными изменениями блеска на протяжении примерно нескольких дней. Вслед за первыми открытиями этих звезд в начале двадцатого века Генриеттой Ливитт их изучением занялись другие гарвардские астрономы – в особенности Шепли, подчеркивавший их значение при определении расстояний и получивший зависимость период – светимость для цефеид в Облаках. По мере накопления данных об этих звездах уточнялась форма зависимости период – светимость (рис. 27), и недавно она была определена по данным фотоэлектрических наблюдений на разных длинах волн (рис. 28). Именно такого рода данные служат основой для построения шкалы расстояний во Вселенной (глава 10). Будучи ближайшими галактиками, Магеллановы Облака являются первым жизненно важным шагом в этой работе.

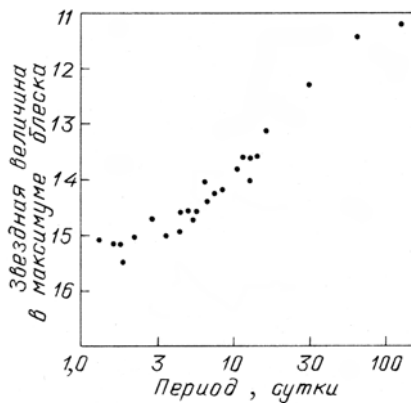


Рис. 27. Зависимость период – светимость для цефеид в Малом Магеллановом Облаке, построенная открывшей ее Генриеттой Ливитт. По вертикальной оси отложена видимая звездная величина в максимуме блеска, а по горизонтальной – период в сутках

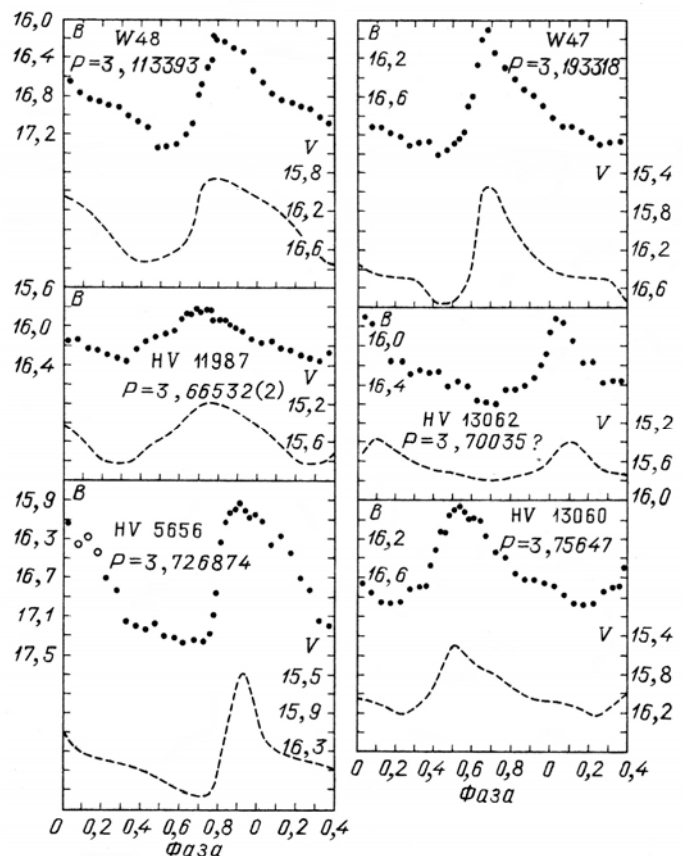


Рис. 28 (справа). Кривые блеска шести цефеид в Большом Магеллановом Облаке, полученные в двух цветах. Нижняя кривая на каждом графике изображает изменение блеска звезды в желтом (обозначаемом буквой *V*) диапазоне спектра, а верхняя – в синем (обозначаемом буквой *B*)

ОГРОМНЫЕ ОБЛАКА ИЗЛУЧАЮЩЕГО ГАЗА

Одной из наиболее заметных деталей почти на любой фотографии Большого Магелланового Облака является яркий расплывающийся на вид объект, расположенный к западу от центра основного звездного бара. Это одно из самых массивных и ярких известных горячих облаков газа (областей НII) во Вселенной. Оно известно под популярным названием Туманность Тарантул, а его официальное название – 30 Золотой Рыбы (фото XXXI). Подсвечиваемая расположенным внутри плотным скоплением горячих звезд, Туманность Тарантул излучает как тысячи звезд. Будучи по природе похожей на Большую Туманность Ориона в Млечном Пути, туманность в БМО гораздо больше и имеет несравненно более высокую светимость. При том, что Туманность Ориона имеет в поперечнике около 40 световых лет, 30 Золотой Рыбы простирается на тысячу световых лет. Если бы она находилась в нашей Галактике на расстоянии Туманности Ориона, она заняла бы все созвездие и ее света было бы достаточно, чтобы отбрасывать на Земле тени. В окрестностях Солнца нет таких огромных объектов, и области НII, приближающиеся по размерам к Туманности Тарантул, обнаружены только в ходе радионаблюдений и то лишь на больших расстояниях – они глубоко «спрятаны» в Млечном Пути.

Полная масса газа в 30 Золотой Рыбы составляет около 5 миллионов масс Солнца. Она включает видимый светящийся газ и окружающую массу нейтрального газа, регистрируемого только в радиодиапазоне. Оптическая структура туманности удивительно сложная со взаимно переплетенными петлями и кольцами, простирающимися за пределами яркого ядра. Некоторые из этих образований, вероятно, являются результатом взрывов сверхновых, а другие, по-видимому, образованы сильным звездным ветром в газе, выброшенном звездами высокой светимости. В центре богатого скопления горячих сверхгигантов в ядре 30 Золотой Рыбы (фото XXXII) расположен замечательный чудовищно яркий объект R 136a. Об этой звезде (или звездах) в настоящее время существуют противоречивые мнения. Астрономы исследовали ее спектр при помощи телескопа на спутнике IUE, а также при помощи обычных оптических телескопов, и некоторые ученые пришли к выводу, что это одиночная чрезвычайно массивная звезда с массой, быть может, около 2000 солнечных. Другие указывают на оптические данные, включая данные оптической спекл-интерферометрии, свидетельствующие в пользу кратности звезды – она, возможно, состоит из восьми близко расположенных звезд, самые большие из которых имеют массы около 400 солнечных. До сих пор теоретики, рассчитывавшие строение звезд, утверждали, что устойчивая звезда с массой более 100 масс Солнца существовать не может, так что в любом из двух случаев R 136a является в высшей степени достойным внимания объектом. Природа, кажется, снова говорит, что наше воображение слишком ограничено: разрабатываемые нами схемы редко бывают так грандиозны, как созданные природой.

В БМО имеются еще тысячи других светящихся облаков, а в ММО в каталоги занесены сотни таких объектов. Хотя они не столь внушительны, как 30 Золотой Рыбы, структура многих из них помогает астрономам лучше понять динамику газовых облаков при различных внешних условиях.

Ярчайшей областью НII в ММО является NGC 346 – гигантское газовое облако, погруженное в необычно богатую ассоциацию ярких звезд. Это согласуется с теорией, согласно которой звезды обычно образуются в таких газовых облаках: ассоциация очень молодая, только что родилась и еще осталось достаточно газа для образования других звезд. Области НII в Облаках дают также некоторую информацию о химическом составе межзвездной среды. По сравнению с газом в Млечном Пути (например, Туманностью Ориона) области газа в Облаках менее богаты тяжелыми элементами. Даже гелия в них заметно меньше, что, вероятно, является следствием меньшего числа поколений звезд в Магеллановых Облаках. В то время как в окрестностях Солнца любой данный атом (такой, как один из атомов в этой странице или в вашем теле) побывал в среднем в разное время внутри трех различных звезд, типичный атом в Магеллановых Облаках имеет менее интересное прошлое. Быть может, у него было лишь одно предыдущее внутризвездное воплощение.

ДИЛЕММА, СВЯЗАННАЯ С ПЫЛЬЮ

Так как пыль состоит в основном из тяжелых элементов, то можно предположить, что в Магеллановых Облаках ее меньше, чем в нашей Галактике, что, по-видимому, соответствует истине. Каталоги содержат около 50 дискретных «темных туманностей» (так их часто называют) для каждого из Облаков, и они, судя по всему, имеют обычные параметры, свойственные пылевым облакам в Млечном Пути. Однако число дискретных облаков пыли в Магеллановых Облаках меньше,

чем можно предположить исходя из выборки вблизи Солнца, и общее содержание пыли в обоих Облаках явно аномально низкое. Для ММО мы имеем подсчеты галактик заднего фона (рис. 29), степень затенения которых указывает на протяженность и количество межзвездной пыли в галактике. Для сравнения содержания пыли в разных галактиках астрономы часто говорят об отношении пыли к газу (для нормировки). Отношение пыли к газу для ММО оказывается более чем в три раза ниже, чем для Млечного Пути.

Этот вывод получил недавно подтверждение в ряде радионаблюдений монооксида углерода (CO) в Малом Облаке. В нашей Галактике моноокись углерода встречается в гигантских молекулярных комплексах, хорошо заметных в оптическом диапазоне из-за большого содержания в них пыли (это, по крайней мере, верно для тех из них, которые видны именно в оптическом диапазоне – большинство комплексов слишком глубоко погружено в галактическую пыль, чтобы их можно было обнаружить в видимом свете). Излучение CO в ММО очень слабое: сейчас, когда пишутся эти строки, все еще не решен вопрос о его обнаружении. Голландские астрономы сообщают о том, что они нашли области CO в ярком ядре Облака, в то время как группа астрономов из Колумбийского и Чилийского университетов зарегистрировала лишь очень слабые сигналы CO от нескольких облаков пыли, занесенных в оптические каталоги.

Оптические исследования БМО говорят о большем содержании в нем пыли, но все же оно нигде не достигает уровня нашей Галактики. Здесь также найдены облака монооксида углерода, особенно в областях интенсивного продолжающегося звездообразования, где имеется пыль. Ярчайшие звезды и цефеиды БМО, по-видимому, испытали лишь небольшое покраснение – главным образом из-за расположенной перед ними пыли нашей Галактики. Несколько звезд подвергаются примерно 50% -ному поглощению – главным образом в областях вблизи центра Облака, где заметны также облака пыли. Однако сквозь БМО просвечивает мало галактик. Сквозь толстый покров вещества БМО проглядывает одна яркая спиральная галактика – NGC 1809, но мало других. В будущем было бы полезно провести исследование, чтобы установить, почему покраснение ярких звезд столь невелико, а галактики заднего фона почти полностью закрыты. Быть может, в БМО за всеми промеренными звездами находится слой пыли? Или далекие галактики трудно различимы из-за наличия перед ними плотного слоя слабых звезд Магелланова Облака? Это один из остающихся без ответа вопросов, поставленных Облаками Магеллана.

ОБЩАЯ ОБОЛОЧКА

Горячие светящиеся облака водорода – очень заметные в оптическом диапазоне детали Магеллановых Облаков. Но если бы у нас были «длинноволновые» глаза, «настроенные» на длину волны излучения холодного нейтрального водорода – 21 сантиметр, то мы увидели бы еще более яркое зрелище. Радиотелескопы обнаружили, что обе галактики, несмотря на небольшие общие массы Облаков, демонстрируют излучение HI в области громадных размеров и его распределение имеет очень сложную структуру. Подобно тому, как это имеет место у других неправильных галактик, у Облаков необычно большая часть массы – вероятно, более 10% у обеих галактик – находится в форме нейтрального водорода. Это кажется разумным, если учесть меньшую эффективность звездообразования в Магеллановых Облаках. По этой причине осталось больше сырья для звездообразования.

Проводившие в 50-е годы пионерские исследования австралийские радиоастрономы обнаружили, что на длине волны 21 см Магеллановы Облака в действительности представляют собой единый объект. Огромная оболочка водорода на своем громадном протяжении охватывает оба Облака. БМО представляет собой сложный очень сильно структурированный компонент на восточной стороне оболочки, а ММО образует необычную двугорбую концентрацию на западе. Мостом между ними служит разреженный газ, в котором наблюдается мало звезд. Не так давно австралий-

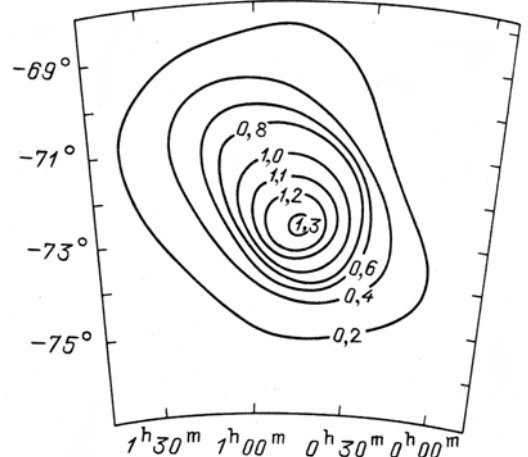


Рис. 29. Распределение пыли в ММО, полученное по подсчетам галактик заднего фона. Числа на диаграмме – поглощение в звездных величинах

ские астрономы сделали еще более удивительное открытие. По небу проходит огромное тонкое газовое волокно, которое начинается в Облаках и доходит почти до противоположных им точек небесной сферы (антиподов). Эта полоса газа, названная Магеллановым потоком, по-видимому, соединяет несколько других очень маломассивных галактик. Согласно наиболее разумному объяснению, поток – это приливной хвост или мост, вытянутый из Облаков в далеком прошлом во время их близкого прохождения около Млечного Пути. Моделирование таких прохождений на ЭВМ говорит о том, что Облака примерно 2 миллиарда лет назад пересекли внешние части нашей Галактики и это было почти катастрофическим событием. Современные расстояния и скорости Облаков, а также параметры Магелланова потока хорошо согласуются с этой моделью. Были ли другие столкновения, более ранние, чем это, остается загадкой, так же как и вопрос о том, когда, через сколько миллиардов лет Магеллановы Облака снова сильно приблизятся к нашей Галактике.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В заключение расскажем о том, как используются Магеллановы Облака в качестве важного полигона для двух поразительных современных открытий. Источники рентгеновского излучения существуют во всех областях нашей Галактики, но в большинстве своем они слабые и для соответствующих им оптических источников не всегда легко получить отождествление и расстояния. В Магеллановых Облаках найдено несколько ярких рентгеновских источников и, разумеется, для них всех известны расстояния – они равны расстояниям до Облаков. Таким образом можно надежно определить оптические параметры источников. Это особенно важно для тех из них, которые являются двойными звездами: если установлено, что масса рентгеновской звезды велика – порядка 10 масс Солнца, то это, вероятно, черная дыра, а если масса составляет около двух солнечных, то это, судя по всему, «просто» нейтронная звезда. Для надежного определения масс надо знать расстояния. Много лет назад было установлено, что источник SMC-X-1 представляет собой двойную звезду, один из компонентов которой – нейтронная звезда. В 1983 г. нашли, что LMC-X-4 слишком массивен для столь «обычного» экзотического объекта, и ученые пришли к выводу, что он должен содержать массивную черную дыру. Рентгеновское излучение испускается потоком газа, который неумолимо втягивается в черную дыру, чтобы навсегда исчезнуть из нашей Вселенной. Пока что LMC-X-4 является наилучшим из всех кандидатов в черные дыры – еще один пример того, как Облака Магеллана показывают нам дорогу в ночи.

Глава 7

МЕСТНАЯ ГРУППА

По мере развития исследований ближайшего внегалактического пространства в 20-х годах нашего века было установлено, что галактики простираются до пределов видимости всех наших телескопов, но расположены в пространстве неравномерно. Многие галактики, быть может даже большинство, существуют группами или в скоплениях, и наша явно не исключение. Гигантская спиральная галактика Млечный Путь (она похожа на галактику, изображенную на фото XXXIII) находится вместе с двумя очень близкими соседями – расположенными на расстоянии менее 200 000 световых лет Магеллановыми Облаками – в составе очень тесной группы. Другая спиральная галактика М 31 (Туманность Андромеды) вместе с несколькими менее крупными спутниками и спиральной соседкой М 33 оказалась примерно в 10 раз дальше. На сравнимом, но несколько меньшем расстоянии находятся две небольшие неправильные галактики – NGC 6822 и IC 1613. В общем мы оказались окруженными довольно свободной и изолированной в пространстве группировкой при отсутствии поблизости других ярких галактик. По-видимому, ближайшие объекты вне нашего компактного семейства находятся довольно далеко – на расстоянии в несколько миллионов световых лет.

ЧЛЕНЫ МЕСТНОЙ ГРУППЫ

По мере появления новых возможностей астрономы обнаруживали все новые и новые члены нашей Местной группы. Были найдены два далеких спутника М 31 – слабые галактики NGC 147 и NGC 185 (фото XXXIV). Обнаружены карликовые объекты, похожие на NGC 6822, но еще мень-

ших размеров и менее населенные. Одна за другой, начиная с 1938 г., когда была обнаружена галактика в Скульпторе, были открыты семь очень слабых крохотных галактик. Население нашего скопления постепенно возрастало и сейчас нам известно около 20 членов Местной группы.

Каким образом была установлена близость этих объектов? Это не всегда просто. В гигантских галактиках вроде М 31 искали переменные звезды – цефеиды, после чего для определения расстояния к ним применялась зависимость период–светимость. Но для галактик других типов этот метод не годится. Например, в NGC 147, о которой нам известно, что она находится примерно так же близко от нас, как М 31, из-за неподходящего состава звездного населения нет цефеид: все ее звезды старые и цефеид среди них не бывает. Поскольку цефеиды представляют собой короткую стадию эволюции массивных звезд с небольшим временем жизни (меньше 100 миллионов лет), можно надеяться найти их лишь в тех галактиках, где в течение последних 100 миллионов лет происходило звездообразование. В NGC 147 явно имел место лишь один этап звездообразования, завершившийся примерно несколько миллиардов лет назад. Поэтому цефеид там нет, и для определения расстояния до галактики и принадлежности ее к Местной группе следует использовать другие способы.

Проблемы расстояния до этой галактики, до ее спутника NGC 185, а также до двух расположенных поблизости от М 31 галактик NGC 205 и М 32 была решена в 1944 г. Вальтером Бааде. Он установил, что слабые галактики вроде NGC 147 являются объектами населения II – по звездному составу они похожи на шаровые скопления Млечного Пути. Задолго до этого Шепли показал, что ярчайшие звезды шаровых скоплений имеют примерно одинаковую светимость и могут быть использованы для получения довольно неплохих расстояний, и Бааде приступил к применению этого метода к галактикам с населением II, предполагая, что все ярчайшие звезды населения II похожи друг на друга. Это привело Бааде к выводу о том, что все четыре слабые галактики – NGC 147, NGC 185, NGC 205 и М 32 являются членами Местной группы системы и расположены примерно на таком же расстоянии от нас, как М 31.

В связи с некоторыми другими кандидатами в члены нашего скопления возникает проблема иного рода. Небольшие неправильные галактики, истинные размеры которых меньше размеров Магеллановых Облаков или даже NGC 6822, могут несмотря на наличие в них молодых звезд состоять из слишком малого числа звезд, чтобы среди них оказались цефеиды. Так как стадия цефеиды в жизни звезды очень коротка и продолжается всего несколько десятков или сотен тысяч лет, вполне может случиться, что мы видим галактику в то время, когда ни одна из звезд не является цефеидой. В этом случае исследование звезд галактики не дает хорошего критерия определения расстояния. Почему мы не видим цефеиды – потому ли, что галактика очень маленькая и недостаточно населенная или потому, что она хотя и большая, но расположена далеко, так что цефеиды слишком слабы, чтобы быть обнаруженными? На протяжении десятков лет нельзя было найти ответ на этот вопрос для примерно полудюжины слабых галактик.

Рассмотрим конкретный пример – галактику под названием GR 8, имеющую вид следа ноги (фото XXXV). Впервые она была занесена в каталог на Ликской обсерватории в 1959 г. Объект номер 8 выглядел крохотной кляксой неправильной формы среди многочисленных слабых изображений, считавшихся карликовыми галактиками в скоплении в Деве, расположенном на расстоянии 50 миллионов световых лет. Однако, спустя несколько лет, когда другой астроном на Ликской обсерватории начал исследовать карликовые галактики в Деве на 120-дюймовом телескопе, он был поражен, обнаружив, что может различать глазом ярчайшие звезды в GR 8. Этот объект явно не мог находиться на расстоянии скопления в Деве. Чтобы отдельные звезды были видны визуально без применения фотографических пластинок с длительными экспозициями или каких-либо других высокочувствительных детекторов, они должны быть очень близкими. В большие телескопы можно визуально различать отдельные звезды в М 31, М 33, NGC 6822 и Магеллановых Облаках, но никак не в расположенных несколько дальше ярких галактиках вроде М 81 или Туманности Водоворот (М 51). Поэтому астроном решил, что GR 8 может оказаться достаточно близкой галактикой, чтобы быть членом Местной группы. По крайней мере, если исходить из грубого критерия ярчайших звезд, она должна быть близка к границе нашего скопления. В дальнейшем на многих пластинках GR 8 велись поиски цефеид, но ни одной не было найдено. Крохотные размеры и отсутствие большого количества нестеленного вещества говорили о том, что, вероятно, галактика слишком мала для того, чтобы в данный случайный момент времени в ней оказались цефеиды.

Когда измерили скорость движения GR 8 относительно Млечного Пути, вопрос о ее членстве был решен. GR 8 и несколько других небольших объектов с неизвестными расстояниями движутся

так, как должны двигаться объекты, действительно связанные с нашим семейством галактик. С другой стороны, другие карликовые галактики, хотя и довольно близкие, движутся прочь от Местной группы со скоростью общего космического расширения (глава 10) и поэтому не принадлежат к Местной группе. Список галактик, являющихся на этом основании действительными членами группы, приведен в таблице.

Местная группа (галактики в порядке убывания светимости)

Название галактики и тип	Положение на небе		Видимая звездная величина	Расстояние (миллионы световых лет)	Абсолютная звездная величина
	прямое восхождение	склонение			
М 31 (NGC 224) (Sb)	00 ^h 40 ^m	+41°	4,4 ^m	2,2	−21,6
Млечный Путь (Sbc)	17 42	−28		0,03	−20,6
М 33 (NGC 598) (Sc)	01 31	+30	6,3	2,5	−19,1
Большое Магелланово Облако (Irr)	05 24	−69	0,6	0,2	−18,4
Малое Магелланово Облако (Im)	00 51	−73	2,8	0,3	−17,0
IC 10 (Im)	00 17	+59	11,7	4,0	−16,2
NGC 205 (E5pec.)	00 37	+41	8,6	2,2	−15,7
М 32 (NGC 221) (E2)	00 40	+40	9,0	2,2	−15,5
NGC 6822 (Irr)	19 42	−14	9,3	1,8	−15,1
WLM (Irr)	23 59	−15	11,3	2,0	−15,0
IC 5152 (Sd)	21 59	−51	11,7	2,0	−14,6
NGC 185 (E3pec.)	00 36	+48	10,1	2,2	−14,6
IC 1613 (Irr)	01 02	+01	10,0	2,5	−14,5
NGC 147 (E5)	00 30	+48	10,4	2,2	−14,4
Лев А (Irr)	09 56	+30	12,7	5,0	−13,5
Пегас (Irr)	23 26	+14	12,4	5,0	−13,4
Печь (E3)	02 37	−34	8,5	0,5	−12,9
GR 8 (Irr)	12 56	+14	14,6	4,0	−11,0
DDO 210 (Irr)	20 44	−13	15,3	3,0	−11,0
Стрелец (Irr)	19 27	−17	15,6	4,0	−10,6
Скульптор (E3)	00 57	−33	9,1	0,3	−10,6
Андромеда I (E3)	00 43	+37	14,0	2,2	−10,6
Андромеда III (E5)	00 32	+36	14,0	2,2	−10,6
Андромеда II (E2)	01 13	+33	14,0	2,2	−10,6
Рыбы (LGS 3) (Irr)	01 01	+21	15,5	3,0	−9,7
Лев I (E3)	10 05	+12	11,8	0,6	−9,6
Лев II (E0)	11 10	+22	12,3	0,6	−9,2
Малая Медведица (E5)	15 08	+67	11,6	0,3	−8,2
Дракон (E3)	17 19	+57	12,0	0,3	−8,0
Киль (E4)	06 40	−50	(>13,0)	0,3	−5,5

За исключением нескольких карликовых объектов, расположенных сразу за границей Местной группы, в окружающем пространстве галактик почти нет. Поперечник Местной группы составляет около 3 миллионов световых лет, в то время как ближайшие группы расположены на расстояниях от 10 до 15 миллионов световых лет. Таким образом, мы живем среди небольшого сообщества галактик, окруженного редко заселенной пустынной местностью.

КАРЛИКОВЫЕ НЕПРАВИЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ

Поскольку это наше непосредственное семейство, желательно потратить некоторое время на знакомство с членами Местной группы. Наши ближайшие спутники Магеллановы Облака имеют достаточно большое значение, чтобы отвести им отдельную главу. Что касается остальных галактик, то здесь мы дадим их обзор по типам. Сначала рассмотрим фрагментарные карликовые галактики,

тики неправильной формы, потом перейдем к еще менее заметному классу карликовых эллиптических галактик. Спиральные галактики также оставим до другой главы.

NGC 6822. Ярчайшей карликовой неправильной галактикой является NGC 6822, известная также под названием галактики Барнарда. Много лет назад исследованная Хабблом, NGC 6822 была предметом его первой статьи о близких галактиках и в этом смысле может считаться первой галактикой, для которой было установлено, что она находится за пределами Млечного Пути. Недавние работы расширили рамки исследований Хаббла. Заново изученные цефеиды дали новую диаграмму период – светимость и улучшенную оценку расстояния – 1,8 миллионов световых лет. Среди ярчайших звезд галактики много молодых голубых звезд и имеется значительное население проэволюционировавших звезд-гигантов.

Ярчайшие звезды не самые горячие, но имеют температуру около 20 000 К. Их светимость не так велика, как у самых ярких звезд Магеллановых Облаков, – вероятно, это результат меньшей общей численности населения галактики. Однако светимость красных сверхгигантов примерно такая же, как и в Магеллановых Облаках. Это потому, что звезды разных масс, эволюционируя, превращаются в красные сверхгиганты с примерно одинаковой максимальной светимостью.

В NGC 6822 имеются примерно 16 ярких звездных ассоциаций со средним диаметром около 500 световых лет (фото XXXVI и рис. 30). Имеются также звездные скопления; пока их обнаружено 30 – от очень молодых до объектов с возрастом не менее миллиарда лет. Не найдено ни одного шарового скопления, хотя одно или два из найденных Хабблом скоплений могут быть достаточно старыми для отнесения к этому типу. Их размеры малы, но при этом гораздо больше, чем у других скоплений и по яркости они тоже превосходят остальные скопления. При малой общей численности населения в NGC 6822 в ней не следует ожидать гигантских шаровых скоплений: в конце концов в ММО всего одно или два настоящих шаровых скопления.

Среди наиболее молодых объектов в галактиках области III часто самые заметные. Это верно и для NGC 6822, ярчайшие газовые облака которой были единственными объектами, которые удалось обнаружить первым наблюдателям. Хаббл нашел пять облаков, а последующие поисковые работы выявили гораздо больше: сейчас известно около 40 облаков и, вероятно, существуют и другие. Самые крупные и яркие из них представляют собой комплексы газа и молодых звезд с красивой структурой; они меньше 30 Золотой Рыбы по размерам и не похожи на нее по строению, но достаточно ярки для подробных спектроскопических исследований. Используя этот метод, астрономы Университета Мехико, в частности, установили, что содержание гелия и всех обнаруженных тяжелых элементов в NGC 6822 меньше, чем в нашей Галактике и в Магеллановых Облаках.

В 1980 г. два астронома из Университета Райе открыли в NGC 6822 несколько объектов, которые могут быть планетарными туманностями^{*)}. Проанализировав спектр одной из этих туманностей на Межамериканской обсерватории Серро Тололо в Чили, они получили для нее высокую температуру (около 18 000 К) и аномально большое содержание азота. Отношение азота к кислороду много говорит о масштабах происходившего в галактике процесса переработки ядерного горючего. Если это отношение мало, то звездная эволюция была менее интенсивной. У NGC 6822 одно из самых низких отношений азота к кислороду. Однако, как показывают исследования планетарных туманностей, со временем эволюция увеличивает содержание азота. Богатый азотом газ выбрасывается с умирающей звезды и постепенно покидает ее окрестности, смешиваясь с межзвездным газом. Следовательно, новые области III и образующиеся из них звезды будут иметь более высокое содержание азота.

С помощью радиотелескопов в NGC 6822 исследовался нейтральный газ. Этот газ изучался не так подробно, как газ, излучающий в видимой области спектра, – главным образом из-за помех со стороны расположенного поблизости водорода нашей собственной Галактики. Была обнаружена

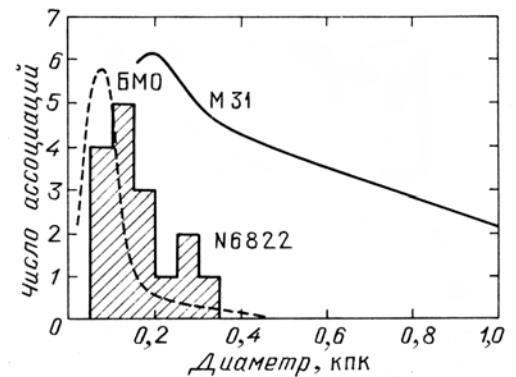


Рис. 30. Размеры звездных ассоциаций в NGC 6822 в сравнении с размерами ассоциаций в других галактиках. По вертикальной оси отложено число ассоциаций в данном интервале размеров

^{*)} Планетарные туманности представляют собой небольшие газовые сферы, окружающие сильно проэволюционировавшие звезды. Они состоят из сброшенных внешних газовых оболочек умирающей звезды.

громадная оболочка разреженного медленно вращающегося газа, протянувшаяся далеко за пределы оптически видимой части NGC 6822. Внутри нее расположена яркая пятнистая газовая структура, совпадающая с оптическим ядром галактики. Высокие концентрации газа встречаются главным образом там, где находятся яркие звездные ОБ-ассоциации. Например, туманность Хаббл X в ядре звездной ассоциации A13 совпадает с гигантским облаком нейтрального водорода, содержащим около 2 миллионов масс Солнца. На картах HI хорошо заметно вращение ядра галактики: скорость меняется довольно постепенно с северо-запада к юго-востоку в диапазоне 75 км/с. Полученная по результатам этих исследований полная масса составляет 1,4 миллиарда масс Солнца, что включает все вещество внутри радиуса 8,5 тысяч световых лет. Оптическая структура NGC 6822 довольно простая и качественно описана Хабблом. Имеется вертикальное барообразное ядро, пересеченное сверху молодыми объектами (областями НII, звездными ассоциациями и нейтральным газом HI), объект в целом имеет форму буквы Т. Менее заметен хвост вещества, вытянутого в

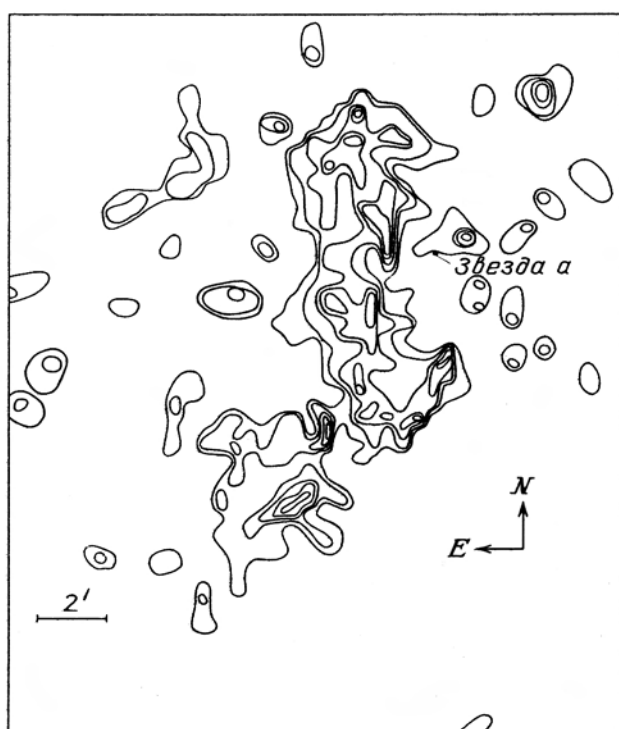


Рис. 31. Контуры равной звездной плотности в NGC 6822

восточную сторону от нижней части бара. Крупномасштабная структура NGC 6822 похожа на структуру БМО: пятна бешеной звездообразовательной активности разбросаны поперек основного барообразного тела из более старых звезд (рис. 31). Попытки проследить назад по времени историю звездообразования в обеих галактиках демонстрируют одни и те же преобладающие схемы вплоть до самых ранних прослеживаемых эпох. Датировкой возрастов звездных скоплений и ассоциаций установлено, что области звездообразования в недавней истории галактики почти случайным образом перескакивали с одного места на другое. Скорость образования скоплений в NGC 6822 довольно мала – в среднем одно скопление за 6 миллионов лет. Для сравнения, БМО удается порождать одно скопление каждые 30 000 лет.

IC 1613. Мы посвятили несколько страниц NGC 6822 не потому, что это заслуживающий особого внимания член Местной группы, а потому что это хороший пример хорошо исследованной карликовой галактики. Аналогичная работа была проделана и для других карликовых неправильных галактик –

в наибольшей степени для IC 1613 (фото XXXVII) – слабой галактики почти на таком же расстоянии от нас, как и NGC 6822. В то время как NGC 6822 по своему строению похожа на БМО, только меньше, можно сказать, что IC 1613 напоминает ММО и тоже имеет меньшие размеры. Ее ярчайшие звезды слабее, области НII менее массивные, звездные скопления почти невидимы и мало цефеид: в остальном все как обычно. Единственный продукт, которым IC 1613 наделена в достатке, – это нейтральный водород, на который приходится почти 20 % общей массы – примерно столько же, сколько и у других галактик. Газ, масса которого достигает 70 миллионов масс Солнца, размазан по бледному «лицу» IC 1613.

Уже давно стоит загадка звездных скоплений в IC 1613. Где они? Вальтер Бааде впервые обратил внимание в 50-х годах на то, что за много лет исследования этой галактики он не нашел в ней ни одного скопления. Масса галактики составляет около трети массы NGC 6822 (примерно 400 миллионов масс Солнца) и до сих пор в ней не обнаружено признаков ярких скоплений вроде тех, что Хаббл открыл в NGC 6822. Это, видимо, свидетельствует о наличии до сих пор нераспознанного агента, определяющего возможность или невозможность образования в галактике богатых скоплений.

В 1978 г. были обнаружены несколько очень слабых объектов, похожих на очень маленькие звездные скопления, до тех пор остававшиеся незамеченными из-за слабого блеска и крошечных размеров (фото XXXVIII). Из 43 кандидатов, судя по всему, только 25 можно с уверенностью называть скоплениями. Некоторые представляют собой слабо связанные агрегаты из полудюжины

разрешенных ярких голубых звезд – это молодые скопления с сомнительным будущим – и четыре являются старыми скоплениями, ярчайшие красные гиганты которых с трудом разрешаются на лучших пластинках 200-дюймового Паломарского телескопа. Так что скопления в этой анемичной звездной системе найдены, но до сих пор остается загадкой, почему они такие крохотные, тусклые и почему их в галактике так мало.

Так как IC 1613 галактика очень маленькая, неудивительно, что, как и у NGC 6822, у нее пониженное содержание тяжелых элементов по сравнению с Млечным Путем. Согласно современным данным, содержание этих элементов в IC 1613 по крайней мере такое же низкое, как и в NGC 6822 при одновременном дефиците пыли. Обнаружено всего 11 пылевых облаков – это меньше, чем в любой другой галактике, где проводился поиск темных поглощающих свет объектов. Подсчеты галактик заднего фона указывают на очень слабое поглощение. В лучшем случае общим слоем пыли экранируются лишь 50 % слабых галактик фона вблизи центра IC 1613. Аналогичные подсчеты для ММО дают 85 % падения плотности. Таким образом, относительное содержание пыли в IC 1613 меньше, чем даже в бедном пылью ММО.

Другие неправильные галактики. Уже упоминалась GR 8 экстремально маленькая галактика в Местной группе. Удивительно малые размеры этой галактики (около 1500 световых лет) и низкая абсолютная светимость (лишь немногим больше светимости ярчайшей одиночной звезды в нормальной галактике) говорят о степени ее карликовости. На нее похожа галактика LGS-3 с низкой поверхностной яркостью, обнаруженная в 1978 г. Расстояние до нее неизвестно и, вероятно, заключено в пределах от 0,5 до 2 миллионов световых лет. Кроме них вблизи Местной группы имеется еще несколько карликовых неправильных галактик, но они недостаточно близки, чтобы быть членами системы. Все они – слабые объекты, открытые недавно и потому не имеющие номеров NGC, а известные в основном под названиями содержащих их созвездий – такие галактики, как Феникс, Лев А и Лев В. Система WLM названа по первым буквам имен открывших ее астрономов – Вольфа, Лундмарка и Мелотта, а IC 10 была обнаружена достаточно давно и поэтому включена в Индекс-каталог – приложение к каталогу NGC.

СПУТНИКИ ТУМАННОСТИ АНДРОМЕДЫ

Как и Млечный Путь, Туманность Андромеды (М 31) окружена семейством карликовых галактик. Ближайшие спутники М 31 – это не две неправильные галактики вроде Магеллановых Облаков, а две эллиптические галактики – М 32 и NGC 205. При наблюдении с Земли обе галактики проецируются на изображение М 31, при этом М 32 оказывается погруженной в южные центральные внешние спиральные рукава, а более крупная и менее яркая NGC 205 расположена среди слабых внешних звезд в северных областях главной галактики. На расстоянии около шести градусов видны две похожие и лишь немного менее яркие эллиптические галактики. Эти два объекта – NGC 147 и NGC 185 достаточно близки друг к другу, чтобы составлять вероятную двойную систему. Другие известные спутники галактики в Андромеде – это открытые в 1970 г. четыре очень слабые карликовые галактики, обычно обозначаемые And Dwf с номерами от I до IV. Три из них являются карликовыми эллиптическими галактиками, а одна представляет собой неправильную галактику низкой светимости.

М 32 – это умеренно яркая весьма компактная галактика с примерно такой же общей светимостью как и у ММО, но весь ее свет упакован в яркое изображение почти круглой формы с поперечником около 6000 световых лет (фото XXXIX). Галактика в основном состоит из звезд низкой светимости – главным образом старых звезд вроде тех, что населяют шаровые скопления. Однако спектр и цвет галактики свидетельствуют об отличии химического состава ее звезд от химического состава старых бедных металлами шаровых скоплений – вопреки тому, что можно было ожидать исходя из красного цвета системы. В М 32 против ожиданий имеется популяция богатых металлами звезд, а также компонент, состоящий из весьма умеренно старых звезд (с вероятным возрастом всего около 2–3 миллиардов лет) с незначительной примесью более старого населения. Среди этих звезд разбросано несколько редких планетарных туманностей, но других незвездных объектов не обнаружено. Нет больших светящихся облаков газа, нет прослоек пыли, нет нейтрального водорода – нет ничего из того, в чем нуждается галактика для образования новых звезд. М 32 – это пожилой объект, часть его звезд имеет средний возраст, но признаков молодости в нем нет.

М 32 – одна из наиболее подробно спектроскопически исследованных галактик. Высокая поверхностная яркость сделала ее излюбленной мишенью работающих в оптическом диапазоне ас-

трономов, которые могут быстро измерять ее параметры; таким образом она стала удобным и доступным стандартом для многих обзоров галактик. Масса М 32 оценена по наблюдаемой ширине распределения скоростей. Линии в ее спектре расширены за счет эффекта Доплера, и полная ширина распределения скоростей в центре М 32 составляет 140 км/с. Это значит, что часть звезд удаляется от ядра со скоростью 70 км/с, а часть приближается к нам с такой же скоростью. По этим скоростям и расстояниям звезд до центра галактики можно оценить массу основного тела М 32, составляющую около 2 миллиардов ($2 \cdot 10^9$) масс Солнца – менее 1 % массы «родительской» галактики М 31.

Хотя масса М 32 мала, эта галактика, по-видимому, является источником значительных возмущений. Хрупкая спиральная структура М 31 демонстрирует вблизи М 32 довольно сложный и запутанный узор неправильной формы. Газовые рукава нейтрального водорода смещены относительно звездных рукавов примерно на 4000 световых лет и в возмущенной области невозможно непрерывно проследить ход спиральных ветвей. Компьютерные модели М 31 показывают, что искаженный узор, сильно напоминающий наблюдаемый, может быть создан близким прохождением галактики-спутника с массой М 32.

Туманность Андромеды все же отомстила М 32. Данные многоцветной фотометрии для этой компактной галактики свидетельствуют о сходстве ее звездного населения с населением эллиптической галактики гораздо большей светимости. Так как компактность М 32 тоже необычна для галактики такой светимости, возможно, она когда-то была гораздо более крупным объектом пока тесные сближения не утянули прочь внешние звезды. Быть может, они постепенно смешались со звездами М 31, оставив от М 32 лишь плотное ядро.

У другого близкого спутника Туманности Андромеды – NGC 205 свои особенности. На фотографиях он похож на обычную довольно вытянутую эллиптическую галактику типа Е5. Его светимость не очень велика – всего ненамного больше, чем у М 32. Несмотря на в два раза больший чем у М 32, диаметр NGC 205 остается небольшой галактикой по сравнению с М 31, диаметр которой в 10 раз больше. Однако форма и состав NGC 205 довольно странные. Обычно эллиптические галактики симметричны и их изофоты имеют вид концентрических подобных эллипсов. Но у NGC 205 во внешних областях наблюдается ярко выраженный поворот – большая ось изображения довольно резко меняет направление. Такая особенность не является чем-то новым для эллиптических галактик – в других случаях это считается оптическим эффектом, возникающим при наблюдении вытянутой галактики под определенным углом. Но у NGC 205 поворот оси иного рода: он наблюдается лишь в самых внешних изофотах и не является постепенным смещением направления оси. Эта особенность больше напоминает изгиб внешних частей плоскости диска в нашей Галактике и в М 31 (глава 8) и, вероятно, (но не наверняка) является следствием приливных сил, действующих на слабо населенные области со стороны галактик-спутников. Внешняя часть главной плоскости NGC 205, не будучи, как у спиральных галактик, плоским диском, тоже может откликаться на приливные силы. Таким образом, налицо свидетельства взаимодействия галактик Местной группы друг с другом, приводящих к искажению формы, «обдиранию» одной галактики другой галактикой и порождающих такие особенности структуры, которые могут помочь нам восстановить прошлое галактик.

Другим аномальным свойством галактики NGC 205 является ее состав. При том, что эллиптические галактики считаются состоящими исключительно из старых звезд без межзвездного вещества, в 1944 г. Вальтер Бааде обнаружил в NGC 205 небольшую популяцию очень молодых звезд, а также хорошо заметные прослойки пыли (фото XL). Недавние наблюдения выявили горячие О- и В-звезды, углеродные звезды высокой светимости и несколько вероятных цефеид (фото XLI). Радиоастрономы обнаружили также в галактике большое облако нейтрального водорода. Таким образом, у NGC 205 есть и сырье для производства новых звезд и склонность к этому.

Почему эта эллиптическая галактика не подчиняется общим правилам? Почему у нее есть и газ и пыль и новообразованные звезды, в то время как по всем остальным показателям она должна быть «мертвой» эллиптической галактикой, которая, как предполагалось, израсходовала все свои строительные материалы для производства звезд в далеком прошлом? Одно из возможных объяснений состоит в близости ее к М 31. Быть может, каким-то образом в результате приливного взаимодействия часть обширных запасов газа и пыли М 31 была передана NGC 205, где все это упало на центр и начало формировать новое поколение звезд. Гипотеза кажется приемлемой, если не обращать внимание на странный случай с NGC 185.

Подобно многим другим галактикам NGC 185 была внесена в каталог в XVIII в. Сэром Уильямом Гершелем. В XIX в. Г. Д'Аррест открыл близкую более слабую, но довольно похожую на

NGC 185 галактику NGC 147. К началу XX в. было установлено, что эти объекты являются эллиптическими галактиками довольно низкой абсолютной светимости и образуют пару удаленных спутников М 31 на расстоянии около 400 000 световых лет от последней (это примерно в два раза дальше, чем расстояние от Магеллановых Облаков до Млечного Пути).

Больше всего NGC 185 заслуживает внимания из-за своей запыленности (фото XLII). Хотя NGC 185 несколько меньше NGC 205 и не такая яркая, в остальном эти галактики довольно похожи. Вместо того, чтобы встретить в ней население, состоящее исключительно из старых звезд, мы находим там небольшое количество молодых звезд, газа и пыли. Два пылевых облака образуют клочковатую оболочку почти круглой формы на расстоянии около 200 световых лет от центра галактики. Кроме того, вблизи центра по видимому изображению галактики разбросаны молодые звезды, а с одной стороны концентрируется нейтральный водород. Возможная интерпретация этого замечательного явления состоит в том, что NGC 185 сохранила часть своего газа в эпоху основного звездообразования примерно 10 миллиардов лет назад. Только сейчас этот газ используется на образование звезд. Звездные ветры от концентрации звезд вблизи центра галактики могут, несмотря на свою слабость, объяснить наличие почти круглой оболочки: излучение от звезд давит на пыль и не дает ей упасть на центр гравитации. Оставшихся газа и пыли мало (всего несколько миллионов масс Солнца), но достаточно для звездообразования – медленного или постепенного, или в ходе небольшой недавней вспышки. На самых лучших фотографиях NGC 185 видно лишь около 100 молодых звезд.

Общая масса молодых звезд, газа и пыли в NGC 185 замечательным образом близка к соответствующей массе для NGC 205, так что любое объяснение наличия этого вещества должно быть в одинаковой степени применимо к обеим галактикам. Гипотеза зависимости от близости NGC 205 к М 31 не годится для слишком удаленной от М 31 NGC 185 и поэтому не очень привлекательна. Считается, что примесь молодых звезд – совершенно нормальное явление для эллиптических галактик. Предполагается, что звезды образуются из остаточного газа или газа, выброшенного звездами в ходе их нормальной эволюции, и вероятно, такие молодые звезды могут быть найдены во всех эллиптических галактиках. Спектры эллиптических галактик свидетельствуют о наличии слабого молодого голубого компонента, относительная доля которого возрастает с уменьшением светимости. По этой причине кажется разумным предположение о наличии небольшой звездообразовательной активности даже в таких считающихся древними объектах, как эти эллиптические галактики. Темп звездообразования может меняться во времени скачкообразно: вспышки звездообразования характерны для других типов галактик. Возможно, у эллиптических галактик тоже бывают вспышки, но число образуемых в ходе одного такого события звезд очень мало. Если так, то это число не пропорционально массе галактики, то есть очень массивные эллиптические галактики не испытывают пропорционально интенсивных вспышек звездообразования. В этом случае цвета маломассивных галактик должны быть аномально голубыми, что как раз и наблюдается. «Голубизна» отсутствует у массивных галактик, так как свет молодых звезд разбавляется огромным количеством старых звезд.

NGC 147 не такая яркая, как NGC 185, и еще менее заметна (рис. 32). Подобно NGC 185 она содержит несколько шаровых скоплений, но в ней не обнаружено ни газа, ни пыли, ни молодых звезд. Хотя там и нет признаков очень недавнего звездообразования, наличие углеродных звезд говорит о том, что галактика состоит не только из одних древних звезд. Во всяком случае в течение примерно последнего миллиарда лет в галактике должно было происходить какое-то звездообразование.

Галактики And I, II, III – это замечательные объекты, почти во всех отношениях сильно напоминающие более близкие к нам галактики типа Скульптора. Недавно астрономы измерили блеск и цвета их ярчайших звезд – поразительное достижение, учитывая их слабый блеск. Исследования такого рода стали возможными только в 80-х годах, когда для применения в наблюдениях на больших телескопах стали доступны чрезвычайно высокочувствительные линейные цифровые светоприемники вроде ПЗС. С помощью ПЗС-приемника на 4-метровом телескопе Национальной обсерватории Китт Пик было установлено, что эти галактики содержат старые бедные тяжелыми элементами звезды-гиганты.

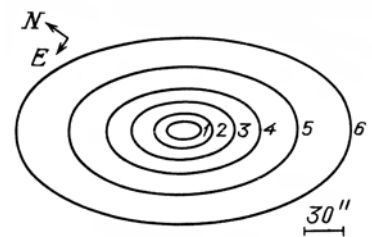


Рис. 32. Изофоты NGC 147, иллюстрирующие почти совершенную эллиптичность формы галактики

СЕМЬ КАРЛИКОВ

В 1938 г. Харлоу Шепли сообщил об открытии им первой из близких карликовых эллиптических галактик Местной группы. Он не знал, что это за объект, но понял, что он имеет большое значение и является чем-то новым и отличным от того, что было известно раньше. Один из ассистентов Шепли вел поиск галактик на ряде фотопластинок, полученных на 24-дюймовом Гарвардском обзорном телескопе в Бойденской обсерватории в Южной Африке. Среди тысяч отождествленных крохотных изображений галактик имелось одно необычное, сначала принятое за отпечаток пальца или иной дефект. Когда на него обратил внимание Шепли, он просмотрел другие пластинки этой области, на которых несмотря на их меньшую предельную звездную величину были видны незначительные следы странного объекта. Он оказался реальным. Объект занимал большую часть верхней области пластинки и казалось, состоял из тысяч слабых почти невидимых звезд – все они лишь чуть чуть превышали предел разрешения пластинки. Точные подсчеты изображений звезд показали, что они распределены почти равномерно, заполняя круглую область с диаметром примерно в четыре раза больше, чем у полной Луны.

Когда Шепли опубликовал описание этого странного объекта, он все еще не знал, что с ним делать. Он назвал объект «Системой в Скульпторе» по южному созвездию, в котором объект был найден, но не смог решить, является ли он необычным слабым скоплением звезд в нашей Галактике, отдельной галактикой, состоящей из слабых звезд, или, быть может, далеким скоплением галактик. В любом случае, чем бы он ни был, объект не был похож ни на какой другой, обнаруженный раньше (фото XLIII).

Шепли выдвинул три проекта, разработанные с целью получить ответ на загадку Скульптора – так для краткости называли объект. Сначала он дал ассистенту задание исследовать все гарвардские пластинки этой области неба вплоть до пластинок 90-х годов прошлого века, когда Университет начал проводить в Перу обзор южного неба. Шепли хотел знать, можно ли найти Скульптор на пластинках, полученных на других менее крупных телескопах. Во-вторых, он взвалил на ассистентов работу, требующую гораздо больших затрат времени, – просмотр всех гарвардских пластинок (полученных на 24-дюймовом телескопе), на которых видны очень слабые звезды, с целью поиска других объектов такого рода. И в-третьих, он договорился с сотрудниками Бойденской обсерватории о том, что они получают пластинки с изображением Системы Скульптора на недавно установленном 60-дюймовом телескопе, в надежде, что более крупный масштаб и большая предельная звездная величина помогут определить истинную природу этого загадочного объекта.

Все три проекта принесли плоды. Была найдена пластинка, полученная много лет назад на 3-дюймовом телескопе с длившейся несколько ночей экспозицией, и на ней Скульптор оказался слабым неразрешенным на звезды пятнышком. На глаз Шепли оценил его общий блеск как близкий к блеску звезды 9-й величины, но объект размазан по столь большой площади, что его поверхностная яркость оказывается чрезвычайно низкой.

В конце концов на пластинках 24-дюймового гарвардского телескопа был найден второй объект типа Скульптора, состоящий из неразрешенных звезд, распределенных на примерно такого же размера области неба, но в созвездии Печи. Он был похож на изображение Скульптора на пластинках менее крупных телескопов, и Шепли заподозрил, что это объект того же типа, но расположенный на большем расстоянии (фото XLIV).

Когда в Южной Африке были получены и отправлены оттуда в Гарвард пластинки 60-дюймового телескопа, Шепли со своими коллегами тут же приступил к их исследованию. Благодаря повышенной проникающей силе телескопа стало ясно видно, что изображения представляют собой множество звезд. Еще интереснее оказалось открытие нескольких переменных звезд, которые были исследованы гарвардским экспертом по переменным Генриеттой Суоп, определившей их периоды и получившей кривые блеска. Переменные оказались цефеидами и они сразу же дали Шепли ответы на его вопросы. Применив к цефеидам зависимость период–светимость, он установил, что Скульптор является другой галактикой – одним из членов нашей Местной группы.

Тем временем Эдвин Хаббл и Вальтер Бааде расположили 100-дюймовый телескоп на горе Маунт Вилсон почти горизонтально, чтобы пронаблюдать эти объекты южного неба (оба имеют склонение около -35°). Ряд пластинок, ни одна из которых не была особенно хорошей из-за ужасных условий видимости вблизи горизонта, выявил в Скульпторе около 40 переменных типа RR Лиры и вычисленное по данным для этих звезд расстояние оказалось равным около 200 тысяч световых лет. Система в Печи была разрешена на более слабые звезды, блеск ни одной из которых не

превышает 21-й величины и, следовательно, если она аналогична Скульптору, то находится примерно в два раза дальше.

Потом астрономы на Маунт Вилсон обратили внимание на сходство объектов Скульптора и Печи с обычными шаровыми скоплениями и предположили, что они не представляют ничего нового и просто являются очень большими шаровыми скоплениями, похожими на галактики низкой плотности. С точки зрения истории интересно, что впоследствии Бааде выражал сожаление по поводу выбора им этой точки зрения. Если бы они с Хабблом были иного мнения об этих галактиках, то вышли бы на связь между шаровыми скоплениями и эллиптическими галактиками, которая потом привела Бааде к формулировке им знаменитой классификации объектов на населения I и II, проложившей дорогу современному пониманию звездной эволюции.

В течение последующих 40 лет галактики в Скульпторе и Печи продолжали считаться примерами чистого звездного населения типа шаровых скоплений в форме «размазанных» галактик с низкой плотностью. Они были названы «карликовыми эллиптическими» или «карликовыми сфероидальными» галактиками. В Местной группе было обнаружено еще пять экземпляров этого типа, четыре из них – в результате поиска на пластинках 48-дюймового Паломарского телескопа в 50-х годах, когда на этом телескопе впервые проводился глубокий обзор северного неба (фото XLV и рис. 33). Седьмой объект (в созвездии Киля) был найден в 1977 г. при помощи английского 48-дюймового обзорного телескопа системы Шмидта в Австралии.

Большая часть истории исследования этих объектов прошла под влиянием первоначального отсутствия энтузиазма со стороны Бааде и Хаббла. Большинство исследователей галактик считали их «просто» разбухшими шаровыми скоплениями. Сначала заметили необычные переменные звезды, сейчас как правило называемые «аномальными цефеидами». Примером таких звезд являются переменные, исследованные Суоп в Скульпторе. Они в некоторых отношениях похожи на переменные типа RR Лиры, но имеют более длинные периоды (примерно от 1 до 3 дней) и более яркие. Один из карликов – Лев I – содержит по меньшей мере 20 таких аномальных цефеид. Большинство астрономов считает их признаком наличия в карликовых эллиптических галактиках населения, более молодого, чем звезды шаровых скоплений, возраст которых составляет около 15 миллиардов лет. Рассчитанные для аномальных цефеид значения масс предполагают возрасты всего от 2 до 5 миллиардов лет.

Другое свидетельство наличия в галактиках типа Скульптора молодых звезд дает недавнее открытие в них углеродных звезд. Углеродные звезды высокой светимости, обнаруженные в небольшом количестве среди тысяч ярких красных гигантов, считаются довольно массивными, и рассчитанные для них возрасты (пока еще весьма ориентировочные) составляют около 2 миллиардов лет.

Кроме того, многие тонкие детали диаграмм цвет–величина галактик типа Скульптора отличаются от соответствующих деталей диаграмм шаровых скоплений. Ветви гигантов у карликов толще из-за разброса возрастов, химического состава или и того и другого, а горизонтальные ветви в некоторых случаях расположены не там, где ожидается. Это может быть результатом другого среднего значения возраста звезд в галактиках типа Скульптора. Возможно, даже их старейшие звезды моложе шаровых скоплений в Млечном Пути – современными методами это трудно проверить.

Для объяснения происхождения карликовых эллиптических галактик и их аномалий в последнее время были выдвинуты две заманчивые, но все же спекулятивные гипотезы. Согласно одной из них, карлики порождены бурным столкновением приливного характера, которое произош-

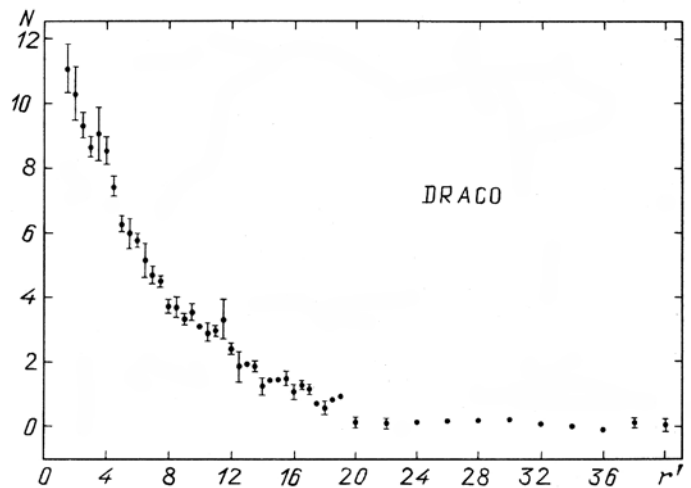


Рис. 33. Распределение звезд в Драконе. Звездная плотность отложена по вертикальной оси, а по горизонтальной оси – расстояние от центра галактики. Интервалы у каждой точки изображают статистическую погрешность соответствующего значения

ло от 2 до 3 миллиардов лет назад, когда Магеллановы Облака прошли вблизи нашей Галактики. Быть может, это событие разрушило ММО, разделив его на два современных компонента, и породило Магелланов поток. Другие астрономы отмечали близость некоторых карликовых эллиптических галактик к Магелланову потоку как свидетельство их общего происхождения, хотя природа компонентов очень различна: в галактиках типа Скульптора только старые звезды, а в Потоке – лишь несконденсировавшийся газ.

Согласно другой гипотезе, возможно, связанной с первой, карликовые эллиптические галактики являются скелетами неправильных галактик, израсходовавших свой звездостроительный материал 2 или 3 миллиарда лет назад. Быть может, газ был выметен из них при столкновении с внешними частями Млечного Пути. Эта интерпретация карликов объясняет особенности их структуры, которая больше похожа на структуру неправильных галактик, чем нормальных эллиптических галактик. С другой стороны, нестандартное строение этих объектов традиционно интерпретируется как результат приливного воздействия на их внешние области со стороны во много раз более гигантской нашей Галактики. Исходя из этой последней интерпретации астрономы даже использовали структуру внешних частей Скульптора и семи его братьев для оценки полной массы нашей Галактики по ее приливному воздействию. К сожалению, в настоящее время результаты применения такого метода слишком ненадежны, чтобы обеспечить независимое определение массы нашей Галактики – очень важной величины, для которой сейчас получаются противоречивые оценки (глава 5).

Наконец, большое значение может иметь еще одна особенность галактик типа Скульптора. Внутри и вблизи крупнейшей и имеющей самую большую светимость из них галактики в Печи насчитывается 6 шаровых скоплений. На вид они почти во всех отношениях нормальные, разве что несколько больше шаровых скоплений нашей Галактики по диаметру, что легко понять (по крайней мере качественно) как результат значительно более слабого гравитационного поля Печи. Три скопления, открытые в эпоху исследовательских работ Шепли, Бааде и Хаббла, заставили большинство астрономов прийти к выводу, что объекты типа Скульптора не являются просто шаровыми скоплениями малой плотности, оказавшимися на больших расстояниях. То, что было известно тогда, и то, что мы знаем сейчас об образовании галактик и скоплений, исключает такую возможность. Это можно сформулировать следующим образом: «У собак бывают блохи, но у блох не бывает блох». Шаровые скопления нашей Галактики считаются продуктами очень ранних конденсаций в протогалактическом газовом облаке, отделившихся от других флуктуации плотности в ранней Вселенной вскоре после Большого Взрыва. Плотности скоплений были достаточно высокими для образования в них звезд еще до значительного звездообразования в Галактике, быть может, даже до того, как диск Галактики в результате вращения сколлапсировал в плоскость. В большинстве моделей этого не очень понятного процесса скопления нуждаются в «родительских» галактиках, чтобы образовываться вблизи них. Следовательно, как свидетельствуют ее 6 «блох», система в Печи – это галактика.

Глава 8

БЛИЖАЙШИЕ СПИРАЛИ

В Местную группу входят три спиральные галактики: Млечный Путь, М 31 и М 33. Наша галактика имеет настолько огромное значение для астрономии, что получила отдельную книгу в этой серии («Млечный Путь» Бока и Бок). Две другие, будучи ближайшими к нам спиральными галактиками, заслуживают отдельной главы.

М 31, БОЛЬШАЯ ТУМАННОСТЬ В АНДРОМЕДЕ

Среди многих видимых в небольшие телескопы объектов северного неба М 31 является одним из самых выдающихся (фото XLVI). Она огромна, простирается более чем на градус и в два раза больше диаметра Луны. настолько яркая, что является одной из немногих видимых без телескопа туманностей, М 31 – один из самых далеких объектов, видимых невооруженным глазом, и расположена на дальнем краю Местной группы на расстоянии около 2 миллионов световых лет. Но самая замечательная особенность М 31 – это ее подлинная красота, неважно, наблюдаем ли мы ее в бинокль как слабое таинственное пятно, или восхищаемся ею во всем ее блистательном великоле-

пии, глядя в большой телескоп. Фотографии открывают нам поразительное разнообразие ее структуры – яркий желтый центральный балдж, окруженный узкими спиральными рукавами, усеянными голубыми звездами, скопления и темные прожилки пыли. В качестве примера гигантской спиральной галактики она особенно богата одарена всеми видами объектов, которые астрономам следует подробно изучить для последующего понимания галактик, расположенных в далеких частях Вселенной.

Эпохальное исследование М 31 Хабблом, опубликованное в 1929 г., впервые доказало истинно внегалактическую природу объекта. После определения расстояния до М 31 на основе данных об открытых им в спиральных ветвях переменных звездах-цефеидах, Хаббл обнаружил также много других особенностей, подтвердивших его точку зрения о том, что Большая Туманность является галактикой. Например, сравнивая между собой многие из полученных им фотографий, Хаббл открыл 63 новых внезапно вспыхивающих и достигающих высокой светимости звезд, блеск которых потом падает, так что в течение нескольких дней они снова становятся невидимыми. Новые по яркости были сравнимы с цефеидами самой высокой светимости, а некоторые даже превосходили их, что привело Хаббла к выводу об их сходстве с новыми нашей Галактики (рис. 34 и 35). Хаббл не знал причин явления новых, но знал, какого значения достигает их истинная светимость в окрестностях Солнца, и мог таким образом заключить, что они подтверждают полученное по цефеидам расстояние до М 31.

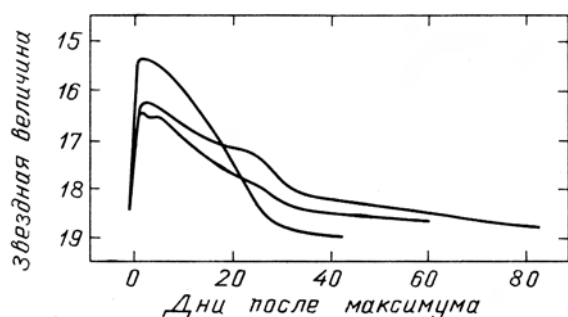


Рис. 34. Кривые блеска новых в М 31 по данным, опубликованным Хабблом. Звездные величины относятся к голубому диапазону спектра

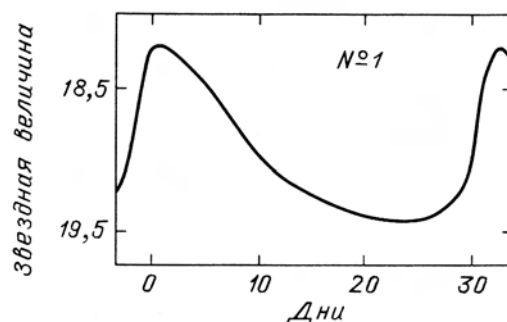


Рис. 35. Кривая блеска цефеиды в М 31 (в статье Хаббла, где сообщалось о ее открытии, она имеет номер 1) в том же диапазоне спектра

Теперь мы знаем больше о том, что приводит к появлению новой. Все новые, по-видимому, являются двойными звездами, в которых один компонент пары представляет собой сколлапсировавшую звезду вроде белого карлика, завершившую свою нормальную жизнь и существующую в форме тусклого, очень плотного и горячего «уголька». Из-за чрезвычайно сильного тяготения на поверхности этой звезды все, что упадет на нее, вызовет реакцию наподобие взрыва атомной бомбы. Другим объектом системы новой является звезда, увеличивающаяся в размерах в ходе эволюции к фазе красного гиганта. Эта звезда отстает на эволюционной последовательности от своего спутника, вероятно, из-за несколько меньшей массы. По мере увеличения диаметра звезды часть ее газа начинает чувствовать притяжение более плотного карликового спутника и падает на горячую поверхность спутника. Когда водород, сжатый огромным тяготением карлика, вступает в реакцию синтеза с образованием гелия и высвобождает достаточно энергии для короткой и эффективной вспышки новой, происходит громадный взрыв.

Спустя почти 20 лет после опубликования статьи Хаббла, на обсерватории Маунт Вилсон было предпринято более систематическое и полное исследование новых в М 31. В течение года галактика фотографировалась каждую ясную ночь. Результатом явился полный список новых в галактике на протяжении одного года – первый и единственный в своем роде. Ничего похожего нельзя сделать для Млечного Пути, так как пыль закрывает большую его часть от нашего взгляда в оптическом диапазоне. Другие галактики либо слишком малы, чтобы в них часто вспыхивали новые, либо слишком далеки, чтобы новые в них можно было наблюдать. Поэтому обзор новых, как и многие другие исследования М 31, важен не только для понимания нами этой конкретной галактики, но и для получения новых знаний о галактиках вообще, – знаний, которые мы не смогли бы получить иначе.

Например, интересной и важной особенностью новых оказалось свойство, которое было бы нелегко обнаружить в нашей Галактике. Было установлено, что блеск разных новых падает с разной скоростью, причем скорость падения блеска коррелирует с блеском новой в максимуме. Блеск

наиболее ярких новых падает быстрее всего. Все новые в М 31 находятся от нас примерно на одинаковом расстоянии около 2 миллионов световых лет, так что мы можем непосредственно сравнивать их друг с другом, не беспокоясь об учете влияния различий в расстояниях, что необходимо для новых в нашей Галактике. Потому эта важная корреляция лучше видна для новых в М 31. Предполагая, что новые везде ведут себя одинаковым образом, можно использовать результаты для новых в М 31 для определения расстояний до таких звезд, где бы они ни находились при условии измерения скорости падения их блеска. Через эту корреляцию новые близких галактик стали средством атаки на проблему шкалы расстояний, которая излагается в главе 10.

S Андромеды. Когда на Маунт Вилсон были найдены первые новые в М 31, это вызвало некоторый скептицизм из-за слабости их блеска. Так как истинное расстояние до М 31 было еще неизвестно, то нельзя было объяснить слабый блеск новых, и к тому же проблема усложнилась из-за другой новой, появившейся в 1885 г. В этом году вблизи центра М 31 вспыхнула чрезвычайно яркая звезда, почти видимая без телескопа. Она была названа S Андромеды и вела себя почти как новая с постепенным падением блеска вплоть до исчезновения из вида спустя несколько месяцев. Астрономы того времени приняли ее за обычную новую. В 20-х годах нашего века при обсуждении природы галактик некоторые астрономы указывали на замечательно большую яркость S Андромеды, как на свидетельство того, что М 31 не может находиться очень далеко. Однако, когда Хаббл установил расстояние до галактики, опираясь на цефеиды, астрономы поняли, что S Андромеды не могла быть настоящей новой, а является объектом другого типа, – теперь такие звезды называются сверхновыми. Несколько таких громадных взрывов наблюдались, хотя и остались неузнанными, в нашей Галактике, а также иногда обнаруживались в более далеких спиральных галактиках. Сейчас известно, что при взрывах сверхновых происходит полное разрушение звезды в конце ее жизни; при этом иногда в качестве напоминания о звезде остается лишь крохотная нейтронная звезда. В гигантской спиральной галактике вроде М 31 ожидаемая частота вспышек сверхновых составляет примерно одно событие в 50 лет. До сих пор в М 31 наблюдалась лишь S Андромеды, так что мы, наверное, очень скоро сможем увидеть еще одно из этих эффектных событий.

Цефеиды. Несмотря на свое большое историческое значение, цефеиды в М 31 оставались относительно забытыми после открытия Хабблом 40 этих гигантских пульсирующих звезд и применения их для оценки расстояния до галактики. Спустя примерно 25 лет Вальтер Бааде и Генриетта Суоп использовали пластинки 200-дюймового Паломарского телескопа для более тщательного, с аккуратной фотоэлектрической калибровкой, исследования цефеид одной из небольших внешних областей галактики и уточнения зависимости период–светимость (рис. 36).

Вещество между звездами. В галактике в Андромеде есть газ, часть которого видна, но основная его масса невидима. Видимый газ выглядит, как небольшие не очень яркие области НII внутри или вблизи спиральных рукавов галактики. Недавно группой французских астрономов из Марсельской обсерватории был составлен чудесно оформленный атлас почти 1000 областей НII в М 31. В отличие от гигантских областей газа в Магеллановых Облаках области в М 31 довольно небольшого размера и яркость их невелика. Этот дефицит, вероятно, является результатом отсутствия массовых центров звездообразования, которое может быть связано с менее благоприятными условиями (плотностью нейтрального газа или динамикой) по сравнению с Магеллановыми Облаками. Яркость даже крупнейших газовых облаков в М 31 невелика и поэтому фотография галактики в линии Н-альфа не выглядит эффектно (фото XLVII). Другие галактики типа Sb, похоже, тоже небогаты областями НII, и таким образом, объяснение этого явления должно быть как-то связано со структурой. У галактик типа Sa дело обстоит еще хуже: обзоры внегалактических областей НII выявили лишь несколько галактик этого типа, в которых вообще были обнаружены области НII. С другой стороны, холодный нейтральный водород в М 31 весьма обилен и находится в невозмущенном состоянии в обширных пустотах между звездами. Нейтральный водород в М 31 очень подробно исследовался при помощи больших интерферометров из расположенных в ряд радиотелескопов, построивших великолепные карты галактики, которые по-

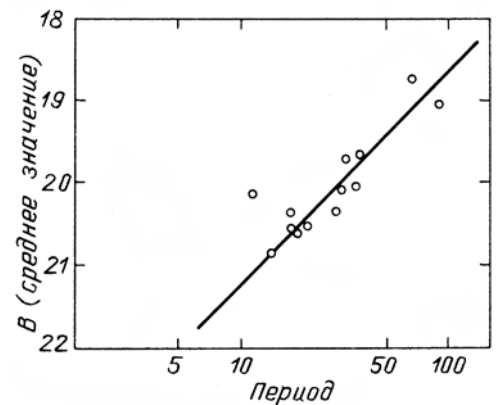


Рис. 36. Диаграмма период–светимость для цефеид в М 31, полученная Бааде и Суоп для небольшой области в самой юго-западной части объекта

зволяют проследить сложные движения и столь же сложное распределение газа (фото XLVIII). Нейтральный водород распределен в галактике не так, как звезды, у него наблюдается большой пробел в середине и повышенная концентрация на расстоянии около 40 000 световых лет от ядра. Как раз там видимые газовые облака наиболее многочисленны и спиральная структура наиболее ярко выражена. В отличие от оптических областей НИ, исчезающих на расстояниях около 50 000 световых лет, прослеживаемый на радиокартах нейтральный газ простирается до 100 000 световых лет – далеко за пределы большей части видимых областей галактики. Это в три раза дальше расстояния от Солнца до центра нашей Галактики и на 50 % дальше самого далекого газа в плоскости Млечного Пути. Газ в М 31, вопреки ожиданиям астрономов, обращается вокруг центра не по круговым орбитам. Вместо этого он ведет себя весьма странно. Внутренний рукав в северо-восточной части М 31 падает к центру и одновременно обращается по орбите. Скорость падения велика и достигает 100 км/с (около 200 000 миль в час = 360 000 км/ч)! Причина этого аномального движения все еще неизвестна: оно может быть связано с взрывным событием – какой-нибудь гигантской супер-сверхновой или, может быть, результатом приливного воздействия на рукав со стороны галактик-спутников. Помочь решению этой загадки должен дальнейший анализ этого и подобных некруговых движений в М 31. На нескольких крупнейших в мире радиотелескопах были получены карты непрерывного радиоизлучения в М 31 (фото XLIX). Много радиоизлучения приходит от центра галактики, где расположен очень яркий, вероятно, нетепловой источник, связанный с ядерной активностью М 31. Быть может, в ядре расположен остаток большого сколлапсировавшего объекта – возможно даже черная дыра, хотя М 31 явно не является радиогалактикой в обычном смысле этого слова (глава 11). Кроме того, слабое нетепловое радиоизлучение исходит от диска галактики. Интенсивность и характер этого радиоизлучения примерно такие, какие ожидаются от многочисленных остатков сверхновых (которые должны там находиться) на основании данных о выборке объектов вроде Крабовидной Туманности в нашей собственной Галактике. Несколько остатков оказались как раз достаточно яркими, чтобы их удалось пронаблюдать и исследовать в оптической области спектра. Оптические и радиоданные указывают на то, что остатки сверхновых концентрируются вблизи центрального балджа и распределены с низкой пространственной плотностью во всем диске.

Оставшееся зарегистрированное радиоизлучение приходит от горячих областей НИ в диске, особенно от наиболее ярких частей спиральных рукавов. Имеется сильный максимум радиоизлучения на расстоянии около 30 000 световых лет, где сосредоточен нейтральный водород и продолжается процесс звездообразования. Кольцо в форме бублика на расстоянии от ядра, примерно равном расстоянию от Солнца до ядра нашей Галактики, охватывает большую часть активных процессов в М 31.

Планетарные туманности в М 31 находятся в областях, заселенных в основном старыми звездами, особенно в центральном балдже, богатом гигантами. Недавно астрономы при помощи 120-дюймового телескопа Ликской обсерватории открыли лишь в небольшой области М 31 315 планетарных туманностей и оценили, что вся галактика содержит около 10 000 этих крохотных призрачных объектов.

Звезды и скопления. Рассеянные звездные скопления в Туманности Андромеды (фото L) так же малы и трудно обнаружимы, как и планетарные туманности. По-видимому, Хаббл нашел несколько скоплений, так как он привел пример такого объекта на фотографии в одной из своих статей. Но впоследствии никто не искал скопления и не смотрел на них вплоть до 80-х годов, когда с помощью 4-метрового телескопа Национальной обсерватории Китт Пик было открыто свыше 400 этих слабых нечетких объектов. Большинство объектов, которые удалось обнаружить, – это довольно молодые скопления вроде Двойного скопления в Персее (χ и h Персея) с возрастом менее 100 миллионов лет. Нет сомнений в том, что существуют тысячи других более старых скоплений, у которых звезды слишком слабы, чтобы быть обнаруженными, а общий блеск настолько мал, что оказывается ниже предела обнаружения.

Спиральная структура М 31 обрисована почти 200 большими звездными ассоциациями, которые удивительным образом отличаются от ассоциаций в окрестностях Солнца (фото LI). Они содержат те же виды ярких голубых звезд и газовых облаков, но почти в 10 раз больше местных ассоциаций. Средний поперечник ассоциаций в М 31 вместо 150 световых лет, как у хорошо известных ассоциаций нашей Галактики в Орионе и Стрельце, составляет около 1500 световых лет. Мы просто не знаем, почему имеет место такое различие: в других галактиках, таких как Магеллановы Облака, NGC 6822 и IC 1613, звездные ассоциации по размерам очень похожи на наши.

Шаровые скопления в М 31 увидеть легко, некоторые заметны даже в телескопы умеренных размеров (ярчайшие скопления имеют, блеск около 14 величины). Хаббл первым составил каталог почти 200 этих ярких, но не разрешаемых на звезды объектов, а в результате недавних усилий независимых групп астрономов в Калифорнии, Канаде, Италии и Советском Союзе это число утроилось. В настоящее время шаровые скопления используются в качестве зондов для исследования старого населения галактики и его истории, а также для определения общей массы галактики (фото LII).

Много лет назад Туманность Андромеды была единственной галактикой, для которой была оценена масса. Как мы уже видели, скорость орбитального движения звезды или газового облака вокруг галактики зависит от величины массы, заключенной внутри орбиты (а также, разумеется, от размеров орбиты). Строя график скорости, астрономы могут определять распределение массы в галактике, суммируя которое, получают общую массу.

Лучшие данные оптических наблюдений для М 31 указывали на то, что масса галактики примерно в два раза больше массы Млечного Пути и составляет около 200 000 000 000 масс Солнца (рис. 37). Однако, как это описано в главе 5, недавние радионаблюдения не согласуются с этим выводом. Большая часть М 31 находится далеко за пределами оптического изображения и даже за пределами радиограниц, — там, где мы ничего не видим. По-видимому, это характерно и для других галактик, включая нашу собственную. М 31 была первой галактикой, поставившей перед нами эту космическую загадку.

Спиральные рукава. Спиральные рукава Туманности Андромеды представляют собой еще одну загадку. Так как мы видим галактику под очень острым углом — ее плоскость наклонена всего на 12 градусов к лучу зрения, — то определить положение различных фрагментов структуры нелегко (фото LIII и рис. 38). Особенно трудно различить структуру из-за предполагаемого возмущения рисунка рукавов приливным воздействием со стороны М 32. Тем не менее, можно различить двухрукавный спиральный узор с рукавами, закрученными в ту же сторону, что и направление



Рис. 38. Сравнение рукавов нейтрального водорода с распределением рассеянных скоплений в М 31

М 31 лишь одного рукава и притом лидирующего, а не отстающего (то есть сначала идет внешний конец, являющийся передней частью, а не хвостом рукава относительно направления вращения галактики).

Это связанное с рукавами противоречие все еще не разрешено, но наиболее вероятным выводом является не очень регулярный характер рукавов у Туманности Андромеды, как и у многих других галактик: они не согласуются с современными теоретическими моделями, но имеют искажения, вызванные приливными эффектами, а также фрагментарны и не совершенны. Малый угол наклона плоскости галактики к лучу зрения лишь запутывает проблему, вселяя в нас надежду на большую регулярность, чем мы имеем основания ожидать от любой галактики.

М 33, ТУМАННОСТЬ ТРЕУГОЛЬНИКА

Не очень далеко от М 31 на небе в маленьком созвездии Треугольника находится другая спиральная галактика. Будучи легким объектом для наблюдения в небольшие телескопы, М 33 достаточно ярка, чтобы ее можно было с трудом увидеть невооруженным глазом, но только при почти идеальных условиях. Она меньше Туманности Андромеды и не такая яркая, а так как находится

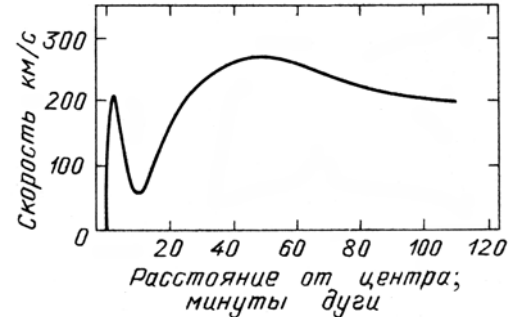


Рис. 37. Кривая вращения М 31, основанная на данных оптических наблюдений. Сравните с радиокривой вращения на рис. 24

вращения галактики. Теоретические модели галактик, похоже, указывают на то, что этот тип вращения с «отстающими» рукавами является наиболее распространенным. Но более детальные попытки распутать спиральную структуру привели к противоположным результатам. Группа французских астрономов нашла свидетельства в пользу возможного существования у

примерно на таком же расстоянии от нас, то это характеризует различие как видимых параметров, так и абсолютных. М 33 относится к другому хаббловскому типу, чем М 31, и является прекрасным образцом галактики типа Sc, в то время как М 31 — это пример галактики типа Sb. К тому же М 33 является объектом другого класса светимости: она относится к классу III, что указывает на ее относительно малую яркость. К счастью, М 33 лишь слегка наклонена к картинной плоскости, так что ее великолепные спиральные рукава, яркие облака газа и многочисленные яркие звезды оказались красиво разложенными перед нами для наблюдения и изучения (фото LIV).

Области III в М 33 гораздо интереснее и имеют гораздо более высокую светимость, чем соответствующие области ее более крупной соседки (фото LV). Подобно Магеллановым Облакам, М 33 содержит несколько по-настоящему гигантских газовых облаков: три из них настолько большие и яркие, что могут соперничать с великой туманностью 30 Золотой Рыбы. Крупнейшее и ярчайшее из них — NGC604 — содержит гнездо бешено горящих О-звезд с температурами, достигающими 50 000 К. Некоторые являются звездами Вольфа–Райе, горячие внешние атмосферы которых «выкипают» в интенсивном поле тепла и излучения, создавая яркие эмиссионные линии, по которым их легко узнать. Эти очень массивные, очень молодые звезды служат хорошими индикаторами активного звездообразования.

Звездные ассоциации в М 33 были в последнее время предметом пристального изучения. Всего их 143, и там сосредоточено большинство наиболее ярких звезд галактики. Спектры показывают, что ярчайшая звезда в М 33, расположенная в одной из этих ассоциаций, имеет абсолютную величину $-9,4$: ее светимость не так велика, как у ярчайших звезд Магеллановых Облаков (фото LVI). Несколько очень ярких звезд встречаются вне ассоциаций, вопреки нашим теоретическим моделям, утверждающим, что образование изолированных звезд почти невозможно. Еще много предстоит узнать о факторах, способствующих звездообразованию, особенно образованию больших массивных звезд между спиральными рукавами.

Спиральная структура М 33 типична для галактик типа Sc. Существуют два основных рукава, которые, однако, не прослеживаются на большие расстояния вокруг галактики, так как теряют свою четкость. Имеется 10 различных сегментов рукавов, и в них концентрируются звездные ассоциации, области III, звезды-сверхгиганты и соответствующие неразрешенные звезды галактики. С другой стороны, распределение пыли хаотично и само по себе не может использоваться для обнаружения спиральной структуры. Это странный результат: наши знания о спиральной структуре говорят нам, что пыль должна захватываться волной, удерживающей звезды и газ. Более того, пыль там необходима для выполнения трудной работы по звездообразованию. Во всяком случае, в некоторых галактиках пыль ведет себя хорошо и с удобствами располагается вдоль внутренней части спиральных рукавов, но в М 33 это не так. На разгадку этой тайны может потребоваться некоторое время, так как изучать пыль в галактике с нужной нам степенью подробности нелегко. Карту распределения пыли в галактике можно построить по поглощению света рукавов, но будет очень трудно определить, откуда пыль возникла, как она оказалась там, где она сейчас находится, из чего она состоит и как движется.

Астрономов долго интриговали звездные скопления в М 33. Хаббл нашел несколько объектов, которые, по его мнению, могли быть шаровыми скоплениями, но он обратил внимание на то, что эти объекты значительно менее яркие, чем шаровые скопления в М 31. Более недавние работы показали, что у шаровых скоплений М 33 в среднем не те цвета, что у обычных шаровых скоплений. Большинство исходных 15 шаровых скоплений Хаббла голубые и по цвету похожи на относительно молодые рассеянные скопления нашей Галактики вроде Плеяд. Очевидно, это на самом деле просто богатые рассеянные скопления: светимость ярчайшего из них должна превосходить светимость Плеяд лишь в 2–3 раза, а это не особенно большое скопление. Таким образом, большинство объектов являются довольно молодыми скоплениями вроде голубых шаровых скоплений Магеллановых Облаков. Недавние более полные обзоры выделили несколько сотен кандидатов, большинство из которых является рассеянными скоплениями. Лишь несколько кандидатов могут быть настоящими шаровыми скоплениями, и они являются плохими образцами своего класса — у них низкая светимость и небольшие размеры.

Вопрос о том, почему М 33 столь бедна настоящими шаровыми скоплениями в то время, как М 31 столь богата ими, очень важен. Можно предполагать, что это может быть также результатом ее принадлежности к другому хаббловскому типу. По-видимому, шаровые скопления в таком большом количестве или таких больших размеров не образуются в галактиках типа Sc или Irr I. Это согласуется с отсутствием у таких галактик центральных балджей, состоящих из старых звезд.

По-видимому, в них не происходило столь интенсивного звездообразования вблизи начальной эпохи, когда галактики только что сконденсировались из космического облака.

Для М 33 была построена карта распределения нейтрального водорода, и оказалось, что он ведет себя довольно хорошо. Он распределен по всему изображению галактики и не простирается слишком далеко за пределы видимого диска. Распределение скоростей довольно регулярное и указывает на то, что большая часть газа обращается вокруг ядра по круговым орбитам. Суммарная масса внутри самой удаленной точки, где проводилось измерение, составляет около 20 миллиардов масс Солнца, что существенно меньше массы М 31.

Наконец, мы подходим к странной истории с цефеидами в М 33. Хаббл открыл несколько таких звезд и применил зависимость период–светимость для определения расстояния до галактики. Недавно Сэндидж вернулся к теперь уже более чем 50-летней давности исходным данным Хаббла, долго пролежавшим в пыльном ящике, и нашел, что для более точного переопределения расстояния эти измерения можно использовать вместе с современными калибровками (глава 10). Когда он обнаружил, что хаббловские звездные величины слабых звезд весьма ошибочны (завышение потока от звезд превышало 75 %), Сэндидж пришел к выводу о том, что М 33, соответственно, дальше от нас, чем считалось. За все годы, прошедшие после статьи Хаббла, никто не повторял исследование цефеид и расстояние до М 33, используемой в качестве фундаментального калибратора для более далеких галактик, определялось главным образом на основании очень старых и очень шатких данных. Используя свои новые более надежные слабые стандарты для получения данных о еще большем числе цефеид, особенно о тех, что расположены во внешних частях М 33, где не так трудно проводить фотометрические наблюдения, Сэндидж получил результаты, хорошо согласующиеся с пересмотренной версией исходной хаббловской диаграммы период–светимость. Итак, большее значение расстояния до М 33, вероятно, является правильным. Такой пересмотр расстояния сделал бы светимости шаровых скоплений М 33 немного более нормальными. Это, однако, еще не последнее слово.

Группа астрономов университета Торонто испытывала новый метод наблюдения цефеид, который позволяет избежать многих трудностей, вызываемых расположенной между нами и звездами пылью. Хаббл полностью игнорировал пыль, так как в то время не было известно, что она представляет столь всепроникающую проблему, а Сэндидж для учета ее влияния использовал многоцветную фотометрию. Но астрономы из Торонто обошли в значительной мере проблему пыли, наблюдая цефеиды в инфракрасном свете, который в гораздо меньшей степени подвержен влиянию пыли, чем видимое излучение. Их результаты для М 33 не согласуются с результатами Сэндиджа, и разница составляет около одной звездной величины, что возвращает М 33 обратно на расстояние, полученное по исходной хаббловской фотометрии. Таким образом, надо еще раз посмотреть на цефеиды. Они играют ключевую роль в определении расстояния до М 33 и являются частью каркаса всей шкалы расстояний до галактик (см. главу 10). Пока мы не разберемся с цефеидами М 33, не следует слишком удивляться, если иногда наши шкалы расстояний будут давать противоречивые результаты.

Самый последний сюрприз М33 преподнесла в 1983г. Спутник «Эйнштейн» с рентгеновским телескопом обнаружил в ядре М 33 рентгеновский источник. В диске были найдены другие источники: это, вероятно, главным образом остатки сверхновых и двойные системы с нейтронной звездой. Рентгеновский источник в ядре, однако, особенный и похож на рентгеновские источники, связанные с активными ядрами галактик: эти замечательные объекты населяют центры спиральных сейфертовских галактик и квазаров (главы 11 и 12). Ядро М 33 несравнимо менее мощное и является очень небольшим представителем этого класса, хотя оно в 10 раз мощнее объекта в ядре М 31 и более чем в 10 000 раз мощнее источника в ядре нашей Галактики. Необычной особенностью М 33-Х-8 (так называется источник) является то, что он не проявляет себя ни на каких других длинах волн. Многие активные ядра галактик являются сильными излучателями на всех длинах волн – от рентгеновских до радиоволн. Но странное ядерное образование М 33 (возможно, черная дыра или другой сколлапсировавший объект) излучает всю свою мощность в рентгеновском диапазоне. В этом диапазоне оно светит в миллион раз ярче, чем Солнце на всех длинах волн.

Глава 9

СКОПЛЕНИЯ И СВЕРХСКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Внимательный взгляд в большой телескоп почти на любую часть неба выявляет большое число находящихся почти на пределе видимости расположенных группами слабых изображений (фото LVII). Это скопления далеких галактик. Изучая их, можно много узнать о ранней Вселенной и о том, как появились на свет галактики. Скопления служат ключом к замечательным событиям, которые произошли в эпоху отделения вещества от излучения и начала грандиозной организации вещества в нашу Вселенную.

БОГАТСТВО

Скопления галактик бывают разными по населенности – от скудных объектов вроде Местной группы до огромных, содержащих многие десятки тысяч галактик-членов, вроде скопления в Волосах Вероники. Астрономы называют число галактик в скоплении его богатством. Видимое богатство скопления сильно зависит от мощности наблюдательных средств. Если бы наша Местная группа наблюдалась с одной из далеких галактик, то небольшой телескоп выявил бы лишь слабо связанную ассоциацию из трех галактик (Млечного Пути, М 31 и М 33). При фотографировании нашей группы с применением длительной экспозиции пробелы начнут заполняться: станут видны NGC 205, М 32 и Магеллановы Облака. Но только при наблюдении в очень мощный телескоп может появиться шанс разглядеть многочисленные карликовые галактики нашей группы – такие, как систему в Скульпторе или IC 1613. Поэтому при наблюдении далекого скопления галактик наши суждения о его богатстве будут несколько субъективными и зависеть от расстояния до скопления и размеров телескопа.

Стремясь поставить все скопления в более или менее равные условия, астрономы определяют богатство скопления как число содержащихся в нем галактик в определенном интервале блеска. Например, великий создатель каталогов скоплений галактик Джордж Эйбелл определяет населенность скопления по следующему правилу: считаются все галактики слабее третьей по светимости в скоплении и попадающие по блеску в интервал шириной в две звездные величины. Он выбрал третью, а не первую по светимости галактику, чтобы избежать проблем, связанных с тем, что первая (или вторая) по блеску галактика может оказаться ярким объектом переднего фона: в эпоху создания Эйбеллом первого в своем роде каталога (полученного по результатам исследования фотопластинок атласа Паломарского шмидтовского телескопа 50-х годов) расстояния до галактик еще не были известны. По критерию Эйбелла скопления галактик в его каталоге (в который не были включены небольшие группы вроде нашей Местной группы) имеют богатство примерно от 50 до 100. Разумеется, общее число галактик в этих скоплениях гораздо больше и для большинства изученных Эйбеллом скоплений составляет несколько тысяч объектов. Мера богатства снимает одни только сливки.

ТИПЫ СКОПЛЕНИЙ

Богатство – это лишь один из способов проявления различий между скоплениями галактик. Эйбелл отметил также, что некоторые скопления выглядят гораздо правильнее других, и разделил скопления по степени правильности формы на два класса. В последние годы было придумано несколько различных систем классификации, но все они в основе своей признают связь типов галактик скоплений (спиральные, эллиптические, неправильные) с их формой. Ровные скопления правильной формы состоят, в основном, из эллиптических галактик и галактик типа S0, а бесформенные неправильной формы скопления содержат много спиральных и неправильных галактик.

Скопление в Волосах Вероники является эффектным примером правильного скопления (фото LVIII). Оно компактное и концентрируется к центру, где находятся несколько ярких гигантских галактик, ярчайшая из которых – NGC 4889 – имеет 13-ю величину. У этой эллиптической галактики достаточно большие размеры и достаточно высокая светимость, чтобы называться галактикой типа cD – этот тип зарезервирован за чрезвычайно огромными эллиптическими галактиками, которые очень часто расположены в центрах правильных скоплений и оказываются радиоисточниками. Мы вернемся к этим объектам и их замечательной истории несколько позже в этой главе.

В скоплении в Волосах Вероники очень мало спиральных галактик и большинство их расположено во внешних областях скопления. Концентрация эллиптических галактик в центре очень высокая, а по мере удаления от центра плотность резко падает. Подобно многим правильным скоплениям, скопление в Волосах Вероники является источником радиоизлучения. Некоторые скопления этого типа являются удивительно мощными источниками радиоизлучения, исходящего от нескольких больших активных галактик и общего фона межгалактического газа. В отдельных скоплениях этот газ можно даже «увидеть»: продираясь сквозь него, радиогалактики оставляют за собой закрученные струи наподобие развевающихся на ветру шлейфов.

Примерно треть всех правильных скоплений излучают в рентгеновском диапазоне – еще один признак горячего межгалактического газа (фото LIX). В этом случае рентгеновское излучение исходит от газа с температурой около 100 000 000 К. Наилучшее объяснение состоит в том, что этот излучающий в рентгеновском диапазоне газ появляется при бурных столкновениях галактик между собой, когда они выметают друг у друга межзвездный газ и становятся похожими на лишенные газа галактики типа S0. Газ каждой из галактик нагревается столкновением и остается вблизи места встречи, где и смешивается с горячим газом от других столкновений и образует межгалактическую среду скопления.

Плотности правильных скоплений достаточно высоки (особенно вблизи центра), чтобы подобные столкновения могли иметь место, хотя не все согласны с тем, что сближения могут быть достаточно частыми для объяснения наблюдаемой концентрации галактик типа S0 в центрах таких скоплений.

Вальтер Бааде и Лайман Спитцер впервые выдвинули эту гипотезу еще в 1951 г., когда шкала расстояний считалась значительно более короткой, чем сейчас. В новой шкале (см. главу 10) галактики в скоплении находятся гораздо дальше друг от друга и не имеют возможности сталкиваться так часто, как это получалось из первоначальных расчетов. Быть может, столкновения происходили главным образом на ранних стадиях существования Вселенной, когда галактики еще только формировались и сама Вселенная была поменьше. Во всяком случае вблизи центров правильных скоплений действительно наблюдается необычно много галактик типа S0 при отсутствии спиральных галактик.

С другой стороны, в неправильных скоплениях много спиральных галактик. Структура этих скоплений открытая со слабой центральной концентрацией. Лишь каждое четвертое из них излучает радиоволны и менее 10% являются рентгеновскими источниками. Столкновения между отдельными членами должны быть настолько редкими, что число галактик типа S0, создаваемых посредством механизма «выметания» (а он считается основным механизмом образования таких галактик в правильных скоплениях), невелико. К тому же в этих скоплениях меньше горячего газа и поэтому в радио- и рентгеновском диапазонах они ведут себя довольно спокойно.

Хорошим примером неправильного скопления является скопление галактик в Деве (фото LX). Занимая на небе область размером несколько градусов, это скопление содержит много больших великолепных спиральных галактик вроде M 100 и M 61 (фото LXI). Оно настолько слабо концентрировано, что без тщательного подсчета отдельных членов трудно определить положение центра. Внутри него находятся субскопления, а все скопление окружено многочисленными маленькими группами, которые простираются на большие расстояния. Наша Местная группа, по-видимому, является далеким пригородом более крупной системы в Деве.

Чтобы продолжить эту урбанистическую аналогию, сравним различные типы скоплений с разного рода городами. Правильные скопления похожи на Нью-Йорк с сильной концентрацией к центру города – Манхэттену, где расположено много более или менее похожих друг на друга гигантских зданий. Неправильные скопления больше напоминают Лос-Анджелес, расползшийся по пригородам и со слабой концентрацией в центре. Центральная область содержит несколько больших зданий разной формы, но на расстояниях в несколько миль от нее имеются другие местные населенные центры. Трудно решить, где, строго говоря, заканчивается город: он просто постепенно сходит на нет на больших расстояниях от центра, где все еще встречаются несколько концентраций, которые могут принадлежать центральному городу (правда, некоторые будут оспаривать это) (фото LXII).

Мы живем в бедной неправильной группе галактик, члены которой для нас не слишком очевидны, когда мы смотрим в глубины космоса. Что бы мы увидели, если бы жили внутри одного из больших скоплений вроде скопления в Волосах Вероники? Плотность галактик вблизи центра такого скопления весьма велика – около 3000 галактик на кубический мегапарсек для верхнего интервала в 8 звездных величин. (Мегапарсек – это 1 000 000 парсеков, то есть 3,26 миллиона свето-

вых лет, так что кубический мегапарсек равен 35 миллиардов миллиардов кубических световых лет). Верхний интервал в 8 звездных величин включает все гигантские галактики и простирается по светимости вплоть до таких слабых галактик как NGC 6822, но не содержит экстремально карликовых галактик вроде Скульптора. Галактики настолько упакованы, что среднее расстояние между ними составляет около 150 000 световых лет и примерно равно расстоянию между Млечным Путем и Магеллановыми Облаками. Если бы мы находились в таком скоплении, то ночное небо оказалось бы заполненным сотнями галактик, достаточно ярких, чтобы быть легко видимыми без телескопа. Это было бы грандиозное зрелище.

КАННИБАЛИЗМ

Мы увидели, что галактики типа S0 считаются результатом столкновения двух прошедших друг сквозь друга больших спиральных галактик. А что происходит при сближении небольшой галактики с гораздо более крупной? Если скорость сближения не слишком велика, то более массивная галактика может просто проглотить вторую, включив ее звезды в состав более крупной системы. В настоящее время этот процесс лучше всего объясняет происхождение гигантских галактик типа cD вблизи центров некоторых правильных скоплений. Галактика, поедающая другие галактики, называется галактикой-каннибалом. У такой галактики можно ожидать наличия протяженной внешней оболочки – как это наблюдается у некоторых галактик типа cD, а иногда и наличия, по причине неполного переваривания недавней трапезы, более одного ядра – и это наблюдается у некоторых галактик типа cD. Такая галактика будет страдать избыточным весом (после поглощения других галактик ее масса превысит массы более нормальных галактик), расположится вблизи центра скопления и как самый массивный его член будет определять движения остальных галактик. Жестокий характер трапезы приведет к появлению видимой в радиодиапазоне горячей плазмы. Все это действительно наблюдается у галактик типа cD и доказательств их происхождения в результате актов каннибализма больше чем достаточно. К счастью, галактики-каннибалы встречаются редко, и только в плотных центрах гораздо более богатых, чем наша Местная группа скоплений. Мы избежали неприятной участи стать пожирателями других или самим оказаться съеденными.

СВЕРХСКОПЛЕНИЯ

Несколько первых исследователей галактик заметили у некоторых скоплений тенденцию собираться в еще более крупные скопления. Впечатляющим примером является концентрация близких к нам групп вокруг скопления в Деве, образующих так называемое Местное сверхскопление. Эйбелл обнаружил признаки образования такого рода сверхскоплений, исследуя свой каталог скоплений. Обнаруженные им группы имели в поперечнике около 100 миллионов световых лет и содержали в среднем по 6 скоплений. В последние годы существование сверхскоплений было подтверждено. Чтобы быть уверенными в реальности таких групп, необходимо подвергнуть их разного рода статистическим тестам: удивительно легко обнаружить несуществующее скопление, и поэтому астрономы проявляют в этом большую осторожность. Большинство тестов указывают на то, что скопления галактик часто собираются в группы с диаметрами примерно от 100 до 1000 миллионов световых лет и массами около 10^{16} масс Солнца. На вид большинство групп не круглые, а длинные и узкие. Местное сверхскопление является единственным со значительной центральной концентрацией (она расположена в области скопления в Деве). Похоже, что другие хорошо изученные экземпляры не имеют особо плот-

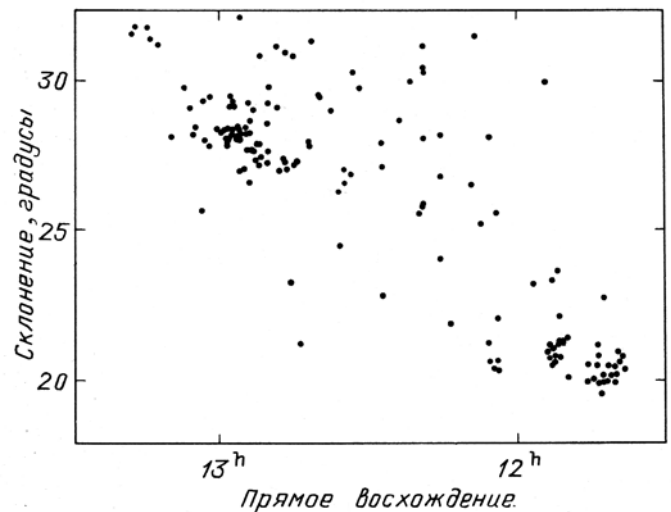


Рис. 39. Положение на небе галактик сверхскопления Волосы Вероники – A 1367. Все галактики на этой карте находятся от нас примерно на одинаковом расстоянии – около 300 миллионов световых лет

ной центральной части, а представляют собой слабо связанные группировки из примерно одинаковых скоплений (рис. 39). Центр Местного сверхскопления находится от нас на расстоянии около 60 миллионов световых лет, а его диаметр составляет около 120 миллионов световых лет. Сверхскопление имеет уплощенную форму с отношением большой оси к малой около 6.

Гораздо более крупным образцом является сверхскопление в Северной Короне. Оно находится в полумиллиарде световых лет от нас и его диаметр превышает миллиард световых лет, т. е. сверхскопление, когда мы смотрим в направлении созвездия, занимает значительную часть видимого пространства.

Сверхскопления как тип объектов довольно сильно отличаются от звездных скоплений и скоплений галактик. Дело в том, что с динамической точки зрения это довольно неопределенные образования, так как времени жизни Вселенной было недостаточно, чтобы отдельные члены системы успели откликнуться на гравитационное притяжение друг друга. Типичное время пересечения скоплением сверхскопления составляет около 300 миллиардов лет, что во много раз больше возраста Вселенной. Этим очень просто объясняется отсутствие у сверхскоплений правильной структуры и концентрации к центру – и то и другое возникает в результате гравитационного взаимодействия и перемешивания.

Происхождение сверхскоплений – это интригующая загадка. Согласно некоторым данным, «строительство» сверхскоплений, по-видимому, началось задолго до образования самих галактик. Выдвинуты теории происхождения сверхскоплений из флуктуации плотности вещества в ранней Вселенной. С другой стороны, есть основания считать, что сверхскопления возникли из «небольших» флуктуаций пространственной кривизны с возмущениями плотности как вещества, так и излучения. Проблема происхождения скоплений и сверхскоплений галактик – это самая интересная и трудная задача из стоящих перед современной космологической наукой.

ПУСТОТЫ

В 1981 г. газеты сообщили об открытии огромной области пространства размером со сверхскопление, почти лишенной как отдельных галактик, так и их скоплений. Открывшие эту область астрономы назвали ее пустотой и обратили внимание на то, что космологи должны уметь объяснять отсутствие галактик так же, как и их наличие. Сейчас известно еще несколько пустот, крупнейшая из которых имеет размер 2 миллиарда на 1 миллиард световых лет. Вместе с этими открытиями пришло понимание того, что галактики – это не просто объекты, которые иногда собираются в скопления. Вместо этого оказалось, что, по крайней мере в некоторых частях Вселенной, галактики образуют сеть с большими пустотами в промежутках между ними. Эти две концепции подобны позитиву и негативу. Существуют ли галактики группами, погруженными в матрицу из ничего или же группы из ничего погружены в матрицу из галактик? Теоретикам больше нравится вторая картина, предсказываемая некоторыми моделями ранней Вселенной. Они говорят, что Вселенная напоминает здание: вещество расположено главным образом в каркасе из стен, полов и потолков, но именно пустое пространство комнат делает из здания дом.

Глава 10

ШКАЛА РАССТОЯНИЙ

В пределах нескольких миллионов километров астрономы нашли удивительно надежные – с точностью лучше одной миллионной ($1:10^6$) – способы измерения расстояний. Но во внегалактическом пространстве, где расстояния измеряются единицами 10^{20} – 10^{24} км, имеющиеся методы применимы с трудом и точность их невелика. Учитывая огромную трудность задачи, мы должны чувствовать себя счастливыми уже оттого, что в настоящее время спор может идти всего лишь о 50%-ной неопределенности. Но такова природа науки, и нам хочется знать расстояния с гораздо большей точностью. Героические усилия по максимальному совершенствованию методов привели к удивительной ситуации, когда исследователи разделились на сторонников двух очень различных подходов к проблеме и появились две явно разные шкалы расстояний.

ХАББЛОВСКАЯ ШКАЛА РАССТОЯНИЙ

Начав в 20-х годах с пионерской работы о галактиках Местной группы, Хаббл приступил к реализации тщательно разработанной программы построения шкалы расстояний, простирающейся до края наблюдаемой Вселенной (рис. 40). Сначала его подход был грубым и слишком сильно зависел от соображений однородности. Но он привел к первой реальной оценке огромности космоса и положенные в его основу принципы использовались большинством астрономов последующих поколений.

Первой задачей Хаббла было определение расстояний до членов Местной группы. Особое внимание он уделил галактикам М 31, М 33 и NGC 6822, где им были открыты цефеиды, для которых можно было использовать зависимость период–светимость. Результаты Хаббла для этих трех галактик вместе с данными Шепли для Магеллановых Облаков и проведенными Бааде исследованиями разрешаемых на звезды галактик Местной группы образовали базу и первую ступень трехступенчатой хаббловской шкалы расстояний во Вселенной. Теперь, благодаря пересмотренной зависимости период–светимость для цефеид и более точным оценкам блеска слабых звезд, у нас есть более качественные оценки расстояний до этих галактик. Все эти галактики оказались в два-три раза дальше, чем вначале считал Хаббл. Но расстояния до галактик Местной группы до сих пор остаются фундаментом большинства шкал расстояний.

Далее план Хаббла состоял в использовании близких галактик и их расстояний для калибровки светимостей более ярких, чем цефеиды, объектов с тем, чтобы измерять расстояния до более далеких областей пространства, где цефеиды уже недоступны 100-дюймовому телескопу. Испробовав объекты разных типов, включая красные гиганты, звездные скопления, области HII, новые и т. д. Хаббл обнаружил, что максимальные светимости ярчайших звезд во всех галактиках довольно одинаковы и мало меняются при переходе от одной галактики к другой. Следовательно, видимый блеск самых ярких звезд галактики зависит от расстояния до галактики от наблюдателя. Большая коллекция пластинок многочисленных галактик с разрешаемыми ярчайшими звездами дала Хабблу в руки доказательства обоснованности его подхода. Хаббл собрал оценки блеска ярчайших звезд в большом списке галактик и в качестве второго шага прокалибровал расстояния до них, сравнивая эти значения блеска со светимостями самых ярких звезд в галактиках Местной группы, расстояния до которых были известны по цефеидам. Наконец, хаббловский список разрешаемых на звезды галактик дал ему оценку полной светимости галактик и дисперсии этой величины. Далее, на третьем шаге он применил эти значения светимостей к еще более далеким галактикам за пределом, где разрешаются отдельные звезды. Этот последний шаг можно было «дотянуть» до края видимой Вселенной, и он подвел Хаббла к самому честолюбивому и грандиозному из его замыслов – определению размеров и формы всей Вселенной.

В этот период Хаббл, В. М. Слайфер, Мильтон Хьюмасон и другие астрономы занимались фотографированием спектров галактик и обнаружили, что некоторые из галактик, согласно результатам измерений доплеровского смещения спектральных линий, движутся с поразительными скоростями^{*)}. В 1928 г. космолог Н. П. Робертсон обратил внимание на корреляцию этих скоростей с блеском галактик – скорости далеких галактик больше у более слабых объектов. Примерно в это же время Хаббл показал, что это свидетельствует о таком расширении Вселенной, что скорость относительного движения галактик прямо пропорциональна расстоянию между ними. Почти

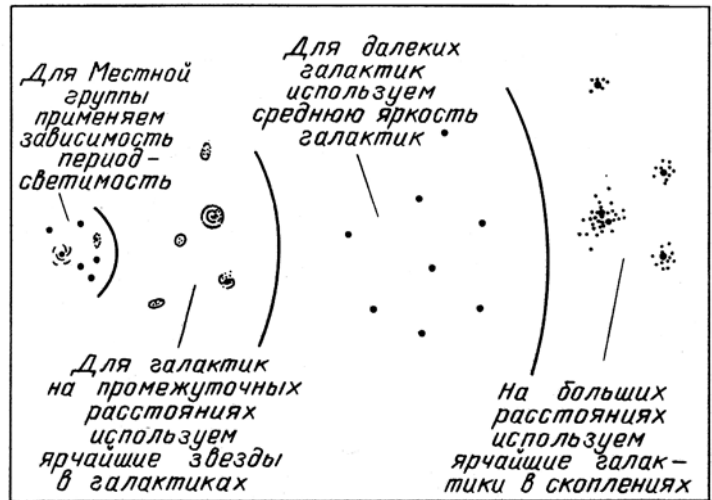


Рис. 40. План Хаббла для определения расстояний до самых слабых и далеких галактик

^{*)} Эффект Доплера представляет собой изменение длины волны наблюдаемого света от объекта, который приближается к наблюдателю или удаляется от него. Если объект приближается, то возникает фиолетовое смещение, а если удаляется, то красное.

у всех галактик наблюдались красные смещения, что говорило о том, что они от нас удаляются: голубые смещения были лишь у нескольких галактик нашей Местной группы и у нескольких членов близких скоплений. Например, оказалось, что галактика в Андромеде движется к нам со скоростью 300 км/с. Но это частично связано с ее членством в гравитационно взаимодействующей группе (быть может, мы с ней находимся в квазиорбитальном движении) и частично с орбитальным движением нашего Солнца в Млечном Пути. Но все более далекие галактики от нас удаляются. Например, средняя скорость удаления от нас галактик скопления в созвездии Девы составляет 1000 км/с. В настоящее время астрономы обнаружили объекты, удаляющиеся со скоростями, равными 80 и более процентов скорости света. Связь между скоростями галактик и расстояниями до них известна под названием *закона Хаббла*, а коэффициент пропорциональности называется *постоянной Хаббла H* (рис. 41). Сейчас исследователи обычно обозначают ее H_0 – индекс говорит о том, что речь идет о современном значении, так как в прошлом величина постоянной могла быть иной (это, разумеется, наблюдается на больших расстояниях) в зависимости от того, происходило ли расширение Вселенной с постоянной скоростью, либо оно замедлялось или ускорялось. В последние годы жизни Хаббла было завершено строительство 200-дюймового телескопа на горе Паломар (Маунт Паломар) и Хаббл приступил к применению этого мощного инструмента для исследования Вселенной на все больших расстояниях, для проникновения во все более далекое прошлое.

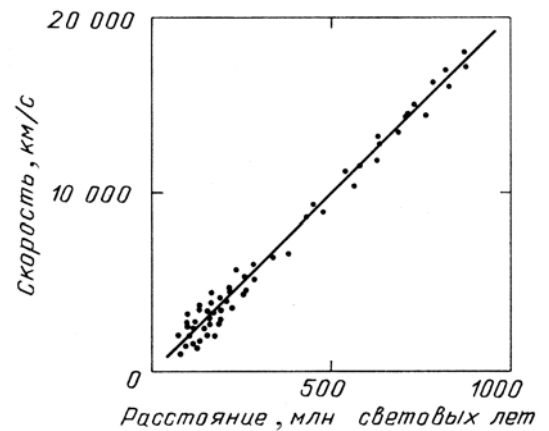


Рис. 41. Зависимость Хаббла между скоростью удаления галактик и их видимым блеском

ВЛИЯНИЕ, КОТОРОЕ ОКАЗАЛ ПАЛОМАР

Значительное событие на пути к надежной шкале расстояний во Вселенной произошло в 1958 г., когда Алан Сэндидж, на плечи которого за пять лет до этого легла мантия Хаббла, прочел лекцию по случаю присвоения ему Уорнеровской премии Американского астрономического общества, присуждаемой молодым астрономам за выдающиеся достижения. Премия была присуждена за пионерскую работу по звездной эволюции, но лекция была посвящена шкале расстояний и вызвала сенсацию. Сэндидж продемонстрировал некоторые из первых результатов по этой проблеме, полученных на Паломарском телескопе. Переработав исходную хаббловскую выборку галактик при помощи нового большого телескопа и более изощренных методов, Сэндидж нашел в предыдущих работах несколько грубых ошибок, особенно в определении самых ярких звезд в галактиках. В 1936 г. Хаббл предупреждал, что определение ярчайшей звезды в галактике – это нетривиальная проблема: при наблюдении с большого расстояния звездные скопления, звездные облака и области НП могут иметь звездообразный вид. Поразительный вывод, сделанный Сэндиджем в 1958 г., состоял в том, что на самом деле это очень сильно повлияло на расстояния самого Хаббла. Вместе с более ранними поправками результаты Сэндиджа привели к шкале расстояний, в семь раз превосходящей хаббловскую шкалу 1936 года. Сэндидж, например, установил, что скопление в Деве, расстояние до которого Хаббл оценил в 7 миллионов световых лет, удалено от нас на 50 миллионов световых лет. Вся Вселенная оказалась намного более обширной, чем считалось.

Сэндидж продолжил работу над этой проблемой со все большей тщательностью, повышая надежность каждого шага. В 1974 г. он с сотрудниками начал публикацию серии статей, в которых еще раз вернулся к проблеме шкалы и на этот раз добавил новые промежуточные ступеньки для укрепления наиболее слабых мест в дерзком плане Хаббла. Им удалось распространить применение цефеид за пределы Местной группы, опробовав 200-дюймовый телескоп на спиральной галактике NGC 2403 – одной из галактик в небольшой группе на расстоянии 10 миллионов световых лет (фото LXII и LXIV). С двумя группами калибровочных галактик (всего 11 объектов) они разработали вспомогательный метод, позволивший выйти в трудную для шкалы область, названную «сумеречной зоной», – между 50 и 300 миллионами световых лет. Именно здесь хаббловские исследования свернули с правильного пути – там, где он принял объекты других типов за ярчайшие звезды. В подходе Сэндиджа в качестве нового индикатора расстояния использовались размеры

крупнейших областей НП в галактике, так как области НП разрешимы до скопления в Деве и даже дальше. Они дали независимый критерий, в меньшей мере подверженный систематическим погрешностям, чем критерий самой яркой звезды. Наряду с этим критерием астрономы добавили к своей калибровочной базе третью группу галактик с гигантской спиральной галактикой М 101 в центре.

ПРОБЛЕМА СКОПЛЕНИЯ В ДЕВЕ

Между тем скопление в Деве как источник информации о шкале расстояний и постоянной Хаббла попало по весьма замечательной причине в немилость. Хотя многие астрономы в течение многих лет пытались убедить всех в том, что мы находимся во внешней части скопления в Деве, все же неопровержимые доказательства появились только в середине 70-х годов. К этому времени были измерены скорости достаточно большого числа галактик по всему небу (особенно в ходе обширного проекта Гарвард-Смитсоновских обсерваторий имени Уиппла) для выявления и интерпретации анизотропии*) движений галактик. Будучи все еще противоречивыми, наблюдательные данные, судя по всему, убедительно свидетельствуют о падении нашей Галактики и Местной группы на расположенный вблизи скопления в Деве центр громадного сверхскопления.

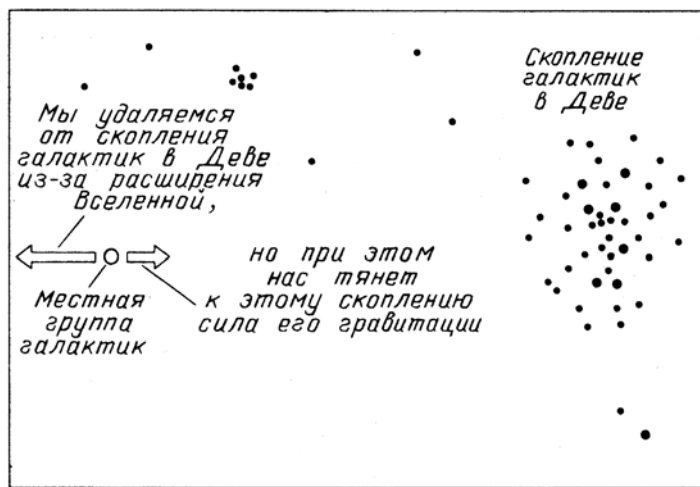


Рис. 42. Проблема скопления в Деве: как отделить скорость общего расширения Вселенной от любой локальной скорости, являющейся результатом движения нашей Местной группы в направлении скопления под действием его гравитационного притяжения

наша Местная группа гравитационно связана с этим сверхскоплением, то измеренные значения скоростей галактик в Деве не дают – из-за наличия дополнительного движения – правильной величины скорости расширения Вселенной. Сам по себе этот факт является важным ключом к проблеме образования скоплений галактик и путей организации Вселенной в ее сложное современное состояние. Но это обстоятельство затрудняет определение расстояний во Вселенной (рис. 42).

Один из методов исследования этой проблемы состоит в определении наблюдаемых параметров, в особенности блеска и цвета, большого числа галактик внутри и вне скоплений. Сравнение галактик поля с галактиками скопления в Деве показывает, что

Местная группа падает на центр сверхскопления в Деве со скоростью около 290 км/с. Другие комбинации расстояний до галактик и их движений приводят к значению 255 км/с для скорости движения Местной группы примерно при том же направлении движения. Открытое в 1965 г. космическое фоновое излучение, признанное реликтовым излучением эпохи начала существования Вселенной, тоже демонстрирует анизотропию примерно такой же величины и примерно в том же направлении.

ЭФФЕКТЫ СВЕТИМОСТИ

Важным элементом последнего шага на пути к шкале расстояний во Вселенной является классификация галактик по светимостям (глава 1). Сэндидж со своими коллегами использовал эту классификацию, прокалибровав ее на материале близких групп, и определил расстояния до 60 далеких галактик высокой светимости (класса ScI) со скоростями в интервале от 3 000 до 15 500 км/с. Сравнение расстояний со скоростями дало ученым ответ: постоянная Хаббла еще меньше (а, следовательно, размеры Вселенной еще больше), чем считалось до этого. Если Хаббл получил для H_0 значение 160 км/(с × миллион световых лет), уменьшенное Сэндиджем в 1958 г. до 23 км/(с ×

*) Анизотропия является мерой отклонения от изотропной Вселенной, в которой скорости во всех направлениях в точности совпадают.

× миллион световых лет), то теперь Сэндидж говорил о величине 15 км/(с × миллион световых лет) с погрешностью, оцениваемой в 10%.

ДВА РАЗНЫХ ПОДХОДА

Пока что история развития современной шкалы расстояний во Вселенной излагалась в основном с точки зрения Хаббла и его интеллектуальных последователей. Однако полная история проблемы должна включать других астрономов, сделавших в поисках более качественных расстояний много нового и оригинального. Полученный некоторыми из них окончательный ответ существенно отличается от результата Сэндиджа.

Жерар де Вокулёр сам долгое время занимался получением и сбором наблюдательных данных о галактиках. Перепробовав за много лет значительное количество различных методов измерения расстояний, в 1978 г. он, наконец, осуществил обширное исследование шкалы расстояний с другой точки зрения, отвергнув принципы и в значительной степени изменив методику Хаббла и Сэндиджа. Вместо того, чтобы получать в разных режимах расстояния, опираясь на один или два «наилучших» или наиболее надежных критерия, де Вокулёр был сторонником применения множества различных индикаторов, исходя из того, что если тот или иной из них окажется ошибочным, то применение многих индикаторов смягчит влияние ошибки. Он собрал множество данных по литературе и очень подробно обработал их, используя статистический подход. В то время как полученное Сэндиджем значение H_0 опирается главным образом на 5 индикаторов расстояния, де Вокулёр ввел их целых 13!

Две шкалы расстояний начали расходиться уже в нашей собственной Галактике, и различные подходы к проблеме поглощения света межзвездной пылью привели к разным расстояниям даже для самых близких галактик (фото LXV). Сэндидж определял поглощение пылью в нашей Галактике, измеряя (или принимая полученные другими данные измерений) величину вызываемого пылью покраснения света для каждой калибровочной галактики в отдельности. Это привело Сэндиджа и его сотрудников к очень маленьким значениям поглощения в направлении полюсов нашей Галактики (широта 90°) и принятию ими нулевого поглощения для галактических широт, превышающих 50° . Де Вокулёр, однако, подошел к проблеме совершенно иначе. Он собрал средние цвета всех исследованных галактик фона, разбил их на группы по морфологическому типу и углу наклона и получил статистическую зависимость, связывающую исправленные цвета с галактической широтой и долготой. Аналогичным образом он исследовал подсчеты галактик и провел сравнение содержания в них водорода (определенное в радиодиапазоне) с оптическими светимостями. Проанализировав эти данные с помощью уравнения, описывающего влияние поглощения в Галактике, и соединив потом полученные результаты с результатами определения цветов галактик, он вывел статистическое соотношение, которое потом применил ко всем галактикам для определения их истинных цветов, свободных от поглощения и покраснения.

Результатом на больших расстояниях, где уже несущественны локальные эффекты, явилась почти в точности в два раза более короткая, чем у Сэндиджа, шкала расстояний. Это значит, что размер Вселенной де Вокулёра составляет всего половину размера Вселенной Сэндиджа, а его постоянная Хаббла в два раза больше, чем у Сэндиджа.

НЕКОТОРЫЕ ИЗ НЕДАВНИХ ДОСТИЖЕНИЙ

В последние годы построением шкалы расстояний стали заниматься также другие астрономы. Одним из важнейших новых достижений было появление и применение метода ширины линии HI с использованием так называемого соотношения Талли–Фишера (рис. 43). Этот метод основан на удивительно тесной корреляции ширины линии нейтрального водорода (HI), служащей мерой общей дисперсии скоростей газа, со светимостью галактики. Хотя это открытие эмпирическое, его можно объяснить через зависимость между массой галактики и распределением этой массы и общим числом звезд. Впоследствии оба противоборствующих лагеря применили соотношение Талли–Фишера и оба получили результаты, согласующиеся с их собственными сильно различающимися между собой шкалами расстояний! Ус-

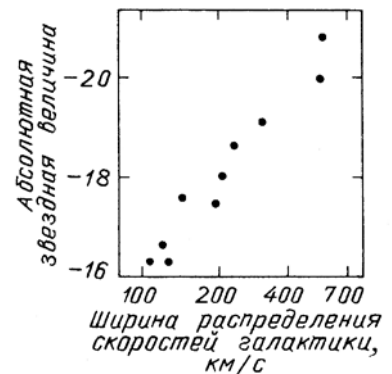


Рис. 43. Зависимость Талли–Фишера говорит о том, что галактики с более широким распределением скоростей имеют большую светимость

становлено, что причиной этой удивительной ситуации является тот факт, что окончательный ответ опирается на калибровку близких галактик – Туманности Андромеды и М 33 – и на способ учета внутреннего поглощения в галактиках. Эти две проблемы решаются достаточно различным образом, чтобы привести к получению двух совершенно различных результатов.

В 1980 г. появился новый подход к соотношению Талли–Фишера, позволивший в значительной степени избежать неопределенности в вопросе о внутреннем поглощении в галактиках выборки. Так как пыль сравнительно слабо поглощает инфракрасное излучение, то полные инфракрасные светимости должны определяться надежнее, чем светимости в видимом свете. Ряд недавних исследований с применением инфракрасных светимостей далеких галактик в скоплениях дал результаты, оказавшиеся скорее ближе к короткой шкале (де Вокулёра), чем к длинной. И это несмотря на использование для калибровочных галактик расстояний Сэндиджа и согласия его расстояний для ближайших групп с результатами инфракрасных наблюдений.

В ходе недавней аналогичного характера атаке на проблему для получения шкалы расстояний использовались детальные кривые распределения скоростей, дающие полную картину вращения звезд в спиральном диске галактики. Пока что результаты этого анализа оказываются посередине между двумя противоборствующими шкалами и, кстати, довольно хорошо согласуются с результатом Сэндиджа 1958 года, по которому постоянная Хаббла приблизительно равна $23 \text{ км}/(\text{с} \times \text{миллион световых лет})$.

Разные шаги шкалы расстояний подвергаются еще более тонкому анализу: уточнен метод диаметров областей НII, применяется метод светимости шаровых скоплений, перекалиброван критерий самого яркого красного сверхгиганта. Все это помогло прояснить запутанную ситуацию. Все методы дают значения постоянной Хаббла в пределах интервала между двумя соперничающими шкалами, но ни один не в состоянии окончательно решить, чему же на самом деле это значение равно. Разнообразие результатов явно говорит о том, что фундаментальные данные не такие точные и не настолько хорошо поняты, как это считают те, кто их использует.

С тех пор как Хаббл впервые доказал, что галактики простираются невероятно далеко в пространстве и во времени, некоторые наиболее дерзкие астрономические умы пытались оценивать размеры Вселенной. Вместо того, чтобы чувствовать себя обескураженными и расстраиваться, нам, вероятно, следует быть благодарными природе за предоставленную возможность найти методы измерения большой Вселенной, которая столь невообразимо велика.

Глава 11

ВОЗМУЩЕННЫЕ ГАЛАКТИКИ

На заре радиоастрономии было нелегко определить источник принимаемого излучения. Так как радиоволны длинные и типичная волна имеет длину порядка размеров этой книги, то получаемые на радиотелескопах изображения оказываются очень нечеткими. Разрешение любого телескопа зависит от отношения длины волны к диаметру объектива, так что для повышения разрешения на данной длине волны следует увеличивать размеры телескопа (рис. 44–46). Но даже у гигантских радиотелескопов, которые крупнее самых больших оптических телескопов, разрешающая способность может быть меньше, чем у самых маленьких оптических телескопов. Поэтому в 50-х годах, когда радиотеле-



Рис. 44. Радиотелескоп, подобный этому, расположенному в Гарвард-Смитсоновском астрофизическом центре, напоминает телевизионную приемную антенну с тем отличием, что его можно направить на любую точку неба

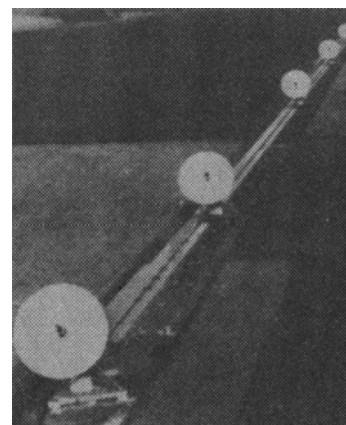


Рис. 45. Пятикилометровый радиоинтерферометр Кембриджского университета

скопы еще имели вид небольших цельных тарелок, было трудно наблюдать источники с достаточно большой четкостью и уверенно определять их точные положения. Радиоастрономам было известно приблизительное положение объекта: они могли, по крайней мере, сказать, в каком созвездии он находится. Но без более точных положений было трудно установить, какие именно объекты посылали нам столь удивительно мощные радиосигналы.

ПЕРВЫЕ ОТКРЫТИЯ

Первые занесенные в каталоги радиоисточники назывались по содержащим их созвездиям. Самому яркому присваивался индекс А, следующему по яркости – В и т. д. Так, ярчайший радиообъект на небе называется Кассиопея А или для краткости Cas A. Одними из первых были открыты Лебедь А (Cyg A) и Кентавр А (Cen A).

Первые свидетельства того, что некоторые радиоисточники могут быть далекими галактиками, появились в 1949 г., когда австралийские радиоастрономы отождествили сильный радиоисточник Cen A с необычной галактикой NGC 5128. Проблема была решена в 1954 г., когда астрономы Паломарской обсерватории стали вести на 200-дюймовом телескопе поиск оптических объектов, совпадающих с другими яркими радиоисточниками. После значительных усилий они нашли несколько необычных объектов, оказавшихся хорошими кандидатами, и попробовали установить, что они собой представляют. У одного из объектов – слабого изображения странной формы на месте Лебедя А – оказался спектр, похожий на спектр далекой галактики с красным смещением, соответствующим расстоянию около 700 миллионов световых лет. Другие кандидаты тоже оказались в том или ином отношении необычными галактиками. Астрономы пришли к выводу, что радиоисточниками могут быть галактики, но только очень странные.

СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ГАЛАКТИКИ?



Рис. 47. NGC 620, вероятно, представляет собой две сливающиеся галактики, хотя они и не являются радиоисточником

Некоторые радиоисточники выглядели как две сталкивающиеся галактики и казалось, что столкновения галактик могут быть катастрофической причиной, приводящей к выделению огромного количества энергии (об этом свидетельствует принимаемый радиосум). Но другие радиогалактики не показывали никаких признаков столкновения и к тому же было ясно, что простые сближения галактик не обязательно должны приводить к бурной реакции с образованием мощного радиоисточника (рис. 47). Звезды в галактиках по сравнению со своими диаметрами так далеки друг от друга, что пока дело касается только их, галактика может считаться почти пустой. Столкновение двух галактик, скорее всего, не будет сопровождаться ни единым столкновением звезд. Галактики, проходя одна сквозь другую, просто сольются и потом разделятся. Поэтому на первый взгляд кажется, что столкновение галактик не может быть особенно интересным событием и уж никак не таким эффектным явлением, которое бы сопровождалось мощным радиоизлучением.

Но могут произойти три очень важных вида событий. Первое: столкновение может сопровождаться очень большими приливными силами, которые разорвут галактики на части. Второе: столкновение газа и пыли двух галактик может создать горячую среду с ударными волнами, которая выразит свое возмущение излучением. И третье: в случае очень разных масс галактик более крупная может проглотить более мелкую. Для каждого из этих трех типов событий имеются находящиеся под подозрением кандидаты, и некоторые из них будут рассмотрены ниже. Но в первые

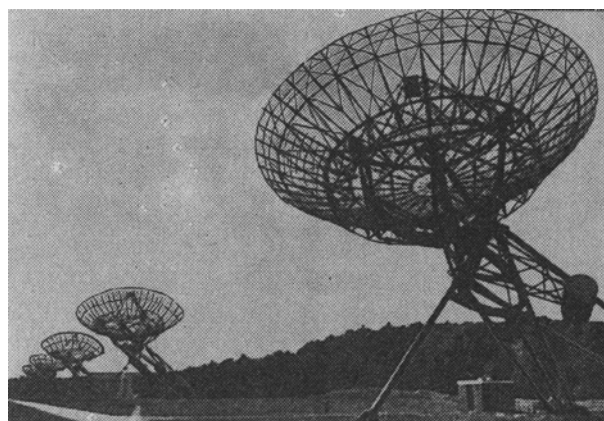


Рис. 46. Интерферометр в Вестерборке (Голландия)

же годы после, казалось бы, бесспорного открытия сталкивающихся галактик вся гипотеза умерла внезапной и, как оказалось, незаслуженной смертью.

Открывались все новые радиогалактики и некоторые из них оказывались настолько яркими, что было непонятно, каким образом столкновение может дать столько энергии (фото LXVII). Другие имели вид одиночной галактики (фото LXVIII), и часто этот уединенный объект оказывался почти лишенной газа эллиптической галактикой. Когда стало ясно, что для объяснения радиоисточников надо придумать что-нибудь кроме столкновений, из-под пера теоретиков стали появляться новые гипотезы. Среди них были модели с галактиками из антивещества, магнитными вспышками, аккрецией межгалактического вещества, образованием новых галактик, цепной реакцией взрывов сверхновых, возникновением нового вещества и действием центрального сверхмассивного объекта. За прошедшие с тех пор годы список сократился. Новые телескопы, новые методы, тысячи новых радиогалактик постепенно отвергли почти все гипотезы. Хотя в настоящее время мы не знаем, чем на самом деле являются радиогалактики, выбор сузился всего до одной единственной возможности, которая может обеспечить выделение таких огромных энергий и многочисленные причудливые формы и странные свойства радиогалактик.

В этой модели в центре галактики находится массивный объект, возможно черная дыра, опустошающий все вокруг, неумолимо заглатывая окружающее вещество, предсмертные вопли которого мы слышим в радиодиапазоне. Не желая быть предвзятыми, астрономы не называют его черной дырой, а используют менее определенный термин «сверхмассивный объект». Некоторые астрономы, желая сохранить нейтралитет и при этом не затемнить явно удивительную природу объекта, называют его «центральным монстром».

МОНСТР В ЦЕНТРЕ

Наблюдения на радиотелескопах говорят о том, что у большинства «активных галактик» (т. е. излучающих радиоволны, или рентгеновские лучи, или и то и другое) имеется небольших размеров мощный объект в центре. Межконтинентальные интерферометры позволили установить, что эти центральные образования действительно очень малы – меньше примерно 1/10 светового года в поперечнике. Они оказываются источниками обычно испускаемых в двух противоположных направлениях больших струй вещества и излучения. В некоторых галактиках эти струи вытягиваются наружу от ядра, образуя наблюдаемую в оптическом, радио- и рентгеновском диапазоне двойную структуру. В других случаях

струи простираются далеко за пределы видимой части галактики, выходя в межгалактическое пространство (рис. 48).

Излучение струй – это типичное излучение электронов, движущихся почти со скоростью света в сильном магнитном поле. Оно называется «синхротронным», потому что физики наблюдают его в виде свечения ускорителей частиц высоких энергий типа синхротронов. Когда впервые установили, что по своим свойствам излучение радиогалактик является синхротронным, было выдвинуто предположение о его генерации именно таким механизмом, и сейчас подавляющее большинство наблюдательных данных подтверждает эту гипотезу. Струи в таких галактиках, как М 87 (Дева А) и NGC 5128 (Кентавр А) наблюдаются как в видимом свете, так и в радиодиапазоне, так как они представляют собой треки частиц чрезвычайно высоких энергий (главным образом электронов), несущихся по галактике вдоль направления сильного магнитного поля.

Что же может находиться в центре и вызывать такие эффектные фейерверки? Выше уже говорилось, что наилучшим объяснением является сверхмассивный объект, возможно, черная дыра. Черные дыры возникают при окончательном коллапсе звезд или облаков, не обладающих достаточным вращением или внутренней энергией, чтобы противостоять силе тяготения своих огром-

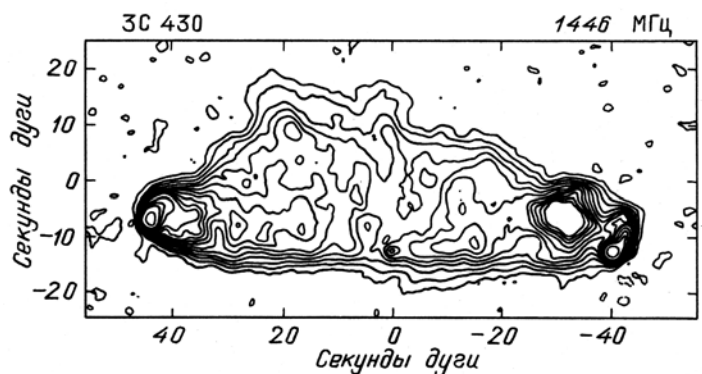


Рис. 48. Радиокарта радиогалактики 3С 430, полученная на радиоинтерферометре с очень длинной базой. Видимая в оптическом диапазоне галактика расположена посередине между двумя громадными «радиоушами», отмечающими положение частиц высоких энергий, выброшенных из центра активной радиогалактики в результате бурных процессов

ных масс. Общая теория относительности говорит нам, что при достижении определенного этапа коллапса объект становится невидимым и с этого момента уже никогда никакое излучение не сможет покинуть его. Ничто из того, что упадет на объект, уже никогда не сможет вернуться. Очень скоро плотность становится невероятно огромной и начинаются странные релятивистские эффекты, не очень понятные для наших земных умов. Важным моментом здесь является образование вокруг черной дыры быстро вращающегося «аккреционного» диска, состоящего из втягиваемого в нее газа. Перед тем как исчезнуть в дыре, этот материал, обладая очень большой энергией, способен выбрасывать в направлении полюсов диска струи релятивистских электронов, создающие наблюдаемую радиокартину (рис. 49).

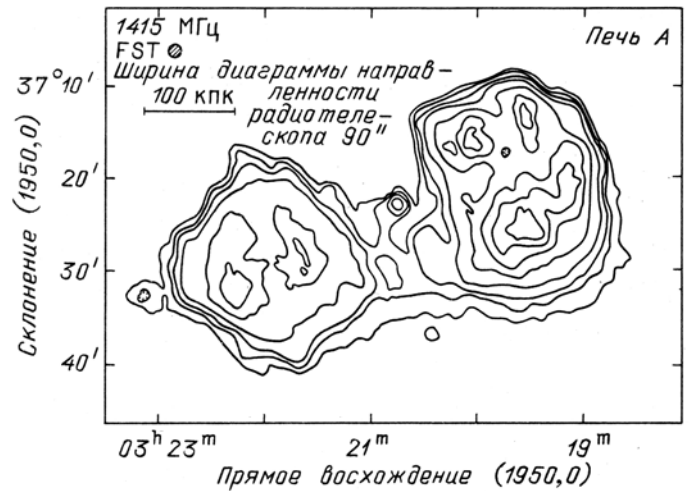


Рис. 49. Карта радиоизлучения близкой радиогалактики Печь А – сильно потрепанной богатой пылью эллиптической галактики в скоплении в Печи. Видимая в оптическом диапазоне галактика расположена в центре этой радиокарты

ПИЩА ДЛЯ МОНСТРА

Для объяснения огромного расхода энергии в радиогалактиках надо найти какое-нибудь горючее. Откуда происходит падающий на центр газ, образующий аккреционный диск и струи? Расчеты показывают, что необходима как минимум одна масса Солнца в год. Какие звезды или другие объекты приносятся с такой скоростью в жертву? При обычном ходе событий звезды не падают на центр галактики, что бы там ни находилось. Если на них не действует какая-то посторонняя сила, то они продолжают обращаться по своим орбитам. Разумеется, на заре существования галактики в диске мог находиться остаточный газ, который, не имея достаточного момента вращения для поддержания орбитального движения, падал бы на центр. Но к настоящему времени этот материал должен был уже кончиться и надо найти источник, способный снабжать ядро веществом сейчас или по крайней мере в самом недавнем прошлом (что для астрономов означает в течение последнего миллиарда лет).

Сначала подходящим источником казалось вещество, постоянно теряемое звездами в ходе их эволюции. Известно, что этот процесс непрерывно возвращает звездное вещество в межзвездный газ, обогащая его таким образом тяжелыми элементами. Однако из расчетов скорости потери звездой газа следует, что этот процесс может дать только около 10 или менее процентов необходимого для монстра количества газа. Чтобы удовлетворить его поразительный аппетит, следует поискать другого кормильца.

Более многообещающим является галактический каннибализм. Если маленькая галактика слишком приблизится к большой галактике, то газ, пыль и звезды диска менее крупного объекта еще в самом начале драмы будут оторваны от ядра и смешаются с внешними частями более крупной галактики. Но центральное ядро маленькой галактики так легко не разрушится и будет падать на центр большой галактики. Этот источник может без труда достаточно сытно кормить монстра, чтобы поддерживать его активность в течение миллионов лет. Разумеется, подобные столкновения происходят нечасто, но и радиогалактики встречаются довольно редко: лишь около 1% галактик вокруг нас заметным образом возмущены. Для объяснения этой доли потребуется не так уж много тесных сближений. К тому же радиогалактики чаще встречаются в скоплениях галактик, где вероятность столкновения наиболее велика. К странному зверю, проживающему в центрах активных галактик, и к возможности поедания галактик друг другом мы еще вернемся в главе 12.

АКТИВНЫЕ ЯДРА И ДРУГИЕ СТРАННЫЕ ОБЪЕКТЫ

Объекты, о которых до сих пор шла речь в этой главе, назывались радиогалактиками. По мере того, как мы все больше узнавали о галактиках, у ряда необычных видов этих объектов, многие из которых не были особенно мощными источниками радиоизлучения, обнаруживались общие черты. Например, в 40-х годах Карл Сейферт открыл класс необычно ярких галактик с широкими эмиссионными линиями в ядре. Сейчас они называются сейфертовскими и являются предметом

многих поучительных исследований. Примером может служить спиральная галактика NGC 1068, которая является не только сейфертовской галактикой, но и радиоисточником (фото LXIX). В ее ядре находится очень яркое и горячее облако газа с турбулентными скоростями в несколько тысяч километров в секунду. По энергетике оно напоминает радиогалактики и, похоже, находится на слабом конце диапазона таких объектов, простирающемся до мощных радиогалактик и квазаров (глава 12). Общим для всех этих необычных источников является наличие в ядре резко очерченного возмущения с очень большой энергией. Астрономы часто называют эти сильно возмущенные области активными ядрами галактик – АЯГ.

Другим типом необычных объектов, несколько напоминающих сейфертовские галактики, являются N-галактики. Эти АЯГ впервые были обнаружены как очень распространенный тип далеких радиогалактик. Теперь мы знаем, что по многим свойствам они похожи на сейфертовские галактики: N-галактики отличаются, в основном, большей удаленностью от нас.

Мы уже упоминали другой тип радиогалактик: галактик типа cD – жирных каннибалов, испускающих радиоизлучение от недавнего пожирания своих соседей по скоплению (см. главу 9). Они не похожи на N-галактики: в противоположность им они раздутые и нечеткие на вид. Но в них действуют многие из тех же механизмов, что и в ряде других необычных галактик. Но настоящими чемпионами в этом потрясающем ряду персонажей являются квазары – главное действующее лицо нашей следующей главы.

Глава 12

КВАЗАРЫ

Активные галактики замечательны, но они не идут ни в какое сравнение с группой таинственных загадочных объектов, впервые обнаруженных в 60-х годах. Уже хорошо знакомые с радиогалактиками и разного рода местными источниками в Млечном Пути астрономы стали находить нечто новое – крохотные яркие радиоисточники, которые не удавалось связать ни с одним из известных объектов (рис. 50). На вид они были маленькими как звезды, но находились в областях неба, где не было галактик, остатков сверхновых или областей НII. По мере уточнения их положений недоумение росло. Оказалось, что положения этих ярких радиоисточников совпадают с положениями слабых звезд.

ПЕРВЫЙ КВАЗИЗВЕЗДНЫЙ ОБЪЕКТ

Используя новые сильно усовершенствованные методы, к 1960 г. радиоастрономы смогли с очень высокой точностью определить положение одного из этих источников – 3С 48. Когда они нанесли его на Паломарский атлас неба, то обнаружили на этом месте довольно слабую ничем особенно не выделяющуюся звезду.

Оптическое отождествление 3С 48 со звездой казалось почти что шагом назад. За много лет до этого на заре радиоастрономии большинство радиоисточников считалось звездами и их называли радиозвездами. По мере накопления знаний, большинство их оказывалось объектами других типов – газовыми облаками, остатками сверхновых, галактиками. И вдруг в 1960 г., казалось, была обнаружена настоящая радиозвезда. Но что за звезда это могла быть? Что за непонятное событие могло заставить звезду излучать такое огромное количество энергии в радиодиапазоне? Чтобы

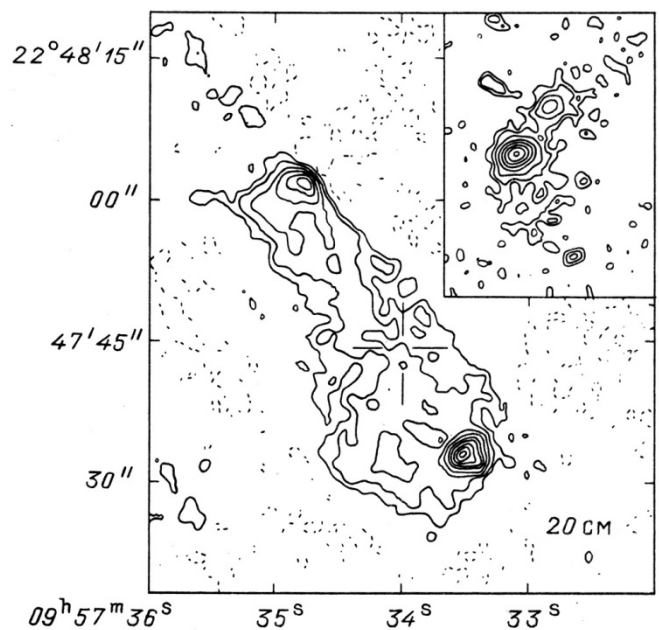


Рис. 50. Карты распределения радиоизлучения и оптической яркости (на врезке) для квазара, известного как 0957+227

получить ответ на этот вопрос, на звезду навели сначала без приборов, а потом и со спектрографом крупнейший в мире телескоп.

Первая фотография области с центром в ЗС 48, полученная на 200-дюймовом Паломарском телескопе, оказалась очень интересной и одновременно ставила исследователей в тупик. Прямо в центре находилась звезда и как будто, чтобы не осталось сомнений, что это тот самый источник, на нее как бы был направлен светящийся указующий перст. Это было явно именно то, что нужно, но что это такое? – спрашивали себя астрономы. Была получена спектрограмма, но она не очень-то помогла. Кстати, спектр приводил в недоумение всех, кто его видел: вместо непрерывной полосы света всех различных цветов, как это наблюдается у звезд, этот спектр состоял из слабой полосы с рядом ярких эмиссионных линий, и все они находились в неподобающих местах. Обычно обнаруживаемые в звездах и газовых облаках химические элементы имеют характерные для них наборы длин волн эмиссионных линий и, казалось, ни один из них не имел соответствия в линиях спектра ЗС 48. Новые таинственные радиоисточники на вид были звездообразными, но казались состоящими из непонятного материала.

Сначала открывшие их астрономы называли эти объекты «квазизвездными радиоисточниками». Это громоздкое название вполне годилось, пока было известно всего два или три таких объекта, но по мере открытия все новых экземпляров возникла необходимость в более коротком наименовании. Надо было выбрать между сокращением КЗО (КвазиЗвездный Объект) и термином, составленным из фрагментов отдельных слов названия – *quasi-stellar radio source* (квазизвездный радиоисточник) – *quasar*, или по-русски квазар. Вскоре наиболее распространенным стало легко запоминающееся и экзотически звучащее слово «квазар», которое с тех пор начали использовать для названий всевозможных неастрономических объектов от телевизоров до авиационных фонарей.

РЕШЕНИЕ ЗАГАДКИ

В следующем году тайна спектра была разгадана. В 1961 г. на Паломарском телескопе был получен спектр самого яркого из квазизвездных радиоисточников – квазара 13-й величины ЗС 273 (фото LXX). Спектр на проявленной пластинке был очень похож на спектр ЗС 48: на фоне слабого непрерывного спектра виднелся ряд ярких эмиссионных линий. Но среди множества линий можно было узнать набор, не наблюдавшийся в спектре другого квазара. Линии находились не на своих местах, но их взаимное расположение, интервалы между ними и интенсивности были в точности такими, как надо. Однако весь набор линий как целое был смещен в красную сторону спектра (рис. 51). Эти во всех остальных отношениях нормальные линии были так сильно сдвинуты в красную сторону, что чуть было не остались неузнанными. Кстати, в спектре ЗС 48 были те же самые линии, но сдвинутые еще дальше в красном направлении.

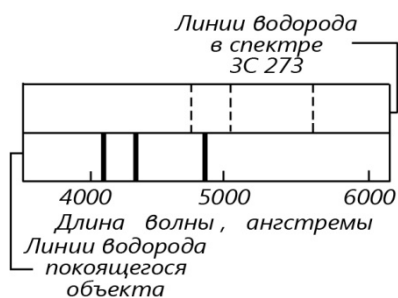


Рис. 51. Красные смещения квазаров подобны таковым у обычных галактик, но обычно их значения гораздо больше

В этом случае серию не удалось опознать из-за того, что некоторые из известных линий оказались смещенными за пределы спектра!

Разумеется, астрономам были знакомы вызываемые эффектом Доплера красные смещения. Квазары же поражали огромными скоростями удаления от нас. Самые большие скорости звезд в нашей Галактике составляют около 400 км/с (примерно 1 миллион миль в час, или 1,5 миллиона километров в час). Звездообразные на вид квазары имели красные смещения, соответствующие таким большим скоростям, как 150 000 км/с (около 325 миллионов миль в час или 500 миллионов километров в час). В этом случае они не могли быть звездами нашей Галактики, потому что, двигаясь так быстро, должны были скоро поки-

нуть Млечный Путь и унестись в межгалактическое пространство. Что же это за объекты?

Было предложено много гипотез, некоторые из них нелепые или просто странные. Большинство их основывалось на том предположении, что красное смещение вызвано эффектом Доплера, и, следовательно, квазары удаляются от нас с огромными скоростями. Но были рассмотрены и другие возможные причины красного смещения, включая его гравитационное происхождение. Эйнштейн показал, что сильное гравитационное поле аналогично эффекту Доплера увеличивает длину волны света. Этот сдвиг удастся (хотя и с трудом) увидеть в спектре Солнца, благодаря его большой массе, и весьма заметен в спектрах звезд – белых карликов, огромные плотности которых

вызывают значительное красное смещение излучаемого с поверхности света. Но шло время, обнаруживались квазары со все большими красными смещениями, и от гравитационной модели красного смещения пришлось отказаться: никакая физическая система с требуемыми для этих смещений огромными гравитационными полями не могла сколь-нибудь долго существовать.

За более чем 25 лет после открытия квазаров были собраны громадные объемы данных, но прогресс в понимании этих объектов оказался очень медленным. Сейчас известно более 3000 квазаров и измеренные для них красные смещения находятся в пределах от нескольких десятых до 3,8 (эти значения представляют собой отношения величины сдвига длины волны к длине волны для покоящегося объекта).

КОСМОЛОГИЧЕСКИЙ СПОР

Наиболее вероятным объяснением красных смещений стала так называемая космологическая гипотеза: подобно галактикам, квазары удаляются от нас в рамках общего расширения Вселенной и получаемые из красных смещений громадные скорости квазаров говорят о том, что они находятся на расстоянии самых далеких галактик. Красные смещения некоторых квазаров гораздо больше, чем у любой исследованной галактики, – этот факт ставит нас перед еще одной проблемой. Галактики с такими большими красными смещениями не наблюдаются просто потому, что на таких расстояниях они слишком слабые, чтобы их можно было увидеть и измерить. Это означает, что по светимости квазары превосходят даже самые яркие из галактик. Например, светимость 3C 273 примерно в 100 раз больше светимости нормальной гигантской галактики, и при этом объект выглядит как звезда.

И тут, как будто этой проблемы было недостаточно, у многих квазаров была обнаружена переменность блеска. Например, оказалось, что у 3C 273, зарегистрированного на получавшихся в течение более 50 лет патрульных снимках Гарвардской обсерватории, блеск в течение этого периода менялся неправильным образом. Когда астрономы стали измерять блеск квазаров при помощи фотоэлектрических фотометров, то обнаружили, что некоторые из них сильно переменны и их светимости могут меняться во много – даже в 100 раз. В некоторых случаях блеск менялся очень быстро – на протяжении всего одного дня (рис. 52). Это открытие поставило космологическую интерпретацию квазаров в очень трудное положение. Быстро меняющийся объект не может быть очень большим. Так, свет проходит за день расстояние в один световой день, и если за это время наблюдается значительное изменение блеска, то излучающий объект должен быть меньше одного светового дня: в противном случае любые изменения блеска окажутся смазанными из-за времени, которое требуется свету от дальней части объекта, чтобы достичь его ближней для нас части (рис. 53). Световой день очень мал – всего лишь порядка размеров Солнечной системы (диаметр орбиты Плутона составляет около половины светового дня). Как может объект размером всего только с Солнечную систему излучать света в 100 раз больше, чем галактика из сотен миллиардов звезд? Этого никто не знал. Радиоастрономы еще больше обострили проблему, когда применили для непосредственного измерения диаметров квазаров новый метод межконтинентальной интерферометрии и установили, что эти объекты очень маленькие и имеют очень сложную структуру.

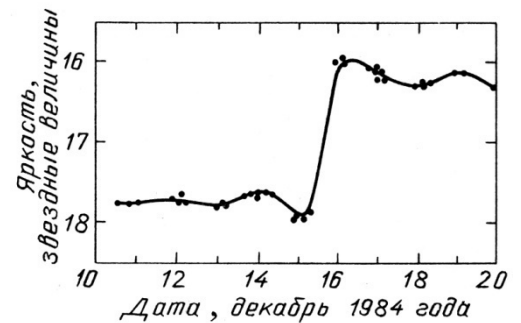


Рис. 52. Светимости квазаров обычно меняются быстро и неправильным образом

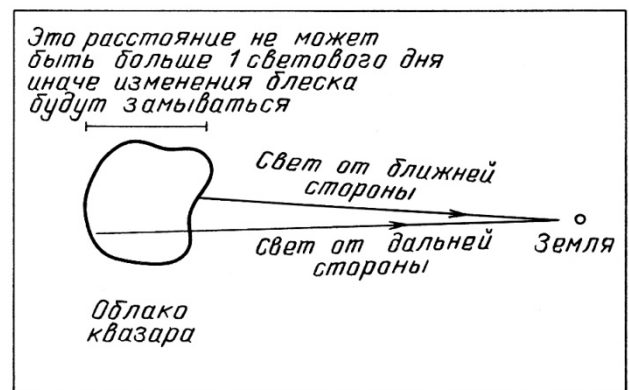


Рис. 53. Связанные с зависимостью между размерами и флуктуациями блеска соображения говорят о том, что размеры квазаров должны быть малыми: в противном случае изменения блеска окажутся смазанными из-за разных значений времени, затрачиваемого светом, чтобы дойти до нас

Космологическая интерпретация казалась настолько немислимой, что многие астрономы стали в конце концов считать квазары местными объектами. Быть может, это звезды, каким-то образом выстреливаемые из нашей Галактики с чудовищными скоростями? Или, может быть, красное смещение вызвано каким-то новым физическим явлением, отличным от эффекта Доплера? Последняя возможность, казалось, получила подтверждение, когда астрономы обнаружили близко расположенные изображения двух и более объектов с совершенно различными красными смещениями (рис. 54). Согласно одной из гипотез, эти объекты демонстрировали какой-то неожиданный эффект старения света, при котором его длина волны меняется со временем. Но эта гипотеза, по-видимому, несостоятельна: в настоящее время большинство астрономов считает близко расположенные на небе изображения простыми оптическими совпадениями — на самом деле объекты находятся на совершенно различных расстояниях.

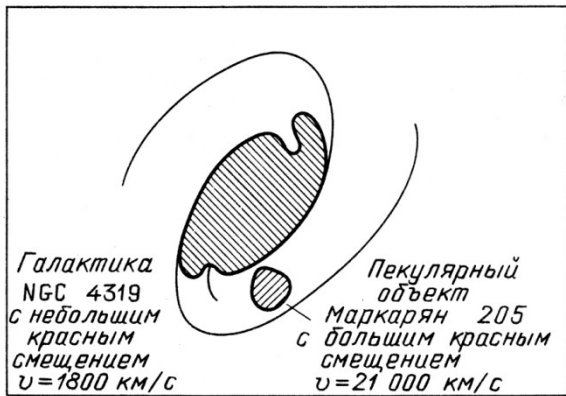


Рис. 54. Один из загадочных случаев, когда необычный объект с большим красным смещением (в данном случае галактика с эмиссионными линиями, известная как Маркарян 205) оказывается связанным с галактикой с небольшим красным смещением, NGC 4319

СПОР ОКОНЧЕН?

1980 год пролил новый свет на загадочные квазары. Были наконец созданы астрономические инструменты, способные проникнуть в непосредственно окружающую сияющий центр квазара область пространства. Еще раньше был поставлен вопрос, на который не удавалось дать ответ: не скрывается ли за ярким передержанным изображением квазара галактика? Не являются ли квазары центрами галактик? Связаны ли они как-нибудь с галактиками с активными ядрами вроде сейфертовских? Если бы только удалось увидеть непосредственно окружающее квазар слабое изображение галактики, то мы бы знали, что вопрос имеет утвердительный ответ.

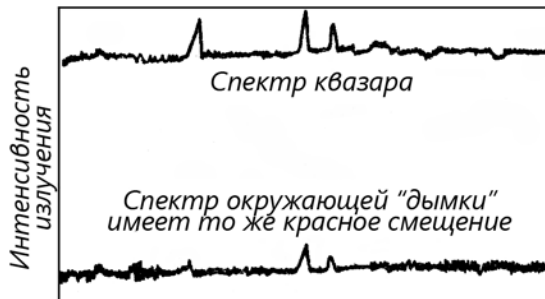


Рис. 55. Оказалось, что спектр «дымки» вокруг квазара имеет такое же красное смещение, как и сам квазар. Это говорит о том, что объект, вероятно, представляет собой далекую галактику с возмущенным ядром. По горизонтальной оси — длина волны



Рис. 56. В профиле яркости квазара имеется сильный пик, а более слабый свет окружающей квазар вмещающей галактики трудно обнаружить

Одни из первых успешных исследований для проверки этой гипотезы были проведены для квазара 3С 273, который оказался окруженным чем-то с распределением яркости как у нормальной эллиптической галактики. У спектров этих туманных объектов, окружающих квазары, были в точности такие же красные смещения, как и у самих квазаров (рис. 55). Следовательно, если туманное пятно — это действительно галактика, то она удаляется со скоростью, которая соответствует большому расстоянию, и, следовательно, квазар тоже должен находиться на космологическом расстоянии и участвовать в расширении Вселенной. К 1983 г. благодаря проведенным несколькими инициативными группами исследованиям с использованием ПЗС-детекторов для регистрации свечения вокруг квазаров, было окончательно установлено, что квазары действительно являются центрами галактик (рис. 56). Многие квазары оказались пересеченными спиральными галактиками, а необычно большая их часть имеет менее крупных спутников. Пока еще неизвестно, почему квазарами преимущественно оказываются двойные галактики или почему среди них так много пересече-

ченных галактик. Но мы, наконец, узнали, что квазары – это почти немислимо энергичные образования чудовищной светимости и очень маленьких размеров в центрах галактик. Остается только понять, почему они такие.

ОБЛАКО КВАЗАРА

Еще не зная, где находятся квазары, астрономы построили довольно подробную модель облака вещества, образующего объект (рис. 57). Спектры квазаров дают нам достаточно информации, чтобы сделать вывод о наличии в самом их центре небольшого компактного объекта, окруженного несколькими горячими газовыми облаками и несколькими областями более холодного газа. По-видимому, по всему облаку разбросаны облака пыли, движущиеся с высокими скоростями, как если бы они были выброшены из более близких к центру областей. Во всем этом, в условиях сильного магнитного поля движутся испускающие синхротронное излучение частицы высоких энергий. Именно это излучение делает из квазаров такие мощные радиоисточники. Хотя квазары были открыты именно как мощные радиоисточники, большинство их в радио диапазоне ведет себя тихо, так что у этих замечательных объектов могут быть весьма разнообразные физические свойства.

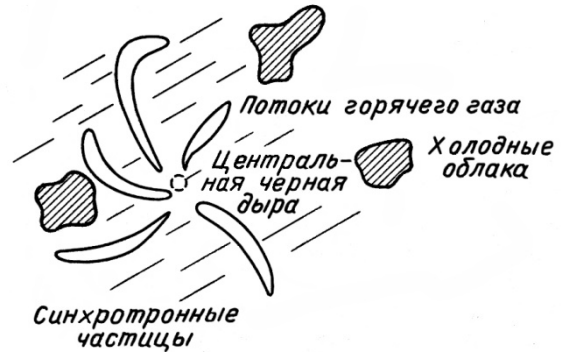


Рис. 57. Модель облака квазара

С другой стороны, квазары отличаются друг от друга тем, что у некоторых из них не наблюдается эмиссионных линий – это говорит об отсутствии возбужденного газа. Из-за отсутствия линий в спектрах этих объектов нельзя определить их красное смещение и, следовательно, узнать расстояние до них. Такие лишённые линий квазары называются объектами типа BL Ящерицы или для краткости блазарами – по имени прототипа, который считался переменной звездой нашей Галактики. BL Ящерицы оказалась радиоисточником с таким же, как у квазаров, оптическим непрерывным спектром – эти косвенные свидетельства указывали на то, что блазар – это квазар без эмиссионных линий. Теперь известно много других блазаров. Расстояние до большинства из них мы знаем очень приблизительно и они оцениваются по блеску. Но для некоторых очень важных объектов типа BL Ящерицы расстояния известны, так как удалось найти линии в спектре окружающей их дымки. Они оказались порядка расстояний до далеких галактик и квазаров, как это и следовало из сходства их свойств со свойствами квазаров.

ДВИГАТЕЛЬ КВАЗАРА

Одна из до сих пор трудноразрешимых задач, поставленных квазарами, – это проблема объяснения огромного количества излучаемой ими энергии. Астрономы перепробовали разные модели, включая все гипотезы, предложенные ранее для объяснения радиогалактик (глава 11). Похоже, только один механизм может дать так много энергии – гравитационный коллапс массивного объекта. Большинство астрономов считают, что центры квазаров подобно центрам активных галактик представляют собой массивные сколлапсировавшие объекты вроде черных дыр. Существование там черных дыр не доказано – просто никто не придумал других претендентов на эту роль. Если квазар состоит из черной дыры, то его масса должна быть около 100 миллионов масс Солнца. Очень яркий квазар должен заглатывать вещество из окружающей галактики со скоростью около 100 масс Солнца в год.

В стандартной модели квазара черная дыра окружена вращающимся аккреционным диском. Источником энергии служит потенциальная энергия падающего газа. Диск обеспечивает тепловую энергию для излучения света, создает магнитные вспышки, струи параллельно движущихся частиц и другие экзотические явления. Частицы газа высокой энергии образуют плазму, которая может объяснить рентгеновское излучение некоторых квазаров.

За пределами аккреционного диска находится активный газ, дающий наблюдаемые в спектре квазара эмиссионные линии, а еще дальше – вероятно, совсем за пределами галактики и просто случайно оказавшийся перед ней – находится холодный газ, объясняющий наличие линий поглощения. Это газ двух видов: расположение части линий поглощения говорит об их происхождении

в случайно оказавшихся на пути облаках водорода в расширяющемся пространстве между нами и квазаром. Другие линии поглощения группируются у определенных значений красного смещения, что свидетельствует об их происхождении в облаках водорода во внешних частях галактик в скоплениях галактик, оказавшихся на луче зрения.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ

Хотя природа квазаров еще до конца не известна, они оказываются хорошим доказательством справедливости общей теории относительности Эйнштейна. Сэр Артур Эддингтон предсказал, что сила тяготения массивных объектов может фокусировать свет подобно гигантскому космическому телескопу, создавая сложные изображения далеких объектов. Почти 60 лет спустя в 1979 г. гравитационная линза была открыта в виде двойного квазара. Разнесенные всего на несколько угловых секунд два компонента – это уже странно. Но когда были измерены красные смещения квазаров, то они оказались одинаковыми. Единственное разумное объяснение состояло в том, что мы смотрим на два изображения одного и того же квазара. При тщательном исследовании изображений между ними был обнаружен слабый объект со свойствами галактики. Очевидно, именно эта галактика

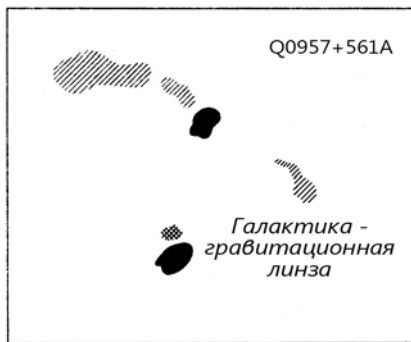


Рис. 58. Двойное изображение квазара, созданное гравитационной линзой. Линзирующей является более близкая гигантская эллиптическая галактика, которая создала два изображения гораздо более далекого квазара, известного как Q0957+561

действует как гравитационная линза, увеличивая изображение далекого квазара и отбрасывая в нашем направлении целые две его копии.

В течение последующих пяти лет было обнаружено еще несколько таких экземпляров – все они довольно похожи друг на друга и расстояния между компонентами у них составляет от 2 до 7 угловых секунд (рис. 58). Последним примером является система с гравитационной линзой, известная под названием 2016+112. Она состоит из двух изображений квазара с красным смещением 3,27, т. е. он находится на расстоянии нескольких миллиардов световых лет. Рядом с этими объектами 23-й величины находится еще более слабое пятно, которое оказалось эллиптической галактикой с красным смещением около 0,8, т. е. она значительно ближе квазара. Эта галактика является той самой линзой, которая искривляет свет гораздо более удаленного квазара и формирует изображение, подтверждающее давнее предсказание Эддингтона.

ЭПОХА КВАЗАРОВ

Больше всего квазаров в интервале красных смещений от 2 до 3, а квазары с красными смещениями больше 3,5 почти не встречаются. Очень мало также квазаров с небольшими красными смещениями, так что распределение этих объектов по красным смещениям имеет максимум в области скоростей удаления, соответствующей ранней эпохе истории Вселенной. В этот период квазары были больше распространены, чем сейчас или когда-либо до этого. Под впечатлением этого странного факта, астрономы назвали интервал, составляющий всего около 10% истории Вселенной, эпохой квазаров. Почему тогда вспыхнули квазары? Почему не раньше и не сейчас? Это одни из тех вопросов, что остались без ответа и все еще ждут решения.

Квазары – это самые энергичные и эффектные примеры рассматриваемых в этой книге объектов – галактик. Так многого о них мы все еще не знаем и так много еще споров об их природе, что следует ожидать открытия новых чудес при дальнейшем исследовании Вселенной. На протяжении столетий наш горизонт расширился от Земли до звезд и галактик. Сейчас мы стоим на подступах к новой удивительной территории – таинственной стране квазаров. А дальше едва видны туманные очертания неописуемо величественной картины начала Вселенной, блистательно расцветшей в огромный, прекрасный, гостеприимный мир.

ЗВЕЗДНЫЕ ГРУППИРОВКИ В ГАЛАКТИКАХ (ВМЕСТО ПОСЛЕСЛОВИЯ)

Редактор русского перевода хотел бы воспользоваться возникшей «по техническим причинам» необходимостью добавить несколько страниц к книге профессора Ходжа, чтобы чуть подробнее рассказать о последних исследованиях звездных группировок в других галактиках – той области, в которой у автора книги и ее редактора особенно много общих интересов.

Звездные скопления, ассоциации и комплексы содержат звезды, связанные единством происхождения, примерно одного возраста и химического состава. Поэтому различие в положении звезды на диаграмме показатель цвета–светимость для звездного скопления определяется лишь ее массой, от которой зависит скорость эволюции, благодаря чему скопления дали решающий материал для обоснования современной теории звездной эволюции. Фундаментальным для всей проблемы звездообразования является то обстоятельство, что молодые звезды встречаются исключительно в группировках того или иного вида. Это означает, что звезды могут образовываться лишь совместно, из первоначально единого тела.

Надежные расстояния и возрасты, а также высокая светимость молодых скоплений и ассоциаций делает их лучшими индикаторами спиральных рукавов галактик; сравнение их характеристик с данными о газовых облаках дает ключ к пониманию истории галактик и происхождения самих звездных группировок. Это тот узел, в котором завязаны проблемы происхождения и эволюции звезд и структуры и эволюции галактик.

Напомним основные черты звездных ассоциаций, рассеянных и шаровых скоплений, как они описаны в главе 4 этой книги. Ассоциации – разреженные группировки молодых звезд: горячих звезд высокой светимости (ОВ-ассоциации) либо неправильных переменных (Т-ассоциации). В нашей Галактике оба типа ассоциаций на прямых фотографиях обычно теряются среди звезд фона и обнаруживаются именно как сгущения звезд соответствующих типов, в других же ОВ-ассоциации бросаются в глаза, а Т-ассоциации незаметны. Эти последние вообще оказываются не столь разреженными, как представлялось первоначально; их плотность и дисперсия скоростей указывают на то, что они, подобно скоплениям, являются гравитационно связанными системами. Этого, по-видимому, нельзя сказать об ОВ-ассоциациях, и здесь исторически и проходит водораздел между скоплениями и ассоциациями: под последними мы будем, как это и делает П. Ходж, понимать лишь ОВ-ассоциации.

Динамическая неустойчивость ассоциаций, как отметил В. А. Амбарцумян, введший в 1947 г. это понятие в его современном значении, означает их малый возраст, согласующийся с оценками продолжительности жизни ОВ-звезд. Однако она не дает сама по себе оснований говорить о невозможности образования звезд путем гравитационного коллапса и последующей фрагментации на протозвезды исходного газового облака. Окончательно это выяснилось лишь в последние годы, когда успехи инфракрасной и радиоастрономии привели к выводу о малой эффективности звездообразования: лишь небольшой процент от массы исходного газового облака превращается в звезды, по крайней мере когда наличествуют горячие О-звезды. Коль скоро они образовались, их излучение и ионизованный ими газ вытесняют родительский холодный газ за пределы группировки; взрывы сверхновых, в которые эволюционируют массивные звезды, также приводят к этому. Судьба новорожденной группировки, содержащей такие звезды, зависит от доли потерянного газа и скорости его ухода; в любом случае она расширяется, а если быстро уходит более половины исходной массы, гравитационная связанность теряется. Не нужно никаких ненаблюдаемых сверхплотных тел, при взрывном распаде которых образуется ОВ-ассоциация, как до последнего времени полагает В. А. Амбарцумян и некоторые его ученики.

Рассеянные скопления могут иметь любой возраст, и самые молодые из них отличаются от ассоциаций лишь большей плотностью и, очевидно, гравитационной связанностью. С чем мы имеем

дело в каждом конкретном случае, различить не всегда легко; формально мы должны знать полную массу группировки, дисперсию скоростей ее членов и ее структуру, чтобы решить, является ли она гравитационно связанной и может ли выдержать приливное воздействие центральных частей галактики. Такие данные почти всегда отсутствуют, масса обычно определяется именно по дисперсии скоростей в предположении гравитационной связанности. Практически большие размеры и меньшая плотность остаются реалистическими критериями разграничения молодых рассеянных скоплений и ассоциаций.

Шаровые скопления отличаются от рассеянных прежде всего массой, они насчитывают сотни тысяч звезд, тогда как рассеянные – обычно несколько тысяч (на другом конце шкалы группировку из десятка звезд мы назовем уже кратной звездой, а не скоплением). Однако деление на шаровые и рассеянные скопления возникло, когда скопления в других галактиках были не известны или не изучены. Шаровые скопления нашей Галактики не только массивны: они имеют низкое содержание тяжелых элементов и возраст около 15 миллиардов лет; это типичные объекты гало, населения II. Лишь одно или два из молодых скоплений в нашей Галактике имеют массу, близкую к той, при которой скопление уже можно именовать шаровым. Однако в других галактиках, и прежде всего в Магеллановых Облаках, дело обстоит по-другому; там известны скопления, по количеству членов и по виду на фотопластинке не отличающиеся от шаровых скоплений нашей Галактики, но состоящие при этом из молодых звезд. Первое исследование системы таких скоплений в Большом Магеллановом Облаке провел в 1961 г. автор этой книги; П. Ходж нашел, что две трети богатых скоплений БМО являются более или менее молодыми. Последующие исследования, и в особенности диаграммы светимость–показатель цвета, показали, что возраст большинства из них составляет 10–100 миллионов лет и лишь пять скоплений столь же стары, как и шаровые скопления нашей Галактики. Не существует у скоплений Магеллановых Облаков и связи химического состава с количеством членов: там наблюдается вместо этого корреляция химического состава с возрастом.

Увеличение содержания тяжелых элементов с возрастом вполне объяснимо иной эволюционной историей неправильных галактик, к каковым относятся Магеллановы Облака. Там не было первоначального быстрого обогащения межзвездной среды элементами тяжелее гелия в конце бурного процесса звездообразования в гало, только после которого началось образование рассеянных скоплений в диске – из вещества уже с «нормальным», близким к солнечному химическому составом. Звездообразование в Магеллановых Облаках началось потихоньку и шло без перерывов, и соответственно последующие поколения звезд рождались со все более высоким содержанием тяжелых элементов; более медленное звездообразование объясняет и то, что доля массы, приходящаяся на газ в обоих Облаках, в несколько раз выше, чем в Галактике. Началось звездообразование во всех галактиках примерно одновременно, как можно судить по присутствию в них классических шаровых скоплений и переменных звезд типа RR Лиры.

В 1988 г. профессор Ходж предложил использовать в качестве параметра, разделяющего шаровые и рассеянные скопления, одну лишь их массу и скопления с массой, превышающей 10 000 масс Солнца, именовать шаровыми, а с меньшей – рассеянными. Скопления с возрастом, превышающим 10 миллиардов лет, он предлагает называть старыми, а с возрастом, меньшим 100 миллионов лет, – молодыми; между ними находятся скопления промежуточного возраста. Таким образом, в классификации, предлагаемой П. Ходжем, имеется шесть видов скоплений: старые шаровые, шаровые промежуточного возраста, молодые шаровые, старые рассеянные, рассеянные скопления промежуточного возраста и молодые рассеянные скопления.

Изобилие молодых шаровых скоплений в Магеллановых Облаках остается проблемой. Более слабые приливные воздействия в Облаках, по-видимому, ее не решают, потому что образованию в нашей Галактике гравитационно связанных гигантских облаков молекулярного водорода они не препятствуют. Ситуация несколько проясняется, если учесть, что молодые шаровые скопления – редкость не только в нашей Галактике, но и в других галактиках с резко выраженными регулярными спиральными рукавами (например, в Туманности Андромеды); в то же время они преобладают не только в неправильных галактиках, но и в системах с обрывочной, фрагментарной спиральной структурой, вроде галактики Треугольника и NGC 2403. Это позволило автору предложить гипотезу, согласно которой ключевой в этой проблеме является редкость молодых шаровых скоплений в галактиках с регулярной спиральной структурой. Такая структура, как рассказывается в главе 2 этой книги, объясняется наличием спиральных волн плотности, стимулирующих звездообразование. Через любую точку этих галактик (за исключением находящихся близ расстояния от центра, на котором совпадают скорости вращения волны плотности и самой галактики, ее звезд и

газа) прокатывается эта волна, и можно предположить, что в газовом облаке, подвергшемся вследствие ее прихода резкому сжатию, быстро образуются массивные звезды и рождается гравитационно не связанная группировка – ассоциация. Богатые скопления рождаются лишь в спокойных условиях, когда облако сжимается лишь под действием собственной гравитации. Если эта гипотеза справедлива, то в галактиках с регулярной спиральной структурой молодые шаровые скопления могут быть лишь в районе коротационной окружности, но, как правило, на таких расстояниях от центра газа мало и богатым скоплениям не из чего возникнуть.

Другим объяснением может быть меньшее содержание тяжелых элементов в неправильных галактиках и, по-видимому, также и в галактиках с фрагментарной спиральной структурой, чем в галактиках с правильными и резко выраженными рукавами. Во всяком случае, эти характеристики коррелируют с массой галактик, а она, в свою очередь, с химическим составом. Газ, в котором меньше доля тяжелых элементов, обладает лучшей «прозрачностью» и медленнее уходит из окрестностей горячих звезд и поэтому при большем содержании тяжелых элементов, как отметил Б. Элмегрин, больше шансов на образование ассоциации, а не скопления. Правда, при этом необходимо допустить значительные вариации химического состава в одной и той же галактике, поскольку, скажем, в БМО имеются не только ассоциации, но и скопления, содержащие О-звезды. Имеются, во всяком случае, наблюдательные данные, указывающие на то, что в сверхгигантах Магеллановых Облаков содержание тяжелых элементов действительно в несколько раз выше, чем в находящихся поблизости скоплениях. Мы заметили, между прочим, что знаменитая Сверхновая 1987 А в БМО находится в крошечном скоплении, и это может означать, что содержание тяжелых элементов в ней еще меньше, чем для звезд поля БМО, – обстоятельство, весьма желательное, с точки зрения теоретиков, для объяснения ряда особенностей этой Сверхновой.

Вполне возможно, что представление о том, что звезды поля, выходящие из быстро распавшихся ассоциаций, систематически имеют большее, чем у соседних скоплений, содержание тяжелых элементов, объясняет и некоторые другие загадки – например наличие в нашей Галактике относительно бедных тяжелыми элементами молодых скоплений, но отсутствие звезд поля с такими же характеристиками. Отметивший эту загадку А. А. Сучков предположил даже, что такие скопления образовались из вещества, попавшего в нашу Галактику из БМО, но мы видели, что группировкам, родившимся из облаков с меньшим содержанием тяжелых элементов, легче сохраниться как скоплениям, они не выпустят свои звезды в галактическое поле.

Многочисленность молодых шаровых скоплений в БМО и практическое их отсутствие в нашей Галактике составляет во всяком случае проблему, понимание которой прольет свет и на многие, казалось бы, не связанные друг с другом, вопросы.

Помимо ассоциаций размером в 10–100 пк давно известны и более обширные группировки ОВ-звезд, с поперечниками порядка 600–1000 пк; В. Бааде в 1958 г. и В. А. Амбарцумян в 1963 г. предложили для них название сверхассоциаций. Типичным примером является группировка вокруг туманности 30 Золотой Рыбы в БМО (см. фото XXIX). Описывая эту сверхассоциацию, Бааде отметил, что существует два масштаба звездообразования – около 10 и около 600 пк. Еще раньше Х. Шепли говорил о «созвездиях» ОВ-звезд в БМО, а в нашей Галактике И. М. Копылов обнаружил тенденцию ОВ-ассоциаций образовывать группировки из нескольких членов.

Долгое время существование группировок, более обширных, чем ассоциации, казалось очевидным лишь для горячих звезд высокой светимости, довольно редкой особенностью их пространственного распределения. Далеко не в каждой галактике обнаруживаются сверхассоциации: скажем, в галактике Андромеды лишь звездное облако NGC 205 напоминает по своим размерам и светимости сверхассоциацию, хотя в нем нет ярких областей ионизованного водорода, типичных для сверхассоциаций. Однако разбиение спиральных рукавов галактик на более или менее обособленные фрагменты – звездные облака – отмечалось, конечно, с самого начала исследований галактик. С 30-х годов были известны в нашей Галактике и группы из нескольких звездных скоплений, а в 1973 г. П. Ходж нашел, что скопления БМО образуют гигантские группировки размером до 1,5 кпк, состоящие в основном из скоплений с близкими возрастами (см. рис. 26).

Значение и всеобщность существования огромных звездных группировок стали выявляться с середины 70-х годов, когда мы обнаружили, что цефеиды нашей Галактики также объединяются в группировки размером порядка 600 пк. Конечно, цефеиды служат лишь наиболее удобным индикатором выявления таких группировок, в них входят и звезды других типов, равно как скопления, газовые туманности и ассоциации. Последующие работы показали, что около 70% звезд, по крайней мере высокой светимости и моложе 100 миллионов лет, входят в гигантские группировки, которые мы предложили называть звездными комплексами. Изолированных молодых скоплений

практически не существует, и это означает, что скопления, как и звезды, образуются группами. Было естественно предположить, что это является следствием соответствующей крупномасштабной неоднородности в распределении звездообразующих газовых облаков, и последующие работы показали, что гигантские, с массами в миллионы солнечных, облака молекулярного водорода неизменно связаны со звездными комплексами.

Концентрация звезд высокой светимости, скоплений и ассоциаций в комплексах позволила понять и различие размеров ассоциаций в нашей Галактике и БМО (около 80 пк) и в галактике Андромеды (см. рис. 30), в которой С. ван ден Берг выделил 188 ОВ-ассоциаций со средним поперечником около 500 пк. Вместе с болгарскими коллегами мы нашли в 1987 г., что группировки голубых звезд, которые соответствовали бы по своим характеристикам ассоциациям нашей Галактики, в Туманности Андромеды имеют поперечник около 80 пк; границы же, очерченные ван ден Бергом, – это пределы звездных комплексов, внутрь которых попадают 95% «истинных» ассоциаций, более ярких участков комплексов. Тогда же П. Ходж показал, что размеры выделяемых в других галактиках группировок звезд высокой светимости (подавляющее большинство из них – это голубые звезды классов О и В) зависят от пространственного разрешения. При худшем, чем у ван ден Берга, разрешении он выделил лишь 42 ассоциации со средним диаметром 300 пк, при лучшем же разрешении мы сумели выделить и разрешенные на звезды (по крайней мере по краям) ядра, которые именно и сопоставимы с ассоциациями нашей Галактики. Вместо предлагаемого нами термина «звездный комплекс» профессор Ходж предлагает сохранить старое название «звездное облако», однако же большинство из комплексов, как мы видели, при малом разрешении исчезают, а название «облако» явно подразумевает что-то бросающееся в глаза.

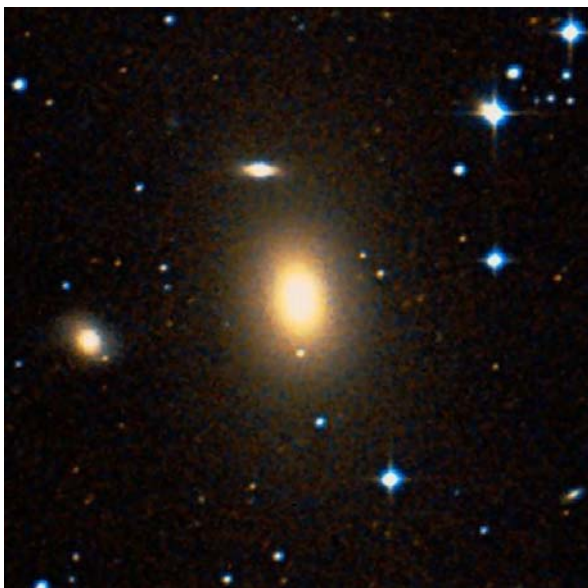
Сверхассоциации можно рассматривать теперь как молодые, богатые газом и О-звездами звездные комплексы, точнее говоря, те из них, в которых образование массивных звезд началось сразу во многих местах. Так, сверхассоциация 30 Золотой Рыбы содержит 19 ассоциаций и скоплений с ОВ-звездами, а обычно в комплексе две-три ассоциации, как, например, в комплексе в окрестностях Солнца, издавна известном под названием Местной системы, или в комплексе вокруг двойного скопления χ и h Персея.

Терминология, относящаяся к звездным группировкам, все еще неоднозначна; мы видели, что нет резкой границы ни между рассеянными и шаровыми скоплениями, ни между скоплениями и ассоциациями. Мы полагаем, что наиболее глубоким различием является наличие у группировки единого центра или же многих, что отражает, очевидно, и различие генезиса. Тогда можно предложить деление на два главных класса (Ю. Н. Ефремов. Очаги звездообразования в галактиках: Звездные комплексы и спиральные рукава. – М.: Наука, 1989), а именно: унитарные группировки (кратные звезды, рассеянные скопления, ассоциации), дальнейшее деление которых на субгруппы невозможно, и полицентрические – агрегаты и комплексы, а также иногда встречающиеся объединения двух-трех комплексов – регионы. Очевидно, что группировки первого типа образовались в единичном акте и рассеяли родительское газовое облако, группировки второго класса построены из первых, а также из одиночных звезд, которые, вероятно, родились в уже распавшихся к настоящему моменту ассоциациях.

Примером агрегата может служить группировка, обычно называемая ОВ-ассоциацией Орион 1: наряду с несколькими разреженными субгруппами ОВ-звезд она включает крайне плотное молодое скопление вокруг Трапеции Ориона. Можно, конечно, пойти и по другому пути: называть ассоциациями именно такие полицентрические группировки, а унитарные группировки все именовать скоплениями, тем более что установить, связаны ли они гравитационно, редко удастся. Однако же в далеких галактиках такие полицентрические группировки – группы из двух-пяти ассоциаций – могут быть спутаны с звездными комплексами, средний диаметр которых около 600 пк, тогда как у моноцентрических ассоциаций, как это следует из данных о галактиках Местной Группы, – около 80 пк, а у агрегатов ~200 пк.

Универсальность этих размеров, заподозренная в наших работах и подтверждаемая исследованиями Г. Р. Иванова (Софийский университет), может дать ключ к их происхождению. Для ассоциаций она может быть связана с массой молекулярного облака, минимально необходимой для появления наиболее массивных звезд. Для комплекса универсальность размеров хорошо согласуется с предположением, которое обосновали в особенности Брюс и Дебра Элмегрины, об их происхождении из сверхгигантских газовых облаков, рождающихся в результате крупномасштабной гравитационной неустойчивости газового диска галактик; такая нестабильность наиболее быстро развивается в спиральных рукавах, что и объясняет концентрацию в них звездных комплексов.

О том, что именно масштаб сверхоблаков, порождающих звездные комплексы, является исходным для звездообразования, свидетельствуют недавние результаты Р. Кеникатта. Он нашел, что активное звездообразование (о котором свидетельствует наличие областей ионизованного O^+ звездами водорода) всегда имеет место на расстояниях от центра галактик, меньших тех, при которых плотность водорода превышает некоторое критическое значение. И это именно та плотность, при которой газовый диск неустойчив к образованию сверхоблаков с характерными размерами в 1 кпк и массой 10 миллионов солнечных. Это и есть первичный масштаб звездообразования, из таких облаков рождаются звездные комплексы. И именно в таких сверхоблаках должны возникать, согласно И. Г. Колеснику, непосредственно рождающие звезды молекулярные облака, хотя в галактиках с высокой плотностью газа он, по-видимому, может быть уже преимущественно в молекулярной форме. Плотность газа не становится много выше критической именно из-за появления сверхоблаков, в недрах которых начинается его переработка в звезды.



I. NGC 1600 – галактика типа E4 по схеме Хаббла



II. NGC 3377 – галактика типа E6. Известно очень мало более сплюснутых галактик



III. NGC 4594 – галактика типа Sa с большим центральным утолщением (балджем) и диффузными спиральными рукавами



IV. NGC 3627 – галактика типа Sb с более яркими и менее закрученными спиральными рукавами, чем у галактики на фото III



V. NGC 1530 – пересеченная спиральная галактика типа SBb



VI. NGC 6946 – галактика типа Sc с широкими и клочковатыми спиральными ветвями



VII. NGC 5457, известная так же как М 101 – гигантская спиральная галактика типа Sc в созвездии Большой Медведицы. Рисунок спиралей несимметричен, вероятно, из-за гравитационного взаимодействия с ближайшими галактиками: М 101 – член небольшой группы



VIII. NGC 2403 – близкая галактика типа Sc: в ней можно наблюдать ярчайшие звезды, в том числе и некоторые переменные, по которым удалось определить расстояние до объекта



IX. NGC 4303 – пересеченная спиральная галактика типа SBc. На противоположных концах бара внутри области спиральных рукавов видны пылевые прослойки



X. NGC 1156 – неправильная галактика типа IrrI. Галактики этого типа обычно не приметны и выглядят весьма неупорядоченными по сравнению со спиральными



XI. NGC 3077 – неправильная галактика типа IrrII с прослойками пыли



XII. NGC 1332 – галактика типа S0, видимая почти с ребра. Ее форма не так близка к эллиптической, как у галактики типа E6 на фото II. Более слабая галактика ниже и левее NGC 1332 – это ее небольшой спутник типа E1



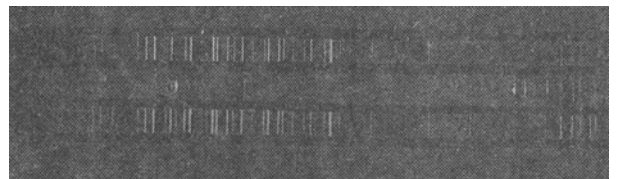
XIII. NGC 2855 – галактика типа S0 со слабыми пылевыми прослойками во внешней части, делающими ее почти неотличимой от галактик типа Sa



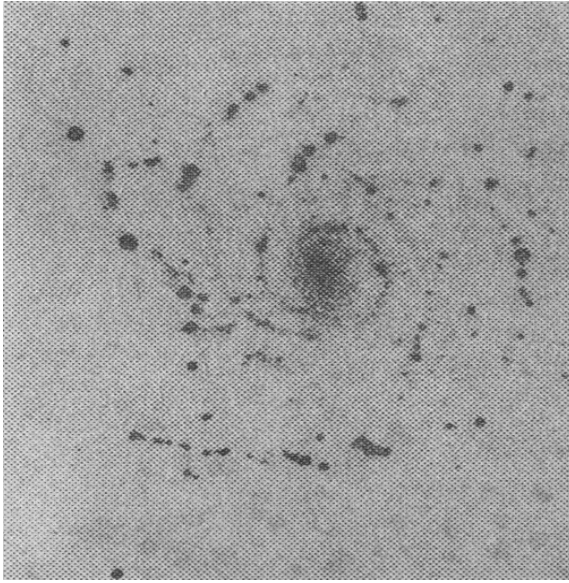
XIV. Эллиптическая галактика NGC 1399 – гигантская галактика типа E0



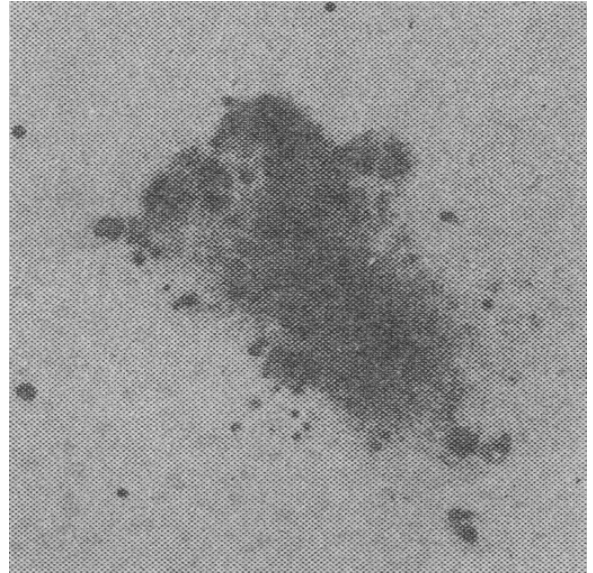
XV. На этой фотографии М 31 крупным планом виден центральный балдж из звезд населения II, с обеих сторон от которого располагается население I, к которому относятся яркие звезды и пылевые прожилки



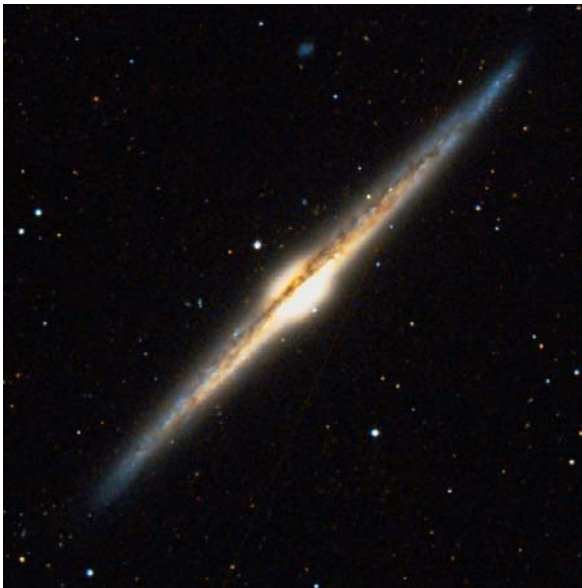
XVI. Фотография спектра неправильной галактики NGC 5253, на которой видны сильные эмиссионные линии в видимой области спектра



XVII. Распределение областей НII в гигантской спиральной галактике типа Sc NGC 1232. Эта фотография получена с фильтром, который пропускает лишь излучение светящегося газа (водорода)



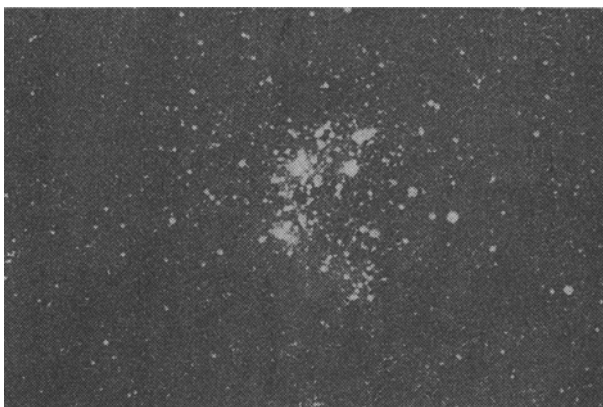
XVIII. Области НII в неправильной галактике NGC 4449, выявленные на фотографии в линии излучения водорода



XIX. Прослойки пыли на фоне центрального балджа в видимой с ребра галактике NGC 4565



XX. Гигантская спиральная галактика типа Sc NGC 5194 и ее небольшой спутник искаженной формы NGC 5195, на фоне которого видна пыль протяженного рукава спиральной галактики



XXI. Участок Большого Магелланова Облака со звездными скоплениями и газопылевыми туманностями



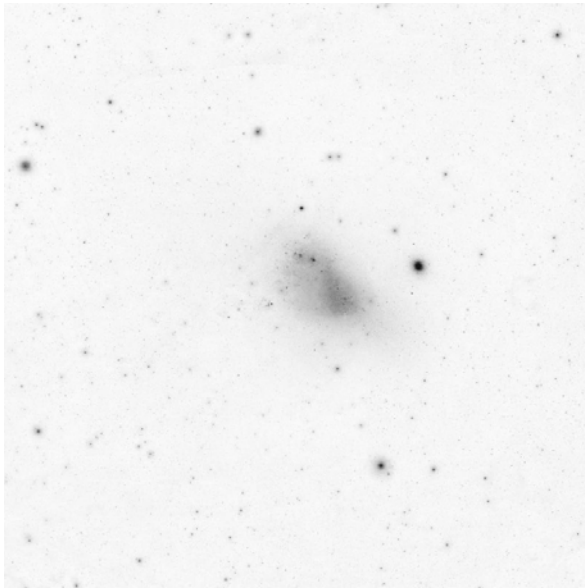
XXII. Двойная галактика NGC 5574–5576



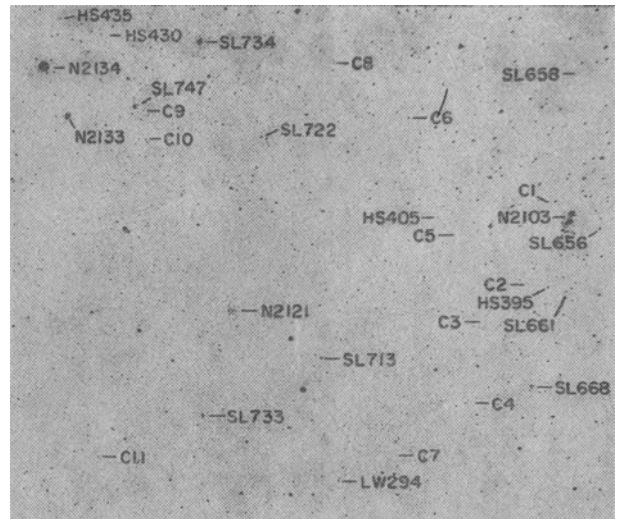
XXIII. Центральная часть скопления галактик в созвездии Пегаса



XXIV. Большое Магелланово Облако



XXV. Малое Магелланово Облако. На этой фотографии (негатив) видны имеющие малую яркость внешние части этой очень близкой, но малоприметной галактики



XXVI. Часть Большого Магелланова Облака с указанными на нем некоторыми из многочисленных звездных скоплений



XXVII. Вид крупным планом двух соседних скоплений в Большом Магеллановом Облаке. Вверху молодое рассеянное скопление NGC 1844, а внизу более старое скопление NGC 1846 с гораздо более слабыми звездами



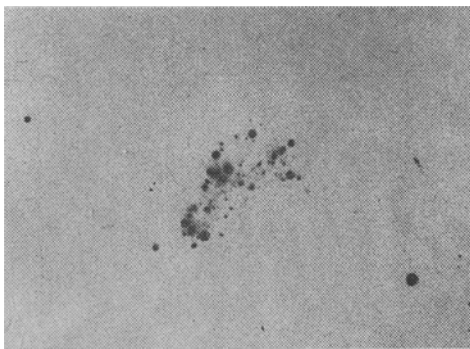
XXVIII. NGC 1978 – старое сильно эллиптическое скопление в Большом Магеллановом Облаке



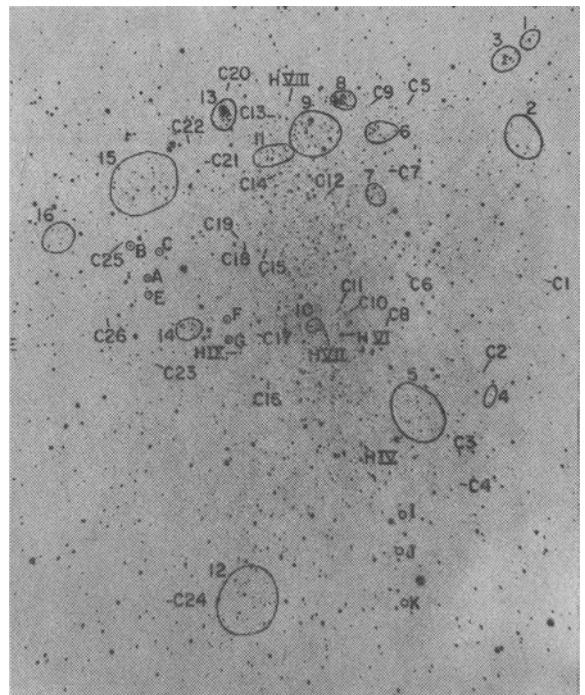
XXXIII. Большая спиральная галактика типа Sb М 81 в созвездии Большой Медведицы. Вероятно, наша Галактика Млечный Путь выглядит при наблюдении с большого расстояния примерно так же. Однако наша Галактика немного менее закручена, и ее центральный балдж не так сильно выражен



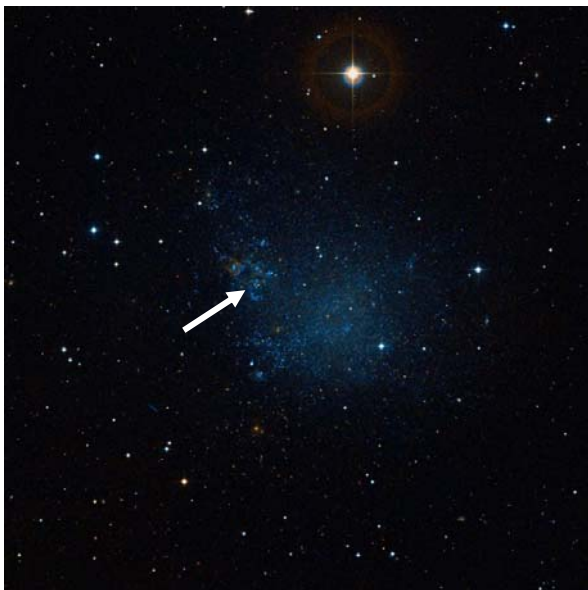
XXXIV. NGC 185 – спутник М 31, слабые красные звезды которого видны на этой фотографии. Галактика находится всего в нескольких градусах от несколько менее яркого спутника NGC 147



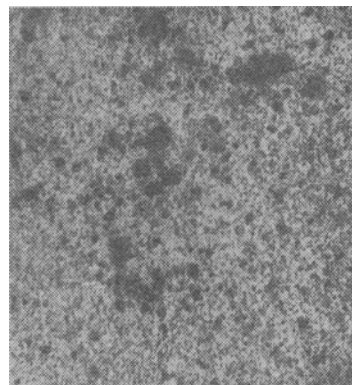
XXXV. GR 8 – экстремально карликовая неправильная галактика Местной группы



XXXVI. Звездные ассоциации и скопления в NGC 6822. Пронумерованные и обведенные объекты – это молодые звездные ассоциации. Объекты, обозначенные римскими цифрами и номерами с буквой С, представляют собой звездные скопления. Буквами обозначены также несколько звезд – стандартов блеска



XXXVII. IC 1613 – слабая неправильная галактика в Местной группе



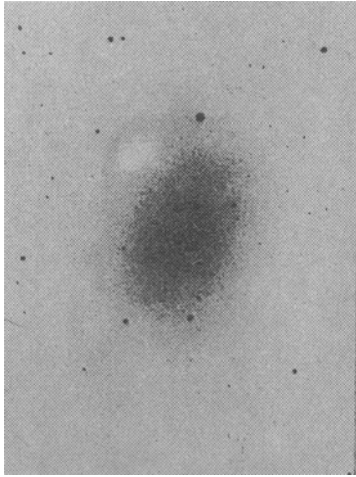
XXXVIII. Три слабых молодых скопления в IC 1613 (отмечены стрелкой на фото XXXVII)



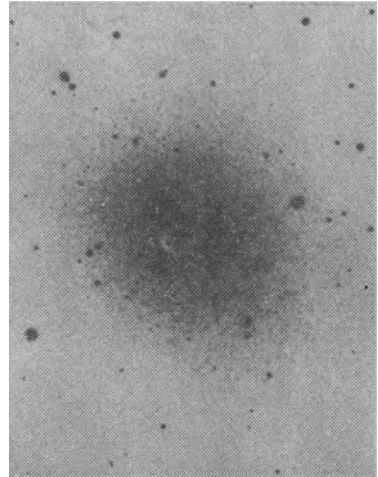
XXXIX. М 32 – маленький, но яркий эллиптический спутник М 31



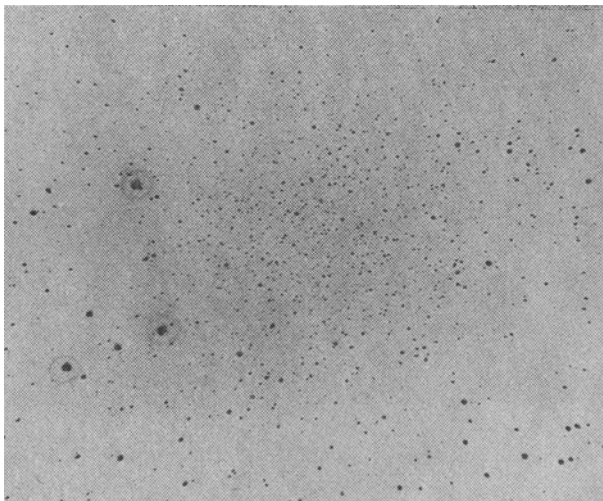
XL. Прослойки пыли в NGC 205



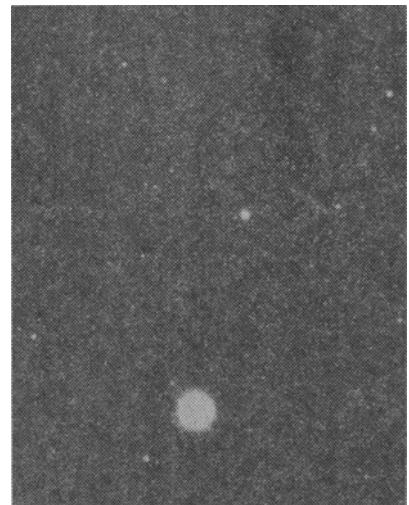
ХLI. Яркие голубые звезды в NGC 205
вблизи центра галактики хорошо вид-
ны на этой фотографии, полученной в
синей области спектра



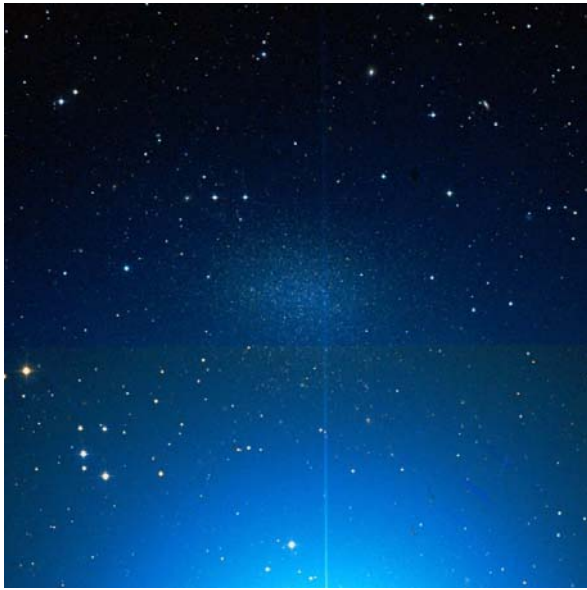
ХLII. NGC 185 с хорошо заметными про-
слойками пыли и яркими голубыми звез-
дами



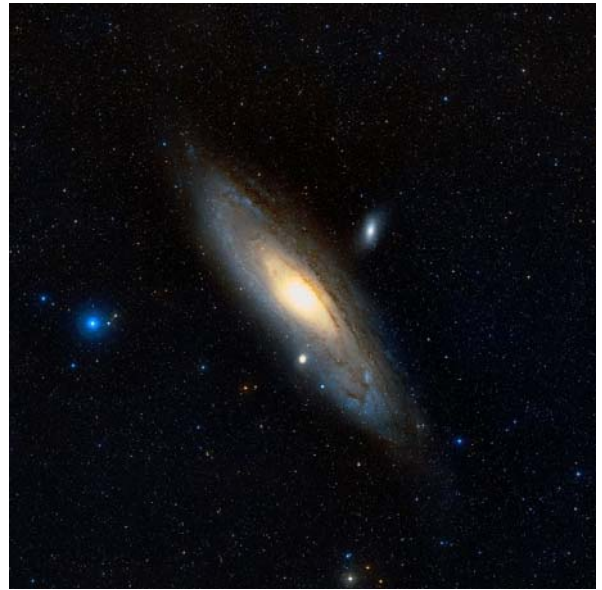
ХLIII. Система Скульптора



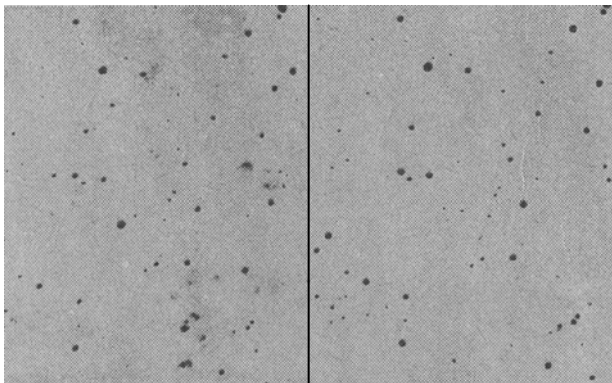
ХLIV. Галактика в созвездии Печи с ярчайшими
звездами и одним из шаровых скоплений (яркий
объект вблизи центра снимка). Яркая звезда в ниж-
ней части фотографии – звезда переднего фона из
нашей Галактики



XLV. Система Лев I



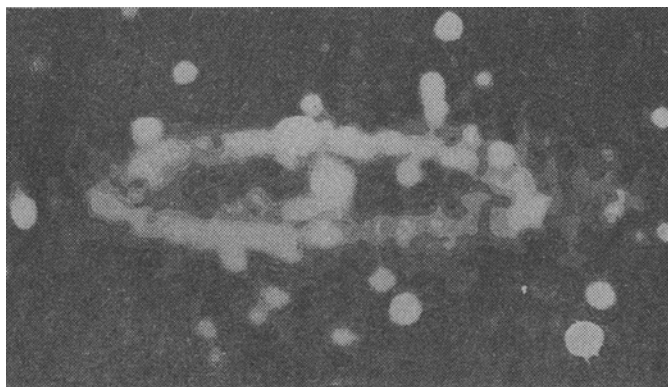
XLVI. М 31 – галактика в созвездии Андромеды. Спутник наверху – это NGC 205 (см. фото XL), а галактика-спутник меньших размеров под центром М 31 – это М 32 (см. фото XXXIX)



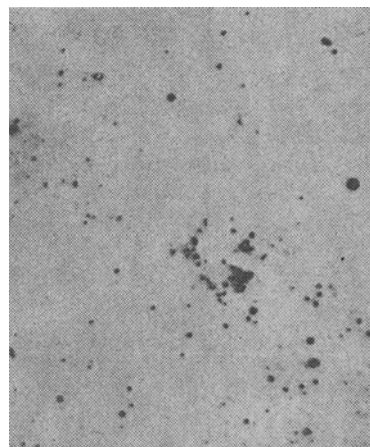
XLVII. Две фотографии внешней области галактики в Андромеде. Фотография слева получена с фильтром, пропускающим красное излучение водорода (линию Н-альфа), а справа – с фильтром, исключающим это излучение и регистрирующим только свет звезд. На левой фотографии видны изображения нескольких диффузных облаков газа (областей НII)



XLVIII. Изоденсы распределения облаков НII в далекой внешней части М 31, нанесенные на негативное изображение области. Обратите внимание на большое количество водорода, расположенного далеко за пределами оптически яркой части галактики



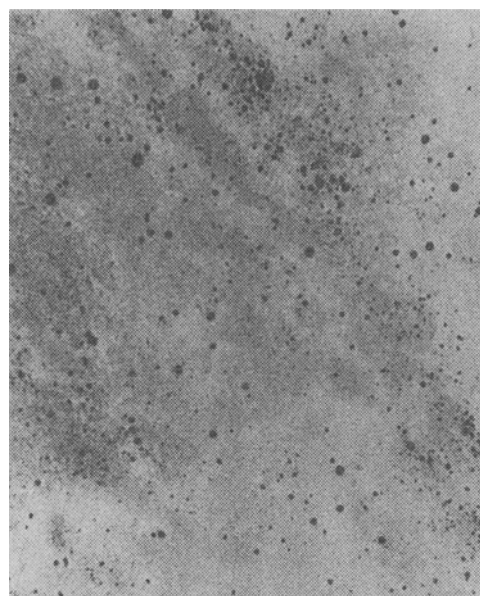
XLIX. Карта непрерывного радиоизлучения М 31, полученная на 100-метровом Боннском радиотелескопе



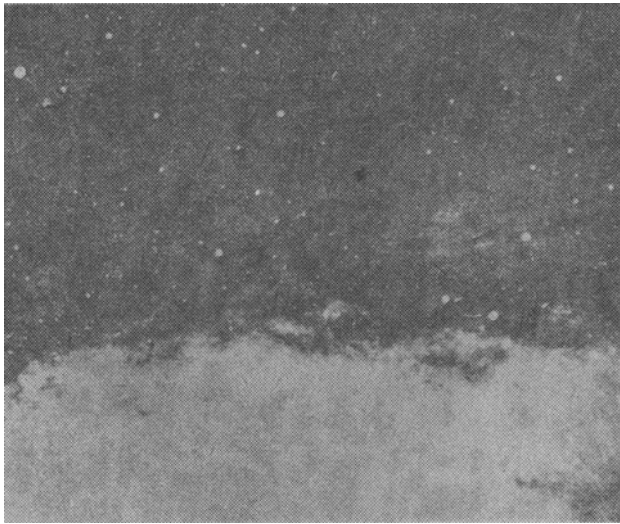
L. Небольшое рассеянное звездное скопление в М 31



LI. Звездные ассоциации в М 31



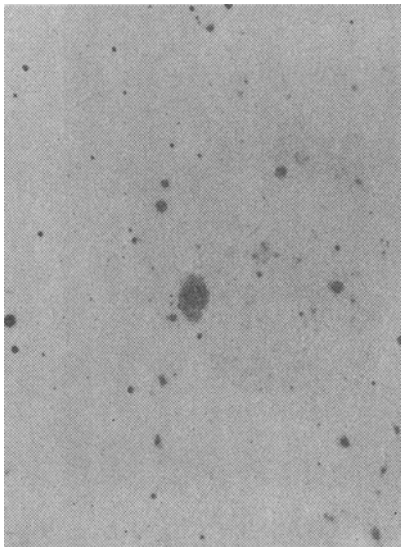
LII. Область М 31, содержащая скопления и ассоциации



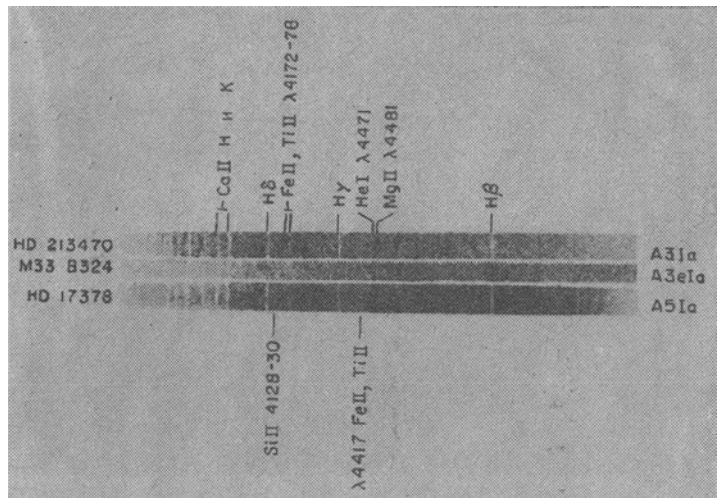
LIII. Пылевой рукав в М 31



LIV. М 33 – спиральная галактика типа Sc в Местной группе



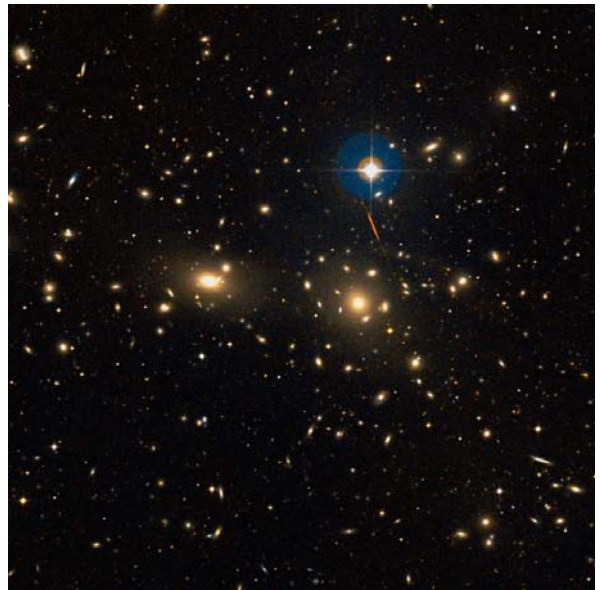
LV. Области HII в одном из фрагментов М 33. Крупнейшая известна как NGC 604 и является одной из немногих гигантских областей HII в этой галактике. Сравните эту фотографию в линии водорода с фото XLVII, на которой изображены гораздо менее яркие области HII, найденные в М 31 – галактике типа Sb



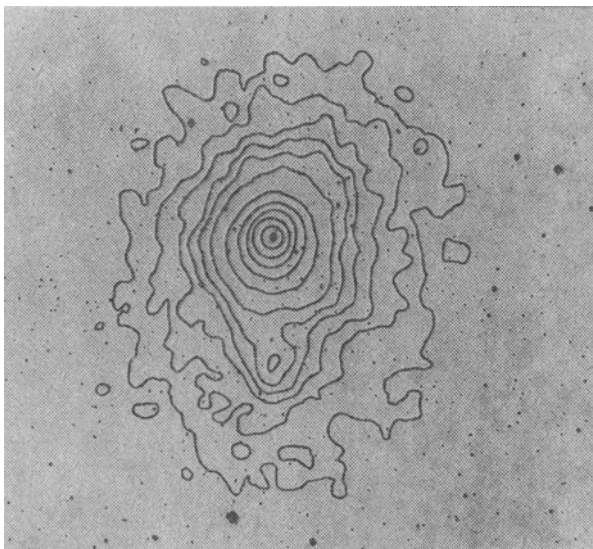
LVI. Спектр звезды-сверхгиганта в М 33 (звезда В324) в сравнении со спектрами двух стандартных галактических сверхгигантов аналогичной температуры и светимости



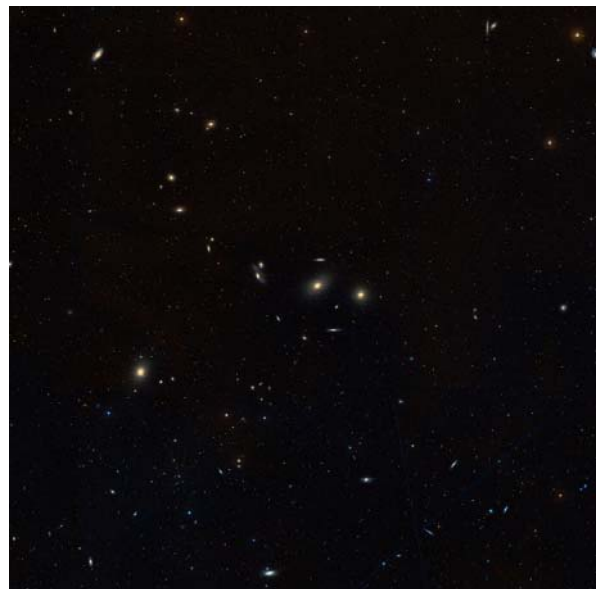
LVII. Скопление галактик в созвездии Геркулеса – слабо структурированная группа, состоящая из большого числа спиральных и эллиптических галактик. Большинство объектов на этой фотографии – галактики, хотя на фоне скопления и видно несколько звезд Млечного Пути



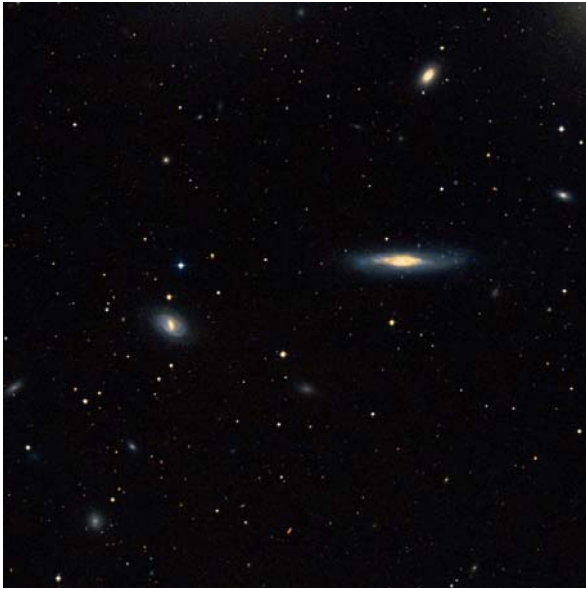
LVIII. Скопление галактик в созвездии Волос Вероники



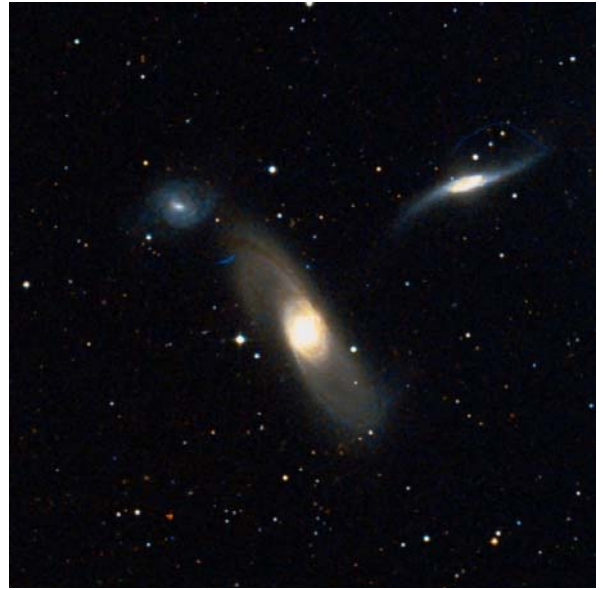
LIX. Карта распределения рентгеновского излучения в скоплении галактик Эйбелл 85, доминирующее положение на которой занимает гигантская галактика типа cD в центре скопления



LX. Центральная часть скопления галактик в созвездии Девы. Там имеются как гигантские эллиптические, так и почти столь же яркие спиральные галактики



LXI. Две спиральные галактики в скоплении в Деве



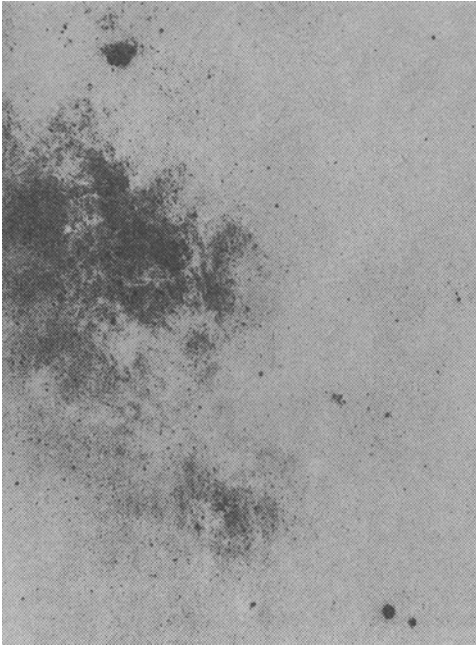
LXII. Три галактики, принадлежащие к небольшому скоплению – группе NGC 5566. Сама NGC 5566 – это гигантская спиральная галактика в центральной части фотографии



LXIII. Крупнейшие области HII в NGC 2403 видны на этой фотографии, полученной в спектральной линии водорода как диффузные облака



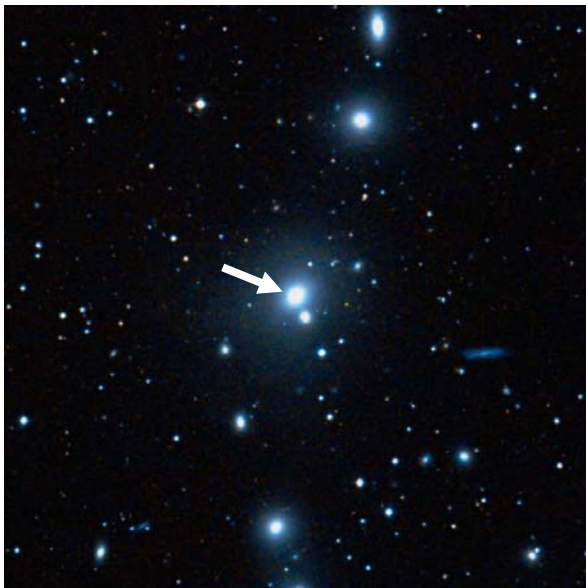
LXIV. Но II-галактика из группы NGC 2403 – одного из близких небольших скоплений, используемых для калибровки постоянной Хаббла



LXV. Пыль в Млечном Пути проявляет себя в поглощении света далеких звезд на фотографиях звездных полей вроде этой



LXVI. Очень далекое скопление галактик едва заметно на этой фотографии. Этот факт иллюстрирует исключительно большие трудности, с которыми сталкиваются в своей работе астрономы при попытках изучения самых далеких галактик



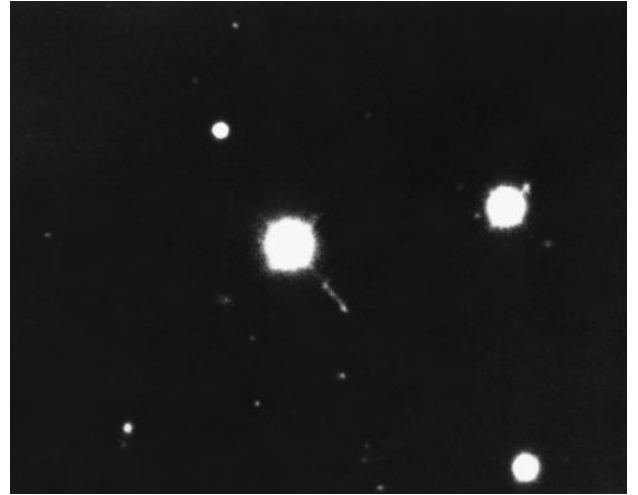
LXVII. Стрелка на этом рисунке указывает на 3C 31 – радиогалактику в небольшом скоплении галактик



LXVIII. М 82 – замечательная галактика в близкой группе



LXIX. Радиогалактика NGC 1068, которая является также и сейфертовской галактикой



LXX. 3C 273 – ярчайший и ближайший квазар. Обратите внимание на слабую «струю» света, истекающую из изображения (сильно передержанного) квазара

Научно-популярное издание

ХОДЖ Пол

ГАЛАКТИКИ

Редактор *Г. С. Куликов*

Художественный редактор *Г. М. Коровина*

Технические редакторы *Л. В. Лихачева, Е. В. Морозова*

Корректоры *Л. И. Назарова, И. Я. Кришталъ*

И Б № 41077

Сдано в набор 26.07.91. Подписано в печать 18.12.91. Формат издания 84×108 1/32. Бумага тип. № 2. Гарнитура «Таймс». Печать высокая. Усл. печ. л. 10,08. Усл. кр.-отт. 10,50. Уч.-изд. л. 10,46. Тираж 28 235 экз. Заказ № 265. С-039

Издательско-производственное и книготорговое объединение «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» Государственного комитета СССР по печати. 113054 Москва, Валовая, 28

Отпечатано в Новосибирской типографии № 4 ВО «Наука». 630077
Новосибирск-77, ул. Станиславского, 25.