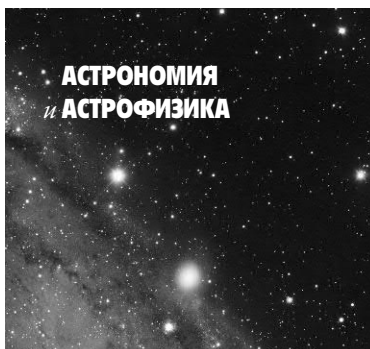




ГАЛАКТИКИ



Редактор-составитель
В. Г. Сурдин



Москва
ФИЗМАТЛИТ®
2013

УДК 524
ББК 22.67
А 91

Авторский коллектив:

*В. С. Аведисова, Д. З. Вибе, А. И. Дьяченко, А. В. Засов,
Б. В. Комберг, В. В. Орлов, Л. П. Осипков, С. В. Репин,
А. В. Рубинов, О. К. Сильченко, В. Г. Сурдин*

А 91 Галактики / ред.-сост. В. Г. Сурдин. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 432 с. — (Астрономия и астрофизика).

ISBN 978-5-9221-1445-5

Четвертая книга из серии «Астрономия и астрофизика» содержит обзор современных представлений о гигантских звездных системах — галактиках. Рассказано об истории открытия галактик, об их основных типах и системах классификации. Даны основы динамики звездных систем. Подробно описаны ближайшие к нам галактические окрестности и работы по глобальному изучению Галактики. Приведены данные о различных типах населений галактик — звездах, межзвездной среде и темной материи. Описаны особенности активных галактик и квазаров, а также эволюция взглядов на происхождение галактик.

Книга ориентирована на студентов младших курсов естественно-научных факультетов университетов и специалистов смежных областей науки. Особый интерес книга представляет для любителей астрономии.

На передней стороне обложки: спиральная галактика NGC 4414. Фото: космический телескоп «Хаббл», NASA, ESA.

На задней стороне обложки: загадочная галактика NGC 4622 с двумя системами противоположно направленных спиральных рукавов. Фото: космический телескоп «Хаббл», NASA, ESA.

На переднем форзаце: спиральная галактика Туманность Андромеды (M31). Фото: Robert Gendler.

На заднем форзаце: спиральная галактика NGC 253. Фото: R. Jay GaBany, Cosmotography.

Предисловие

Уважаемый читатель, эта книга — четвертая в серии «Астрономия и астрофизика», которую мы с коллегами создаем с 2008 года. Первая из книг этой серии, «Небо и телескоп», посвящена основным понятиям астрономии и методам астрофизических исследований. Вторая книга, «Солнечная система», рассказывает о больших и малых телах нашей планетной системы, об экспедициях к ним и о том, что астрономы смогли узнать о природе этих тел. Третью книгу этой серии мы назвали «Звезды» и рассказали в ней об истории исследования и классификации звезд, о современной физической теории внутреннего строения звезд и важнейших этапах их эволюции. Нынешняя четвертая книга в определенном смысле завершает круг, поскольку в ней мы выходим на просторы нашей галактики и далее — во Вселенную. Но это не означает, что мы заканчиваем нашу серию. Астрономия и астрофизика столь содержательны и так богаты удивительными находками, что нам бы хотелось продолжить работу и рассказать любознательному читателю о самых последних исследованиях в этой области. Результаты изучения небесных объектов настолько интересны и при этом вполне доступны для внимания широкого круга читателей, что первые четыре книги этой серии — мы надеемся — станут преддверием вашего более глубокого погружения в мир космических исследований.

Задумывая каждую новую книгу, а тем более серию книг, каждый автор пытается представить себе будущего читателя и сделать так, чтобы книга показалась ему актуальной, оказалась для него интересной и как можно дольше оставалась полезной. Сочетать все эти требования непросто. Любознательного читателя прежде всего интересуют открытия последних дней, о которых пишут в Интернете и рассказывают в новостях. Однако сенсационные сообщения редко бывают полноценными и безупречно точными; обычно они не встраиваются как органичный элемент в мозаику уже известного читателю, и поэтому, на наш взгляд, пользы от них мало. С другой стороны, самыми точными и полезными книгами, без сомнения, являются учебники и справочники, прочитать которые от корки до корки мало кому удавалось. Отдавая себе отчет, что сочетать захватывающий детектив с занудным справочником практически невозможно, мы тем не менее по-

ставили перед собой амбициозную задачу: создать книги, которые хотелось бы прочитать залпом, но при этом они бы еще долго могли служить читателю для работы и хобби. Удалось ли нам это хотя бы частично — судить вам.

В этой книге девять глав и Приложения. Первая глава — вводная: она знакомит с особенностями мира звездных систем. Вторая и третья главы посвящены физике коллективного взаимодействия звезд; эти главы наиболее математичны, поэтому тот, кто не ощущает обаяния формул, может при первом чтении их пропустить. Четвертая и пятая главы знакомят нас с локальной областью Галактики, с ее околосолнечными окрестностями, в шестой главе сделана попытка увидеть Галактику целиком. Седьмая глава рассказывает о разнообразии мира галактик, об основных характеристиках различных звездных систем, а в восьмой главе рассказано об попытках астрономов понять происхождение и проследить эволюцию галактик. В заключительной девятой главе собраны интригующие данные об активности загадочных ядер галактик. А Приложение — это то, что должно сделать нашу книгу полезным справочником для наблюдателей независимо от эволюции идей теоретиков.

В конце каждого года, подводя его итог, научные журналисты опрашивают ученых и публикуют список десяти наиболее значимых открытий года. Просматривая эти списки за последние десятилетия, мы обнаружим, что в каждом из них среди важнейших открытий значатся находки, сделанные в нашей или соседних галактиках. И это не удивительно. Ведь наша галактика и окружающие ее «звездные острова» — это и есть тот мир, в котором мы живем. Его разнообразие всегда будет превышать пределы наших знаний и даже пределы нашей фантазии. Неоткрытого в них всегда будет больше, чем известного.

«Галактики — это гигантские скопления звезд», — думали наши деды; «это скопления звезд и межзвездного газа», — уточняли наши отцы. Сегодня мы знаем, что галактики — это сложно организованные системы из звезд, планет, диффузного межзвездного вещества разнообразного типа (плазма, атомы, молекулы, пылинки), из электромагнитных квантов, релятивистских частиц, а также — по большей части (!) — из неизвестных ученым форм вещества, условно называемых темной материей. Исследования галактик сродни изучению живых клеток: мы постоянно узнаём о новых типах их внутренних структур и населяющих их объектов, о способах их взаимодействия друг с другом, о процессах их конкуренции и взаимного поглощения (а порою и деления!), но до сих пор мы не имеем точных данных об их происхо-

ждении. Подобно тому как живые организмы состоят из клеток, «организм» Вселенной состоит из галактик. Чем больше мы узнаем о галактиках и клетках, тем интереснее становится эта аналогия. Вспомним хотя бы о ядрах: у одних галактик/клеток они есть, у других — нет. Но главная загадка тех и других скрыта пока в глубине времен — это загадка их происхождения.

Уникальной особенностью науки о галактиках является возможность непосредственного изучения объектов такими, какими они были в далеком прошлом. Благодаря конечности скорости света излучение, рожденное в очень далеких галактиках, идет к нам миллиарды лет, что позволяет, сравнивая свойства объектов на различных расстояниях, исследовать изменения, которые произошли с галактиками за это время. Изучение происходящих эволюционных изменений во Вселенной — захватывающая задача современной науки.

Открыть тайну происхождения галактик мечтают все астрономы, чем бы конкретным они ни занимались: строили телескопы, изучали планеты или звезды. Эту серию книг, охватывающую многие области астрономии, невозможно было бы создать ни в одиночку, ни даже усилиями коллектива авторов (а их в этой серии уже около 30). Только постоянные консультации с коллегами помогают быть на уровне последних исследований, уберечься от ошибок и перегибов. Астрономы — это своеобразная всемирная деревня. Каждый из нас — лично или «интернетно» — знаком с большинством своих коллег по всей Земле: ведь на нашей планете всего лишь несколько тысяч астрономов! Работа и успех каждого из нас зависит от работы коллег. Мы часто консультируемся друг с другом и никогда не отказываем в помощи ни своим коллегам, ни журналистам, ни любознательным гражданам. Ведь только совместными усилиями можно понять такую грандиозную вещь, как Вселенная. Нужно признать, наша работа редко оборачивается прямой выгодой для человечества. В этом смысле она сродни работе музыканта или художника. Но понимание окружающего нас мира не только возвышает душу, но и добавляет нам спокойствия и уверенности, в конечном счете — оберегает от превратностей природы.

Неправда, что знания преумножают печали. Знания вселяют уверенность. Вы обращали внимание на лица астрономов, комментирующих сообщения журналистов о грядущих космических катастрофах? Обычно на лице у астронома смущенная улыбка: он ясно понимает и беспочвенность сиюминутных страхов, и неизбежность эволюции как череды рождений и угасаний, и грандиозный масштаб космических процессов, далеко выходящий за пределы нашей фантазии. Это



Знаменитый голландский астроном Ян Оорт (1900–1992) в Лейденской обсерватории. Глядя в телескоп, астроном видит прошлое Вселенной и пытается представить будущее нашего мира.

чувство сродни мудрому спокойствию взрослого человека, наблюдающего, как ребенок испугался пчелы. Стоит ли бояться пчелы, осознавая бренность жизни... Астроном видит далеко вглубь времен —

и в прошлое, и в будущее. Знание о прошлом вселяет уверенность в безоблачности ближайших дней, а предвидение будущего делает мелкими все текущие неприятности.

Впрочем, довольно «философствовать». Мы отправляемся на просторы Галактики, и это потребует от нас изрядного напряжения фантазии: переход от уже ставших привычными для нас масштабов тел Солнечной системы к масштабам межзвездных расстояний — самый грандиозный из всех пространственных скачков в современном естествознании. Размеры звезд ($\sim 10^9$ м) отличаются от расстояний между ними ($\sim 10^{17}$ м) на 8 порядков. Где еще в материальном мире нам приходится мысленно совершать столь масштабный переход? Поэтому давайте попытаемся вжиться в своеобразный мир гигантских звездных систем, все части которых с бешеной скоростью хаотически движутся в пространстве, но при этом практически никогда не сталкиваются друг с другом. В этих системах доминирует одна сила — гравитация, но при этом они демонстрируют способность к самоорганизации, создавая изящные структуры в звездных дисках.

Менее ста лет назад астрономы убедились в существовании галактик, а сегодня мы знаем о них чрезвычайно много. Но знать и понимать — не одно и то же. Мы еще очень многого не понимаем в жизни галактик, причем это касается отнюдь не частных, а принципиальных моментов их происхождения и эволюции. Мир галактик — это огромная неисследованная область, Клондайк для естествоиспытателей, а наша книга — лишь карта, намечающая путь к этим сокровищам.

К сожалению, каждый автор вслед за Ньютоном может повторить его слова, сказанные в письме Котсу от 11 октября 1709 г.: «It's impossible to print the book without some faults». Поэтому мы надеемся на придирчивое внимание читателя. Любые замечания и дополнения по содержанию книги с благодарностью будут приняты по адресу surdin@sai.msu.ru. А исправления неизбежных ошибок и опечаток вы найдете на странице <http://lnfm1.sai.msu.ru/~surdin/AAproof.htm>.





ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, ВСЕЛЕННАЯ

В. Г. Сурдин

1.1. Всё не так

Среди множества астрономических терминов есть слова, почти не известные широкой публике: альмукантарат, пиргелиометр, сидеростат... Но некоторые астрономические слова прочно вошли в повседневный обиход и стали обыденными: звезда, галактика, вселенная... Постоянно мы слышим о звездах эстрады и мирового хоккея, регулярно заходим в киноцентр «Галактика» и на сайт «Галактика знакомств», а вселенная — это в пределах географии: «Всю-то я вселенную проехал, нигде милой не нашел!» Однако тем специалистам, кто воспринимает эти слова буквально, приходится изрядно напрягать воображение, чтобы ощутить удивительные, далекие от привычных свойства этих объектов, ибо научная работа начинается не с написания формул, а с мысленного моделирования объекта исследования.

Если вы астроном, то все добытые вами факты о звезде или галактике должны лечь в мозаику того их образа, который постоянно стоит перед вашим мысленным взором. По мере изучения объекта его образ становится всё более осязаемым, и вот вы уже можете дать прогноз, каких элементов не хватает в вашей мозаике, т. е. каких еще явлений можно ожидать от изучаемого объекта. Когда наблюдения подтверждают эту догадку, вы ощущаете наивысшую радость от научной работы. И печально, если прогноз не оправдывается: значит, интуиция вас подвела, и мысленный образ объекта был неверен. У каждого специалиста в голове свои «модели». В ходе исследований мы живаемся в предмет своего интереса, независимо от того, галактика это или муравей. Мы начинаем чувствовать диапазон его возможностей ровно так же, как водитель чувствует свой автомобиль, заранее зная, как тот отзовется на поворот руля или нажатие педали. Но интуиция — дочь опыта, а он всегда ограничен. Живя на Земле, мы с трудом представляем себе космос с его невероятно широким диапазоном физических условий.

Из собственной практики помню такой случай. Готовя обзор о межзвездной среде, я составил таблицу обнаруженных в космосе молекул. Чтобы облегчить астрономам восприятие сухих химических формул, я решил указать названия соответствующих веществ: согласитесь, интереснее узнать, что в космических облаках присутствует не просто НСООН , а муравьиная кислота, и не просто $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, а этиловый (винный) спирт. Однако названия некоторых молекул я не смог обнаружить в доступных мне источниках, а Интернета тогда еще не было. Поэтому, перейдя через сквер с памятником Ломоносову, я зашел на химический факультет МГУ и, отворив дверь ближайшей лаборатории, показал свой список космических молекул ее сотрудникам. Некоторым из безымянных молекул они сразу же дали названия. Но, посмотрев на оставшиеся (а это были C_3N , C_3H и т. п.), химики только покачали головой, сочувственно переглянулись (мол, что с него взять — физик) и сообщили, что таких молекул в природе быть не может. Оказалось, что это свободные радикалы — чрезвычайно активные частицы, моментально вступающие в реакцию с любыми другими. Тут уж мне пришлось объяснить химикам, что даже в плотных облаках космического вещества такая пустота, что активная молекула может долго — десятки лет! — летать в одиночестве, пока встретит другую. Заинтересовавшись, химики сами попросили присылать им таблицы космических молекул.

Астрономы не раз уже ломали привычное представление ученых о возможном и невозможном. Достаточно вспомнить «запрещенные» спектральные линии, которые не видны в лаборатории, но ярче других линий светят в спектрах космических туманностей. Или открытие в космосе загадочных «химических элементов», которые не присутствуют на Земле: небулия, корония, мистериума... — все они оказались обычными элементами в необычных для землян космических условиях, типичных для любой галактики.

Как видим, при изучении космических объектов не нужно забывать об их парадоксальных свойствах. Пример космического парадокса предельно лаконично сформулировал французский физик и астроном XIX в. Жак Бабине: «Кометы — это видимое ничто». В этой фразе Бабине проявил себя и как астроном («видимое»), и как физик («ничто»), ибо вещество в хвосте кометы намного разреженнее лабораторного вакуума. Что же в таком случае мы можем сказать о галактиках, средняя плотность и поверхностная яркость которых существенно меньше, чем у хвостов комет? Скажем так: *галактики — это почти невидимое нечто*. Особый смысл этому определению придает тот

факт, что большая часть массы в галактиках, похоже, действительно невидима: это темное вещество, или темная материя, как говорят теоретики. Интенсивное развитие астрономии за последние полвека привело к обнаружению нескольких «темных сущностей» — черных дыр, темной материи, темной энергии... В последнее время астрономы все чаще употребляют прилагательное *dark* как синоним необъяснимого или пока не объясненного: недавно для описания коллективного движения скоплений галактик родился термин «dark flow» (темный поток), а для теоретического описания неожиданных эффектов гравитации — термин «dark fluid» (темная среда). Скептики шутят: «Ах, как это научно: объяснять непонятное неизвестным! Скоро в астрономии не останется белых пятен — одни лишь темные». В одном они правы: можно было бы проявить большую фантазию в названиях. Но что касается самих нерешенных проблем, то их в астрономии не больше, чем в любой активно функционирующей науке. И, будем надеяться, интересные задачи никогда не иссякнут.

Итак, знакомство с миром галактик мы начинаем с описания соответствующих масштабов пространства и времени и с выяснения того, что в этом мире доступно нашим чувствам и приборам, а что — пока нет.

1.2. Масштабы, которые мы постигаем

Когда мы задумываемся о мире галактик, нас в первую очередь потрясают размеры и расстояния. До ближайшего космического тела свет идет секунды, до ближайшей звезды — минуты, нашу планетную систему луч света пересекает за часы, а до самых внешних границ Солнечной системы он добегаёт за пару лет. Разумеется, все эти расстояния очень велики, но наш трюк со скоростью света позволяет представить их в виде разумных интервалов времени, привычных в быту для человека. Однако попытавшись измерить «световой рулеткой» Галактику, мы сразу же оказываемся за пределами привычных масштабов. Луч света пересекает нашу звездную систему за 100 000 лет, добирается до соседней крупной галактики за 2,5 млн лет, а от наиболее удаленных звездных систем, расположенных на границе наблюдаемой части Вселенной, свет шел к Земле многие миллиарды лет. Такой интервал времени уже теряет для нас всякую наглядность. Так что даже луч света с его чемпионской скоростью не помогает представить безумные космические расстояния.

В повседневной жизни мы оперируем сравнительно узким диапазоном расстояний: от миллиметра до нескольких тысяч километров —

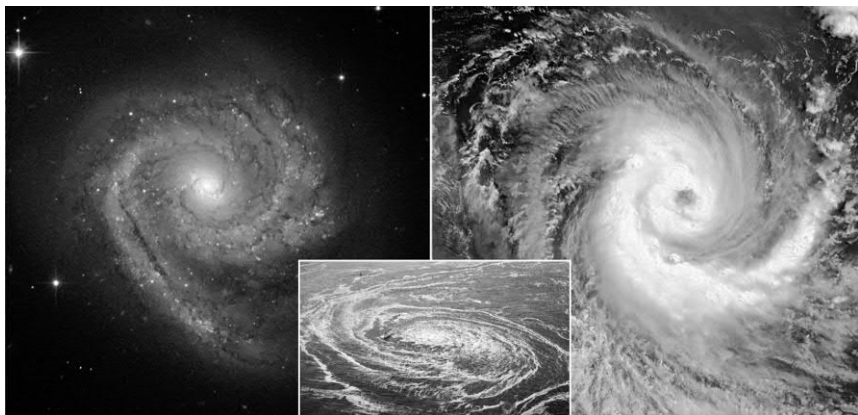


Рис. 1.1. За внешним сходством объектов порой скрывается колоссальная разница масштабов и физических свойств. Атмосферный циклон (справа) больше морского водоворота в 100 тыс. раз и меньше галактики в 1000 трлн раз.

это диапазон всего в 10 порядков величины. В науках о природе диапазон измеримых расстояний простирается сегодня значительно шире: от 10^{-16} см до 27 млрд световых лет, т. е. на 44 порядка! На одном конце этого диапазона работает астрономия, на другом — физика элементарных частиц. Таблица 1.1 дает представление о том, как расширялся за последние столетия диапазон размеров объектов и явлений, изучаемых наукой. За четыре века он вырос в 10^{31} раз, причем 10^{14} приходится на физику и 10^{17} на астрономию. Особенно сильный рывок произошел в XX в.: умея в начале прошедшего столетия измерять расстояния лишь до ближайших звезд, астрономы в конце века «дотянулись» почти до границ Вселенной.

Таблица 1.1

Предельные измеренные расстояния и их диапазон

Наука	Исторический период						
	до XVII в.	1650 г.	1840 г.	1910 г.	1960 г.	1990 г.	2010 г.
Астрономия	$4 \cdot 10^5$ км	10 а. е.	1 пк	1 Мпк	100 Мпк	3000 Мпк	4000 Мпк
Физика	0,1 мм	1 мкм	10^{-8} см	10^{-12} см	10^{-13} см	10^{-15} см	10^{-16} см
Диапазон	10^{13}	10^{18}	10^{26}	10^{36}	10^{39}	10^{43}	10^{44}

Впрочем, стремительное продвижение вперед, возможность дотянуться «до самых до окраин», вовсе не означает, что природа в этом диапазоне уже детально изучена. Не обсуждая физику микромира, скажу об астрономии: мы рванули к границам Вселенной, оставляя в тылу нерешенные вопросы. Тактика любого наступления гласит: если

авангард умчался вперед, а обозы за ним не успевают, значит, будут проблемы. До сих пор измерение расстояний остается важнейшей проблемой астрономии. Мало «дотянуться до края Вселенной», необходимо еще точно измерить расстояние до самых далеких объектов: только так мы узнаем их истинные характеристики, поймем их физическую природу и восстановим ход их эволюции.

Нужно признать, что астрономы всегда недооценивали размеры мира, который они изучают. Сначала границу мира они проводили по орбитам внешних планет, затем отодвинули ее к визуально наблюдаемым звездам, затем к звездам, видимым в телескоп. В конце XVIII в. Вильям Гершель считал, что Галактика ограничена сравнительно небольшой околосолнечной областью. В середине XIX в. Иоганн Мёдлер указывал на звездное скопление Плеяды как на центр Галактики. Сегодня это выглядит наивно, но не будем забывать, что Гершель и Мёдлер были ведущими астрономами своей эпохи. Так что весьма вероятно, что и наши представления о пространстве Вселенной лет через сто покажутся столь же наивными.

Масштабы времени в астрономии еще более своеобразны. Трудно представить, что в истории Вселенной были эпохи, когда весь мир до неузнаваемости изменялся за безумно малые доли секунды, а затем оставался почти неизменным миллиарды лет.

Вот краткая история Вселенной.

1.3. Прошлое и будущее нашего мира

П р о ш л о е

Эпоха инфляции ($0-10^{-32}$ с). В результате Большого взрыва родилась наша Вселенная. Произошло ее стремительное расширение (инфляция).

Эпоха рождения сил ($10^{-32}-10^{-12}$ с). Из первоначально единого взаимодействия сначала выделилось сильное ядерное, а затем электрослабое распалось на электромагнитную и слабую ядерную силы.

Эпоха рождения элементарных частиц ($10^{-12}-1$ с). Она объединяет в себе эпоху кварков ($10^{-12}-10^{-6}$ с), когда пространство было заполнено кварк-глюонной плазмой, и эпоху адронов ($10^{-6}-1$ с), когда рождались протоны и нейтроны, а также антипротоны и антинейтроны. В конце этой эпохи большая их часть аннигилировала, а оставшиеся протоны и нейтроны (которых оказалось чуть больше, чем античастиц) входят сейчас в ядра химических элементов. Тогда же Вселенная стала прозрачной для нейтрино, которые с того момента свободно распространяются в пространстве; если мы научимся их реги-

стрировать, то узнаем, что было во Вселенной через 1 секунду после ее рождения.

Эпоха лептонов (1–10 с). В это время температура еще настолько высока, что активно рождаются и аннигилируют лептоны и антилептоны (в основном электроны и позитроны). Именно в них в это время заключена основная масса Вселенной. В конце этой эпохи остаются только электроны в небольшом количестве. Далее в течение многих тысячелетий по плотности энергии во Вселенной доминирует излучение — кванты, родившиеся при аннигиляции частиц и античастиц.

Эпоха нуклеосинтеза (3–20 мин). Происходят термоядерные реакции с участием протонов и нейтронов: образуются легкие элементы — дейтерий, гелий, литий. Сложившийся тогда химический состав вещества Вселенной (около 75% водорода и 25% гелия по массе), по сути, сохранился до наших дней; звездный нуклеосинтез добавил к нему лишь около 1% более тяжелых элементов.

Эпоха остывания и зарождения структуры (до 10^8 лет). Почти однородная плазма, пронизанная излучением, расширяется и остывает. При этом плотность излучения падает быстрее плотности вещества (атомных ядер), и при возрасте Вселенной около 70 тыс. лет они сравниваются. Эра доминирования излучения заканчивается. Но вещество все еще ионизовано, оно активно взаимодействует с фотонами, давление которых делает вещество упругим, «не поддающимся» гравитации. Однако во Вселенной есть и другое, небарионное, вещество, которого в несколько раз больше. Это так называемое темное вещество, или темная материя. Природа его неизвестна, но мы знаем, что это вещество не взаимодействует с излучением и подчиняется только гравитации. В целом оно расширяется так же, как все остальные компоненты Вселенной, однако возникшие в период инфляции малые флуктуации плотности постепенно усиливаются под действием гравитации именно в темном веществе, не обладающем упругостью. Вселенная становится все менее и менее однородной: в ней возникают области с большей и меньшей плотностью темного вещества. Но обычное, барионное, вещество пока сохраняет высокую степень однородности.

Эпоха рекомбинации (200–400 тыс. лет). Вселенная расширяется, вещество и излучение остывают. Наконец космическая плазма охлаждается настолько, что происходит рекомбинация: электроны связываются с ядрами и образуются нейтральные атомы. У основного компонента барионного вещества — водорода — это происходит при температуре около 4000 К, у гелия — немного раньше. Когда с момента

Большого взрыва проходит около 350 тыс. лет (это соответствует красному смещению $z \approx 1100$), ионизованное вещество становится нейтральным, а Вселенная становится прозрачной для излучения, которое «отделяется» от вещества. Сейчас мы регистрируем это излучение как «космическое микроволновое фоновое», короче — реликтовое излучение с температурой $T = 2,725$ К. Именно оно демонстрирует нам эпоху рекомбинации. Чрезвычайно малые различия в температуре этого излучения, приходящего к Земле с разных направлений ($\Delta T/T \approx 10^{-5}$), говорят о том, что и флуктуации плотности барионного вещества накануне той эпохи были столь же малы.

Эпоха тьмы (1 млн — 150 млн лет). Остывая, барионное вещество перестает излучать свет и постепенно становится невидимым, подобно темной материи. Для глаз человека Вселенная погружается во тьму, но именно в эту эпоху она приобретает структуру: нейтральный газ, потеряв упругость, которую ранее ему обеспечивало излучение, начинает подчиняться гравитации темной материи, которая к тому моменту уже далеко не так однородна. В ней неоднородность плотности уже усилилась примерно до 1%. Темная материя начинает распадаться на отдельные волокна и облака, к которым стягивается и барионное вещество. Постепенно барионное вещество становится даже более неоднородным, чем темная материя. Причина в том, что при гравитационном сжатии любое вещество не только уплотняется, но и нагревается, отчего давление в нем растет, и это препятствует сжатию. Однако обычное вещество, в отличие от темной материи, может испускать электромагнитное излучение; при этом оно охлаждается и легче поддается гравитационному сжатию. А у темной материи такой возможности нет.

Эпоха реионизации (150 млн — 1 млрд лет). Так, в полной темноте (хотя инфракрасное излучение, конечно, присутствовало, но мы бы его не увидели), формируются первые, сравнительно небольшие, галактики, а в них рождаются первые, весьма крупные, звезды и, возможно, квазары. Их мощное излучение разогревает окружающий газ, и он вновь становится ионизованным. Этот период в истории Вселенной так и называют — эпоха реионизации, т. е. повторной ионизации. С той поры и до наших дней барионное вещество Вселенной в основном находится в ионизованной форме.

Этапы спокойной эволюции (1–14 млрд лет).

4 млрд лет — максимальная интенсивность формирования звезд. В их недрах образуются тяжелые элементы. Рождаются первые планетные системы. Формируются крупные скопления галактик.

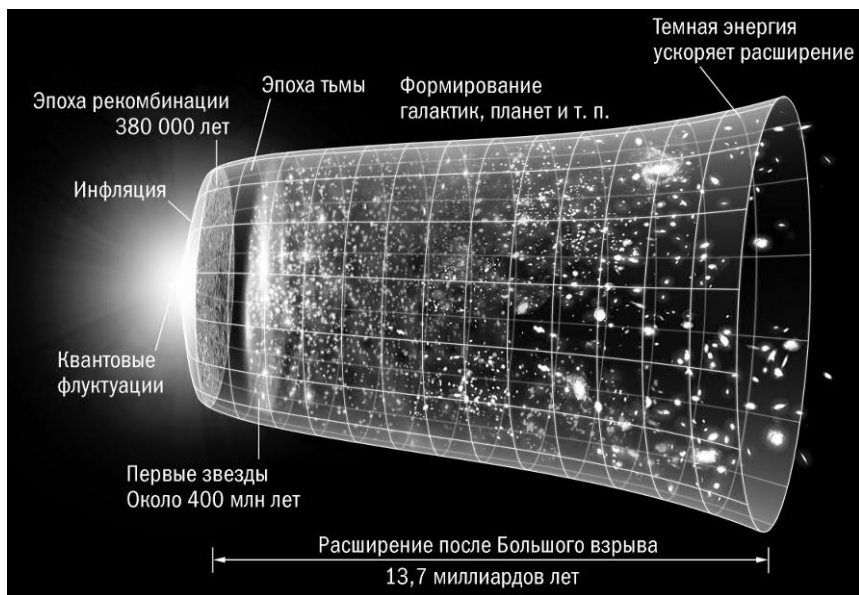


Рис. 1.2. Прошлое Вселенной. Рисунок: NASA/WMAP Science Team.

8 млрд лет — в масштабах скоплений галактик всемирное отталкивание (темная энергия) преодолевает гравитацию — процесс расширения Вселенной начинает ускоряться.

9 млрд лет — образуется Солнечная система, на Земле зарождается жизнь.

Н а с т о я щ е е

Современная эпоха (13,7 млрд лет). Практически все галактики и их скопления уже сформировались. Крупные галактики «поедают» мелкие. В некоторых галактиках еще продолжают формироваться звезды, хотя и не так интенсивно, как раньше.

Б у д у щ е е

5–20 млрд лет — Солнце будет светить все сильнее, и жизнь на Земле исчезнет. Солнце превратится в красный гигант: расширяясь, оно поглотит Меркурий и Венеру, а Земля в это время потеряет атмосферу и воду. Поверхность Солнца приблизится к орбите Земли, и наша планета погрузится в солнечную плазму. Затем Солнце превратится в белый карлик: сожмется до размера планеты и постепенно остынет. Примерно тогда же Галактика столкнется с Туманностью Андромеды, но никаких катастрофических последствий это не вызовет.

100 млрд — из-за ускоренного расширения Вселенной галактики вне Млечного Пути станут для нас невидимыми.

1 трлн лет — время жизни звезд начнет сокращаться из-за роста содержания в них тяжелых элементов.

10 трлн лет — взорвется последняя массивная сверхновая.

100 трлн лет — погаснет последняя звезда.

10^{20} лет — Галактика разрушится, постепенно потеряв из-за диссипации все свои звезды.

10^{34} лет — распадутся протоны.

10^{100} лет — испарятся черные дыры галактического масштаба.

Кто-то скажет, что такие прогнозы делать просто, поскольку их трудно проверить (и вспомнит при этом историю про Ходжу Насреддина, осла и шаха). Но это не совсем так. Прогноз будущего Вселенной отражает уровень современной науки. Такой прогноз делается с полной ответственностью, но без особой надежды, что он оправдается. Если вспомнить, что 100 лет назад ученые еще не были уверены в существовании мира за пределами нашей галактики, то можно представить, какую улыбку вызовут наши нынешние прогнозы лет через сто. Тем не менее сегодня мы представляем эволюцию Вселенной именно так.

1.4. Небо, которое мы наблюдаем

Вернемся к вопросу о полноте наших представлений о Вселенной. Глядя на ночной небосвод, мы видим некоторую область Вселенной, окружающую Солнечную систему. Велика ли эта область? Какие объекты в ее пределах доступны нашему зрению, а какие — нет? Много ли этих невидимых объектов и можно ли их обнаружить с помощью современных технических средств? Это далеко не праздные вопросы. В течение XX в. граница области Вселенной, охваченной астрономическими наблюдениями, продвинулась от ближайших объектов в солнечной окрестности нашей Галактики (масштаб расстояний порядка $1 \text{ пк} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}$) до сверхскоплений галактик и области (она же эпоха) рождения реликтового излучения: масштаб расстояний возрос до $1 \text{ Гпк} = 3,0857 \cdot 10^{25} \text{ м}$, а соответствующий масштаб времени — до 10 млрд лет. Таким образом, наблюдениями оказалась охвачена практически вся принципиально доступная область Вселенной, учитывая ее космологический возраст (около 14 млрд лет) и ограниченность скорости света. Столь грандиозное достижение наблюдательной астрономии вызывает определенную эйфорию и создает впечатление почти полной исчер-

панности изучаемых объектов или уж, во всяком случае, основных их типов.

Серьезный удар по этой точке зрения нанесло открытие эффекта ускорения при расширении Вселенной, причиной которого полагают антигравитационное влияние неизвестной среды, условно названной темной энергией (Чернин, 2008). По своему вкладу в среднюю плотность энергии/массы Вселенной она составляет около 73%. Еще 22% приходится на долю темной материи, проявляющей себя только гравитационным влиянием на масштабах от 100 кпк до 100 Мпк и пока никак не соотносимой с известными типами вещества. Оставшиеся 5% — это суммарная плотность всех нормальных (барионных) типов вещества, т. е. вся таблица Менделеева, включая не связанные в атомах частицы типа нейтрино. На долю излучения приходится совсем немного — несколько сотых долей процента полной энергии Вселенной. Таким образом, 95% содержимого Вселенной оказались загадочными даже по своей физической сущности, не говоря уже о форме (пока не ясно даже, в какие объекты оформлена темная материя, значительно более понятная по своим физическим свойствам, чем темная энергия). Тот факт, что еще недавно мы настолько неверно представляли себе истинный состав Вселенной, заставляет пересматривать и другие устоявшиеся взгляды. В частности, имеет смысл проверить, насколько полно наш невооруженный глаз замечает на ночном небе объекты ближнего космоса.

Мы ограничим этот анализ областью за пределами Солнечной системы ($R > 0,5$ пк), которую условно назовем «областью неподвижных звезд». В нее не попадают постоянные объекты Солнечной системы, поскольку там они не могут устойчиво двигаться из-за приливного гравитационного влияния со стороны ближайших звезд, гигантских молекулярных облаков и Галактики в целом (Сурдин, 1986, 1990). В то же время в нашу эпоху не обнаруживается ни одной звезды на расстоянии $R < 1$ пк от Солнца. Разумеется, время от времени звезды проникают в эту область, но для типичных звезд, движущихся с типичной для солнечного окружения скоростью $v = 30$ км/с, характерное время перемещения относительно ближайших соседей весьма велико: $t = 1 \text{ пк} / 30 \text{ км/с} = 33\,000$ лет. (Удобно запомнить, что со скоростью 1 км/с расстояние в 1 пк преодолевается за 1 млн лет). Этот промежуток времени значительно превышает характерное время эволюции нашей цивилизации (3000 лет). Что же касается ярких звезд, легко доступных невооруженному глазу, то в отношении них картина звездного неба меняется еще медлен-



Рис. 1.3. Млечный Путь над Европейской Южной обсерваторией на горе Серро-Паранал (Чили). Фото: ESO/Jose Francisco Salgado

нее — с характерным временем в сотни тысяч лет (Moore, 2000). Таким образом, ближней границей области звездной Вселенной, охваченной нашим взором в ночное время, можно считать расстояние около 1 пк. Относительно дальней границы этой области вопрос решается сложнее.

В принципе мы могли бы замечать невооруженным глазом редкие и особенно мощные явления даже на космологических расстояниях, например оптическое послесвечение гамма-всплесков, блеск которых в максимуме иногда достигает $5-6^m$. Но эта возможность чисто теоретическая: до сих пор их так никто и не видел, во всяком случае не регистрировал. Наиболее далекий реально наблюдаемый объект — спиральная галактика Мессье 31 (M31), она же Туманность Андромеды, удаленная от нас на 780 кпк, однако и ее человек без специального опыта наблюдений обычно на небе не замечает. Говорят, что на южном небе без особого труда видно соседнюю галактику — Большое Магелланово Облако (расстояние от Солнца около 50 кпк) и даже ее соседа — Малое Магелланово Облако (около 60 кпк), но нам, жителям северных стран, это недоступно. Вероятно, самый далекий незвездный объект, который могло видеть большинство читателей этой книги, — эмиссионная туманность M42, или Большая туман-

ность Ориона, удаленная на 420 пк, хотя и ее весьма нелегко заметить на зимнем небе.

А как же полоса Млечного Пути, которую любой может увидеть в безлунную ночь, оказавшись вдали от городских огней? Ведь это же вся наша гигантская звездная система — Галактика. Отчасти это так: в виде Млечного Пути мы наблюдаем совокупное свечение далеких звезд и туманностей, распределенных в диске Галактики, не различая при этом отдельных объектов. Но характерное расстояние до областей Млечного Пути, видимых в оптическом диапазоне, всего около 2 кпк; на больших расстояниях становится существенным поглощение света межзвездной пылью, скрывающей от нас далекие области Галактики. Впрочем, и в проникаемой для света зоне наш глаз не видит индивидуальных объектов, поэтому и ее мы не можем считать областью, населенной наблюдаемыми объектами ночного неба. Таким образом, нам остается проанализировать распределение в пространстве звезд, доступных невооруженному глазу.

Для анализа распределения видимых звезд мы использовали «Каталог ярчайших звезд» (Ochsenbein, Halbwachs, 1987) в его сетевой версии 1999 г., содержащей данные о расстояниях, вычисленных на основе астрометрических и фотометрических измерений со спутника Hipparcos (ESA). Этот каталог включает в себя параметры 1628 звезд ярче $m_{\text{lim}} = 5,01^m$ и в настоящее время считается наиболее авторитетным источником. Фактически он содержит все звезды, доступные невооруженному глазу на уровне моря при средних условиях видимости. Здесь уместно напомнить, что звездные каталоги, созданные до изобретения телескопа, содержат менее полутора тысяч звезд. Например, не покрывавший целиком южное небо каталог Гиппарха (II в. до н. э.) содержит около 850 звезд. Птолемей (II в. н. э.), проводивший наблюдения южнее Гиппарха, описал в каталоге «Альмагеста» 1025 звезд, а собравший данные по всему небу Иоганн Байер (1603 г.) изобразил на картах «Уранометрии» около 1200 звезд. Заметное превышение этого числа в современном «Каталоге ярчайших звезд» (1628 объектов) в определенной степени связано с отдельным учетом в нем компонентов двойных звезд, некоторые из которых разделяются, а другие не разделяются невооруженным глазом. Учет последнего обстоятельства снижает число индивидуально наблюдаемых звезд примерно до 1600. Фактически именно это их количество нужно считать доступным для нормального невооруженного глаза при типичных условиях видимости и при наблюдении прямым зрением. Разумеется, для точной оценки следует учитывать условия

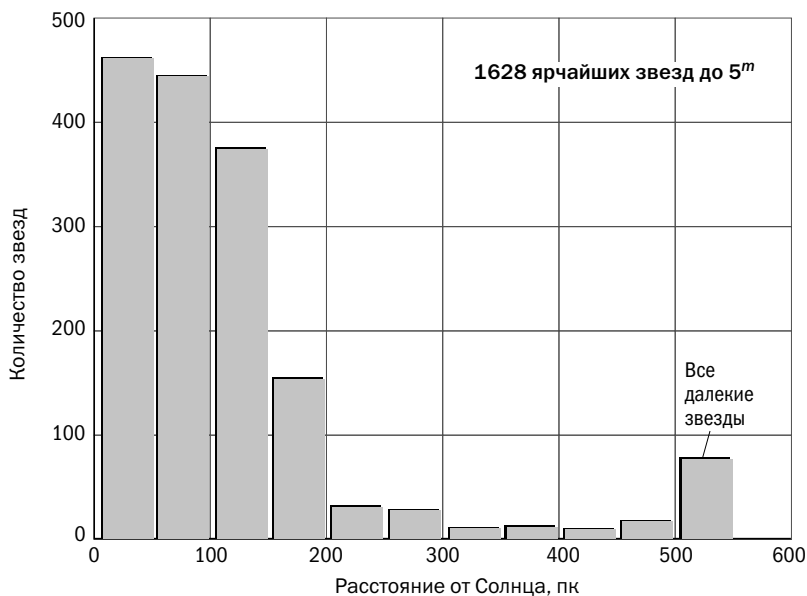


Рис. 1.4. Распределение количества видимых невооруженным глазом звезд по их расстоянию от Солнца.

наблюдения (высота над уровнем моря, качество зрения) и метод наблюдения (например, использование бокового зрения), но для наших целей вполне достаточно той точности, которую дает статистика «Каталога ярчайших звезд».

Распределение объектов «Каталога ярчайших звезд» по их расстоянию от Солнца показано на рис. 1.4. В действительности «хвост» этого распределения простирается до 3,8 кпк. Чтобы изобразить диаграмму компактно, мы собрали все звезды, удаленные более чем на 500 пк, в крайнюю правую колонку диаграммы. Как видим, 90% всех визуально наблюдаемых звезд располагается не далее $R = 240$ пк от Солнца. В том, что наметившееся в области расстоянии 100–200 пк резкое падение числа ярких звезд сменилось длинным плато, нет ничего странного: в нашу эпоху Солнце проходит через область недавнего звездообразования — так называемую Местную систему, ярчайшие звезды которой образуют пояс Гюльда, наклоненный на 18° к галактическому экватору. Он имеет форму вытянутого тора и простирается от 200 до 700 пк от Солнца (см. главы 4 и 5). Ярчайшие О- и В-звезды пояса Гюльда видны визуально: например, это молодой агрегат Ориона и ассоциация Скорпиона–Кентавра. Если бы не случайное прохождение Солнца через Местную систему в нашу эпоху, то распределение визуальных звезд практи-

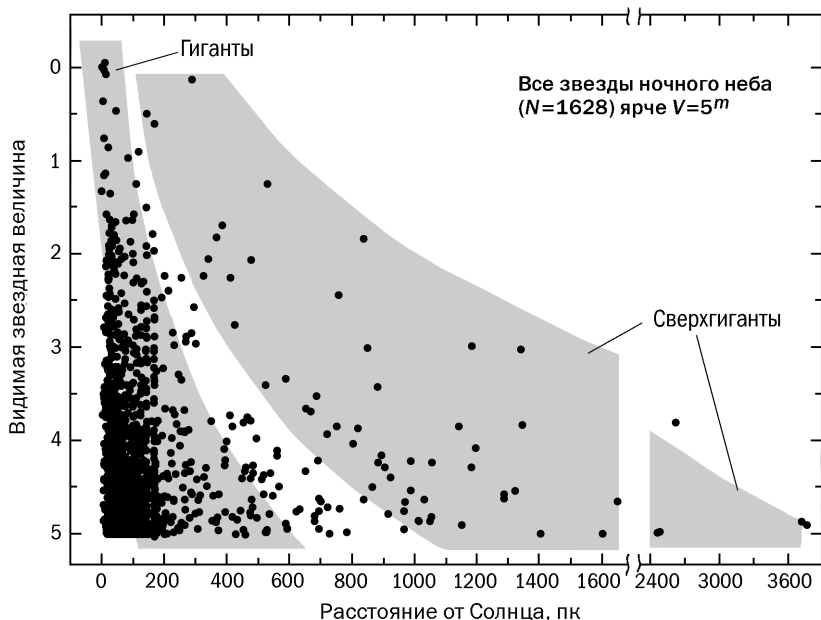


Рис. 1.5. Соотношение «видимый блеск — расстояние» для всех объектов «Каталога ярчайших звезд». В области от 1670 до 2450 пк звезды высокого блеска отсутствуют. Серыми полями отмечены области типичных гигантов (абсолютная звездная величина от 0^m до -4^m) и сверхгигантов (от -5^m до -8^m).

чески оборвалось бы на расстоянии 200–240 пк. В будущем, когда Солнце покинет Местную систему, «хвост» распределения на рис. 1.4 за пределами 240 пк значительно ослабнет или совсем исчезнет. Поэтому мы назовем «визуальной областью Вселенной» (BOB) сферическую область вокруг Солнца, имеющую радиус $R_{\text{BOB}} = 240$ пк, и проанализируем ее состав.

Нужно отметить, что в визуальной области Вселенной ($R < 240$ пк) межзвездное поглощение света невелико и не препятствует измерению блеска, истинного цвета, температуры и лучевой скорости звезд. Но такие важные характеристики, как светимость звезды, ее положение в пространстве и полная пространственная скорость, могут быть найдены только в том случае, если точно измерено расстояние до звезды. Базовым методом измерения расстояний служит метод тригонометрических параллаксов, который в последние годы реализуется путем наблюдений с космических обсерваторий. В настоящее время (2012 г.) наиболее точные данные получены астрометрическим спутником Hipparcos. С ошибкой менее 10% измерены расстояния до отно-

сительно ярких звезд (до $8,5^m$), расположенных не далее 60 пк. На расстоянии 300 пк ошибка может достигать 50%. Для наших целей этой точности достаточно.

Оценим полное число звезд в визуальной области Вселенной. В окрестности Солнца локальная плотность массы звездного населения галактического диска составляет $\rho_0 = 0,07 M_\odot/\text{пк}^3$, а плотность числа звезд $n_0 = 0,1 \text{ пк}^{-3}$ (Binney, Merrifield, 1998, разд. 3.6.4). На масштабе $R_{\text{ВОВ}}$ изменение плотности диска существенно лишь в направлении вдоль оси вращения Галактики, т. е. перпендикулярно плоскости диска. В модели экспоненциального диска шкала высот в окрестности Солнца составляет $z_0 = 300 \text{ пк}$ (Binney, Merrifield, 1998, разд. 10.4.3), следовательно, мы не допустим значительной ошибки, считая плотность звездного населения в визуальной области Вселенной однородной, т. е. неизменной в пространстве. Тогда полное число звезд в этой области составляет около $(4\pi/3)R^3 n_0 \approx 5 \cdot 10^6$. Таким образом, из 5 миллионов звезд, населяющих визуальную область Вселенной, мы видим на небе лишь около 1500.

Почему же не видны остальные звезды? Потому что их блеск слишком слаб. Абсолютная звездная величина Солнца составляет $M_V = 4,8^m$, то есть визуальный блеск такой звезды на расстоянии всего 10 пк от нас составляет $4,8^m$. А на расстоянии 15 пк такая звезда даже при отсутствии межзвездного поглощения света уже не видна. Вспомним, что абсолютное большинство звезд в окрестности Солнца — это красные карлики, населяющие нижнюю часть главной последовательности и имеющие светимость существенно меньше солнечной. Даже ближайшие из них нам не видны. Например, среди 40 ближайших звезд, заполняющих область радиусом 4,1 пк вокруг Солнца (без учета самого Солнца, а также белых карликов и коричневых карликов), визуально заметны только 8 звезд (Звезды, 2008, с. 408).

С увеличением радиуса охваченной области доля заметных в ней для невооруженного глаза звезд быстро снижается. Как видно из рис. 1.5, на расстояниях более 100 пк заметными остаются в основном гиганты, а на расстояниях свыше 800 пк — только сверхгиганты, например Денеб в Лебеде. Ну а такие весьма многочисленные представители населения Галактики, как белые карлики, вообще остаются незаметными для визуального наблюдателя.

Какие еще объекты могут остаться незамеченными в визуальной области Вселенной? Разумеется, несветящиеся: остывшие остатки эволюции звезд — белые карлики, нейтронные звезды и черные ды-

ры, а также объекты, по своей массе не достигшие статуса звезды, — коричневые карлики и планеты.

Подсчеты белых карликов — как голубых, молодых, так и остывающих, «черных» — показывают (Вейдеман, 1975), что средняя плотность их числа в окрестности Солнца составляет $(0,02-0,07) \text{ пк}^{-3}$, а средняя плотность их массы — около $0,015 M_{\odot}/\text{пк}^3$ (где $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$, масса Солнца). Это вполне согласуется с оценкой ожидаемого числа белых карликов, опирающейся на теорию эволюции звезд. Поэтому можно принять, что полная численность белых карликов всех возрастов составляет приблизительно 30% от числа звезд главной последовательности (Binney, Merrifield, 1998, разд. 3.6.4). В визуальной области Вселенной это дает нам полное число белых карликов около $(4/3)R_{\text{БОВ}}^3 \cdot 0,03 \text{ пк}^{-3} = 1,7 \cdot 10^6$. Но без телескопа не виден ни один из них! Даже самый яркий белый карлик — знаменитый Сириус В — имеет блеск $8,4^m$. В недрах белых карликов безвозвратно погребено проэволюционировавшее в термоядерных реакциях вещество — гелий в маломассивных карликах (остатках звезд с исходной массой $M < 0,5 M_{\odot}$), углерод и кислород в карликах средней массы ($0,5 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$), кислород, неон, магний — в самых массивных из них ($M = 8-10 M_{\odot}$). Разумеется, мы помним, что собственная масса белого карлика не может превышать предела Чандрасекара, равного $1,4 M_{\odot}$ (Батурин и др., 2007). При большей массе звездного остатка он становится нейтронной звездой ($1,4-3 M_{\odot}$) или черной дырой ($> 3 M_{\odot}$).

Стоит ли говорить, что эти экзотические объекты — нейтронные звезды и черные дыры — совершенно недоступны нашему взору. Даже в редкие моменты их рождения, знаменуемые вспышками сверхновых, мы видим не сам сверхплотный остаток массивной звезды, а ее горячую расширяющуюся оболочку.

Что касается менее экзотических объектов, то некоторые их типы тоже остаются невидимыми для зрения человека. Например, коричневые карлики — объекты, промежуточные по массе между нормальными звездами, в недрах которых происходят термоядерные реакции с участием водорода ^1H , и планетами, вообще не способными к термоядерным реакциям. Оценки количества коричневых карликов показывают, что их число сопоставимо с числом нормальных звезд. Однако эти объекты остаются скрытыми не только для наших глаз, но для большинства телескопов.

Наименее заметными из оптических объектов являются экзопланеты. Сейчас (2012 г.) количество надежно обнаруженных экзопланет

приблизилось к 850. Абсолютное большинство из них непосредственно не наблюдалось, а присутствие их рядом со звездой было зарегистрировано в основном по периодическому доплеровскому покачиванию линий в спектре звезды либо по ее периодическим покрытиям экзопланетой. Прямыми наблюдениями собственного излучения экзопланет было подтверждено существование только трех десятков из них, однако никто не сомневается, что все 850 экзопланет реально существуют. Можно с уверенностью сказать, что невооруженным глазом мы никогда не увидим ни одну из них. По-видимому, в немалом количестве существуют и свободные планеты, не связанные с конкретными звездами, не входящие в околосолнечные планетные системы типа Солнечной. Но даже оценить их количество пока невозможно.

Какие еще объекты остаются незаметными в визуальной области Вселенной? Мы рассмотрели все небесные тела — звезды, звездные остатки, планеты, доступные телескопу и теоретически подозреваемые. При этом мы выяснили, что из миллионов объектов, населяющих эту область, наше зрение регистрирует лишь около 1500. Остальные стали постепенно выявляться лишь в эпоху телескопических наблюдений, то есть в течение последних 400 лет. При этом некоторые типы близких невидимых объектов были обнаружены лишь в самое последнее время. Учитывая историю развития астрономических исследований, можно не сомневаться, что нам еще предстоит открыть буквально «у себя под носом» новые удивительные типы космических тел, о существовании которых мы сейчас и не догадываемся.

1.5. Телескопы и галактики

Долгое время астрономы почти не замечали галактик. Нельзя же принимать в расчет Магеллановы Облака, считавшиеся «обрывками» Млечного Пути, и Туманность Андромеды, которую на темном небе ближневосточных пустынь заметили арабские астрономы и сравнили с огоньком свечи, просвечивающим сквозь роговую пластинку. Открытие галактических и внегалактических туманностей как отдельных объектов связано с изобретением телескопа, а их дальнейшее исследование — с его усовершенствованием.

Здесь я должен остановиться, чтобы сделать замечание о терминах. В русской астрономической терминологии «галактический» и «внегалактический» имеют отношение только к нашей галактике Млечный Путь. Галактические туманности — это светлые или темные облака газа, находящиеся внутри Галактики сравнительно недалеко

от Солнца и наблюдаемые в большинстве своем в полосе Млечного Пути. Внегалактические туманности — это устаревающее название для далеких звездных систем, т. е. иных галактик, наблюдаемых вне полосы Млечного Пути, поскольку внутри нее велико межзвездное поглощение света. Чтобы не возникало путаницы, слово «галактический» не употребляют в отношении иных звездных систем. Например, говорят «ядра галактик», а не «галактические ядра», «спиральные рукава галактик», а не «галактические спиральные рукава». В английском языке скопление галактик определяется термином «galactic cluster». Отечественные астрономы обращаются с убедительной просьбой к журналистам и физикам: не переводить этот термин на русский язык как «галактическое скопление» или того хуже — «галактический кластер». Дело в том, что «галактическое скопление» — это устаревающее название для рассеянных звездных скоплений в диске нашей галактики. Его уже почти не употребляют, но в старых книгах оно есть, поэтому не нужно придавать ему иного смысла. Что же касается «галактических кластеров», то такого термина в отечественной астрономии вообще не существует, и не стоит вводить его, чтобы не засорять язык. Galactic cluster — это скопление галактик. Так говорят астрономы и хотят, чтобы так же говорили специалисты иных профессий, интересующиеся астрономией. Тогда мы будем лучше понимать друг друга.

Итак, истинное открытие галактических и внегалактических туманностей состоялось благодаря телескопу. А почему? Ведь туманности, в отличие от звезд, протяженные объекты, а телескоп, как известно, не увеличивает поверхностную яркость протяженных объектов. Да, это действительно так. Но телескоп увеличивает угловой размер объектов, а это, в совокупности с особенностями зрения человека, позволяет замечать объекты низкой яркости. Увеличенное изображение объекта выходит за границы центральной ямки сетчатки глаза, дающей четкую картинку, но обладающей низкой чувствительностью к свету, и попадает на более чувствительную периферию сетчатки. Это можно назвать «эффектом морского бинокля», который тоже позволяет различать в сумерках слабоосвещенные предметы. Еще большую выгоду дает телескоп при длительных экспозициях, когда вместо глаза используется фотопластинка или электронный приемник света (Куимов, Сурдин, 2008). Путем накопления сигнала можно значительно усилить яркость полученного изображения, что позволяет выделять на фоне неба даже слабо светящиеся туманности.

Фон неба? А разве ночное небо в промежутках между космическими объектами светится? Светится, да еще как! На хороших обсерваториях, вдали от городов, в безлунную ночь фон неба составляет в зените около 22^m с каждой квадратной секунды дуги, а в идеальных высокогорных условиях — вплоть до 23^m /кв. сек. К горизонту фон неба заметно возрастает. Один квадратный градус безлунного неба светит уже как звезда 4^m , а вся полусфера ночного неба излучает как объект -6^m или даже -7^m (Решетников, 2012). Заметить свечение неба легко: достаточно в темную ночь выглянуть из неосвещенного помещения — например, в лесу выглянуть из палатки. Вы заметите, что внутренние стены помещения значительно темнее ночного неба (рис. 5 цветной вкладки). Откуда же этот свет? Более половины дает свечение земной атмосферы, т. е. излучение ее атомов и молекул. Примерно треть — это зодиакальный свет, т. е. солнечные лучи, рассеянные межпланетной пылью, а остальное — звездный свет, рассеянный межзвездной пылью, а также свет далеких неразличимых звезд, туманностей и галактик (Роч, Гордон, 1977). Яркость фона зависит как от направления (зенитное расстояние, полоса Млечного Пути, зодиак, окрестности ярких звезд и т. п.), так и от времени суток, фазы Луны и фазы цикла солнечной активности: свечение атмосферы заметно усиливается при повышении активности Солнца.

Но почему мы вообще так много говорим о фоне неба? Да потому, что именно он ограничивает различимость предельно тусклых космических объектов. Если бы этот фон был идеально однородным, то не было бы проблем: любой слабый источник света был бы на нем замечен. Но фон неба в силу квантовой природы света неоднороден, он постоянно испытывает мелкие флуктуации. Если космический источник светит слабо, то трудно бывает решить, реальный это объект или флуктуация фона. Бытовой пример: маковое зернышко легко нащупать на идеально ровной поверхности зеркала, но гораздо труднее — на поверхности неструганой доски.

Таким образом, именно хаотические флуктуации фона неба являются важным ограничивающим фактором при регистрации предельно слабых объектов. При наблюдении «точечных» источников — звезд — практически не удается надежно фиксировать объекты слабее 28^m с поверхности Земли и 30^m из космоса. В случае протяженных источников — галактик, туманностей — предельная яркость обычно составляет 27^m /кв. сек. в фильтре B , что приблизительно соответствует $1 L_{\odot}/\text{пк}^2$. В исключительных случаях, при наблюдении из космоса или с фильтрами, отсекающими фон неба, удастся зарегистриро-

вать внешние области галактик, имеющие поверхностную яркость около $30^m/\text{кв. сек.}$

Как видим, место наблюдения играет важную роль. И причина не только в том, что в космосе наблюдениям не мешает свечение атмосферы, но и в том, что преломление света в беспокойной атмосфере делает изображения нечеткими, «размазывая» их и без того слабый свет по большей площади, затрудняя этим его выделение на фоне неба. Как тут не вспомнить пророческие слова Исаака Ньютона, написанные им в конце первой части «Оптики»: «Если бы теория изготовления телескопов и могла со временем полностью перейти в практику, то существовали бы, однако, определенные границы, за которыми невозможно дальнейшее совершенствование телескопов, ибо воздух, через который мы смотрим на звезды, находится в постоянном дрожании, как это можно видеть по дрожанию теней, отбрасываемых высокими башнями, и по мерцанию неподвижных звезд. Но эти звезды не мерцают при наблюдении через телескопы с большими отверстиями. Ибо лучи света, проходящие через различные части отверстия, дрожат каждый в отдельности, и благодаря их различному и иногда противоположному дрожанию они падают в одно и то же время на различные точки дна глаза, причем их дрожание движения слишком быстры и неясны, чтобы их можно было различить в отдельности. Все эти освещенные точки составляют одну широкую светящуюся точку, состоящую из многих таких дрожащих точек, неясно и неощутимо смешиваемых одна с другой благодаря коротким и быстрым дрожаниям; поэтому звезда кажется шире, чем она есть, и видна без всякого дрожания. В длинные телескопы предметы кажутся ярче и больше, чем в короткие, но их нельзя сделать такими, чтобы избавиться от слияния лучей, возникающего от дрожаний в атмосфере. Единственное средство — наиболее ясный и спокойный воздух, который, может быть, найдется на вершинах высочайших гор над большими облаками».

Замечу, что Ньютон ни разу в жизни не удалялся от Лондона далее 150 км, поэтому сам он настоящих гор никогда не видел. Более того: горных обсерваторий ни в то время, ни в последующие несколько столетий не существовало. Таким образом, предвидение Ньютона относительно высокогорных обсерваторий — еще один замечательный образец его научной прозорливости! Любопытно, что через три столетия его коллеги и соотечественники, не вняв предупреждению классика, установили новый 100-дюймовый телескоп на территории равнинной Англии и даже назвали его именем Ньютона! Проработав с

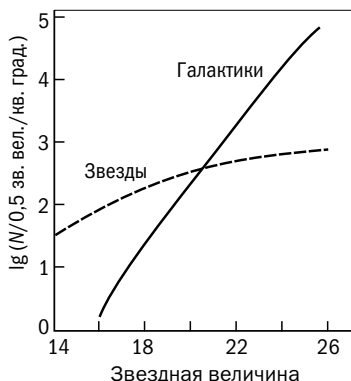


Рис. 1.6. Количество звезд и галактик на 1 квадратный градус неба в интервале 0,5 звездной величины в зависимости от их блеска в голубой области спектра (полоса В).

развитую теорию эволюции звезд — от первых до последних этапов их жизни, и даже с учетом тесного взаимодействия звезд друг с другом. Иное дело — галактики. Они родились давно, в эпоху, отделенную от нас миллиардами лет, а значит, отдаленную в пространстве на миллиарды световых лет. Именно поэтому, чтобы увидеть рождение галактик, нужны супер-телескопы. И они уже есть.

2. Звезды непрозрачны, поэтому никакой телескоп все равно не может заглянуть в их недра (нейтринные исследования Солнца — уникальная возможность). Форма звезд довольно проста и близка к шару или эллипсоиду, поэтому астрономы не слишком огорчены тем, что при наблюдении в любой телескоп абсолютное большинство звезд выглядит точками и останется таковыми в ближайшие годы. Иное дело — галактики. Каждый новый шаг в улучшении четкости астрономических изображений открывает нам новые неожиданные детали строения галактик. Создание космического телескопа «Хаббл» и систем адаптивной оптики для больших наземных телескопов отозвалось колоссальным прорывом в исследовании галактик и открыло принципиально новые факты об эволюции Вселенной.

Для больших телескопов, обладающих высокой проникающей способностью, небо населено в основном не звездами, а галактиками: с продвижением к объектам низкой яркости при блеске около $20,5^m$ плотность числа звезд на единицу площади неба становится

1967 по 1979 гг. в полях графства Суссекс и доказав непригодность английского неба для внегалактической астрономии, Isaac Newton Telescope был перевезен на вершину Рока-де-лос-Мучачос (о. Ла-Пальма, Канарские о-ва), где с тех пор эффективно служит науке. Это в очередной раз убеждает, что классиков нужно читать.

Техническое совершенствование телескопов дает особенно яркие результаты при исследовании галактик. Для этого есть как минимум две причины.

1. Звезды большинства известных типов, пребывающие на разных стадиях эволюции, можно найти сравнительно недалеко от Солнца. Поэтому уже к концу XX в. астрономы создали вполне



Рис. 1.7. Сверхглубокое поле телескопа «Хаббл» (Hubble Ultra-Deep Field, HUDF). Эту область неба в созвездии Печь космический телескоп фотографировал в период с 24 сентября 2003 г. по 16 января 2004 г., накопив суммарную экспозицию в 1 млн секунд, или 11,3 суток. Размер стороны кадра чуть более 3'. Фото: NASA, ESA.

меньше плотности числа галактик (рис. 1.6). Разумеется, это средняя оценка. Вдоль полосы Млечного Пути плотность звезд очень высока, а галактики совсем не видны (пыль!), зато в направлениях галактических полюсов есть области, где звезд почти нет, а галактик невероятно много. Поразительно выглядят глубокие снимки космоса в этих направлениях, полученные телескопом «Хаббл»: на его Сверхглубоком поле (рис. 1.7) площадью около 11 кв. минут дуги запечатлелось около 10 тыс. галактик (разумеется, все они видны лишь на оригинальном изображении, а не на книжной иллюстрации). Это означает, что

каждый квадратик небесной сферы со стороной 2 содержит галактику. Наиболее далекие звездные системы, оставившие свой след на этом снимке, удалены от нас на 13 млрд св. лет. Удивительно, но на всем этом поле всего лишь несколько звезд нашей галактики. Их признак — крест из дифракционных усиков.

Если бы не было расширения Вселенной, если бы далекие галактики не удалялись от нас с большой скоростью, они выглядели бы гораздо ярче, чем сейчас. Оптический фон неба был бы значительно больше, чем теперь, и не уступал бы по яркости Млечному Пути. Фотографировать близкие крупные галактики на столь же ярком, как они сами, фоне было бы весьма непросто. К счастью, Вселенная расширяется. Тем не менее периферийные области галактик, их разреженные гало и короны остаются практически неизученными. Эта интересная работа — для астрономов будущего.

С одной стороны, изучать галактики легко, поскольку они почти, а иногда и полностью прозрачны. С другой стороны, не имея возможности поворачивать прозрачный предмет перед глазами (т. е. увидеть его с *другой стороны*), мы не можем понять его объемную структуру. Это касается не только далеких галактик, но и нашей. Сколь бы тщательно астрономы ни изучали строение диска Галактики, они всегда будут находиться в положении врача-рентгенолога, пытающегося в темном кабинете представить себе внешность пациента. Старые рентгеновские аппараты показывали лишь туманную проекцию плотных деталей тела — его скелет. Современные томографы позволяют восстановить трехмерное строение тела. Но увидеть внешность человека, просвечивая его насквозь, не удастся. Астрономы тоже «просвечивают» Галактику, но при этом мечтают увидеть ее портрет.

Несбыточное желание астрономов Земли — получить фотографию Галактики извне. Мы уже давно без особого труда фотографируем далекие звездные системы, но не можем получить изображение своей. При этом у астрономов, живущих в тех далеких галактиках, давно уже пылится на полке портрет нашей звездной системы, но они страдают, не в силах сфотографировать свою. Напрашивается естественное желание... обменяться снимками. Принципиальных проблем нет: нужно лишь убедить специалистов по SETI поместить в свои космические послания фотографии тех галактик, в сторону которых направлена антенна передатчика. Уверен, что наши неведомые корреспонденты будут благодарны нам за такое послание. В ответ, а может быть и раньше, мы получим фото нашей родной звездной сис-

темы и тогда наконец узнаем, как выглядит Галактика и спиральный узор на ее диске. Сегодня это кажется фантастикой, но ничего невозможного в этом нет. В любой день мы можем получить от далеких коллег фото с надписью «You are here». Надо лишь не пропустить это сообщение.

1.6. Объем звезд в объеме Вселенной

Всё же следует признать, что почти полная прозрачность Вселенной — это счастье для астрономов. Думаю, что геологи, археологи и палеонтологи многое бы отдали за то, чтобы земная кора стала прозрачной или хотя бы полупрозрачной. Но для них это лишь мечта: вглубь земли мы не видим и на миллиметр, а космическое пространство прозрачно на миллиарды световых лет! Даже в видимом свете мы различаем галактики на краю Вселенной; лишь в некоторых направлениях этому мешает межзвездная пыль. А для инфракрасного и радиоизлучения еще меньше препятствий. На первый взгляд это странно: глядя на сверхглубокий снимок «Хаббла» (рис. 1.7), мы представляем, что космос плотно забит галактиками, но это впечатление обманчиво. Именно прозрачность космоса позволяет нам видеть как близкие, так и далекие объекты; все вместе в проекции на небо они создают впечатление тесноты.

Правда, есть области пространства, где галактики «упакованы» плотнее, чем в среднем. Мы называем их группами, скоплениями и сверхскоплениями галактик (рис. 1.8). Кажется, что в таких местах галактикам тесно, они должны заслонять друг друга и постоянно катастрофически сталкиваться. Действительно, бывают столкновения, но это отнюдь не катастрофы. Галактики лишь на первый взгляд монолитные сооружения, сияющие как звезды. В действительности галактики чрезвычайно разрежены и прозрачны, проницаемы для плотного вещества и света. В этом смысле они «видимое ничто». Темная материя, заполняющая галактику, — это «невидимое нечто» — совершенно прозрачна для света и проницаема для вещества. Разреженный межзвездный газ тоже практически прозрачен и не препятствует движению звезд. Пыль собрана в плотных облаках и в целом больших проблем для света не создает. А сами звезды: разве они не заслоняют друг друга, разве не сталкиваются? Давайте разберемся. Чтобы почувствовать пустоту Вселенной, попробуем собрать все звезды вместе, оценим, какую долю пространства они занимают. На первый взгляд — звезды повсюду: «Открылась бездна, звезд полна...» А так ли уж полна?

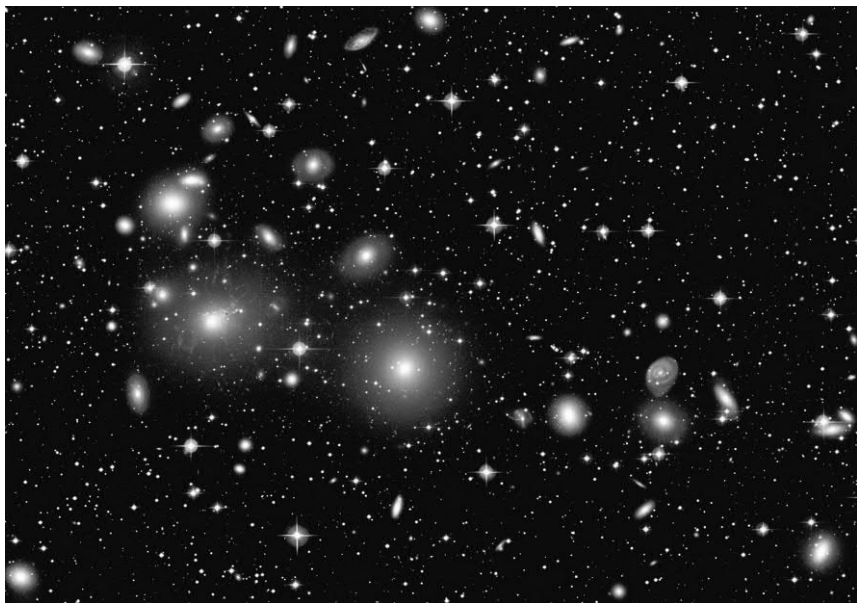


Рис. 1.8. Центральная часть скопления галактик Abell 426 в Персее, удаленного от нас на 77 Мпк. Размер области на фото — около 300 кпк. Такой объем занимает одна наша галактика со спутниками, а в скоплении Персея в таком же объеме «упакованы» сотни галактик! Фото: Canada-France-Hawaii Telescope.

Глядя во Вселенную, мы видим звезды и только звезды. Они единственные являются самостоятельным источником света с большим запасом энергии. В Галактике и за ее пределами есть и другие носители массы, но их почти не видно. Это темное вещество условно можно разделить на планеты, коричневые карлики, остатки звезд и диффузную (межзвездную) среду. Земному наблюдателю за пределом Солнечной системы планеты практически не видны. Коричневые карлики становятся заметными лишь на раннем этапе своей эволюции — в период гравитационного сжатия, но и при этом светятся лишь в инфракрасном диапазоне спектра. Среди остатков звезд видны лишь молодые (не успевшие остыть) белые карлики. Межзвездная среда, заполняющая пространство между звездами, также практически не видна, поскольку имеет очень низкую поверхностную яркость. Лишь наиболее плотные ее части (области HII) удастся сфотографировать в их собственном свете либо заметить как темные области (пылевые облака) на ярком фоне плотных звездных полей или светящегося газа.

Таблица 1.2

Физические параметры звезд

M — масса, R — радиус, ρ — средняя плотность, ρ_c — центральная плотность, T_c — центральная температура, L — болометрическая светимость; $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$ кг, $R_\odot = 7 \cdot 10^8$ м, $L_\odot = 4 \cdot 10^{26}$ Вт — масса, радиус и светимость Солнца.

$M, M_\odot$	$R, R_\odot$	$\rho, \text{г/см}^3$	$\rho_c, \text{г/см}^3$	$T_c, 10^6 \text{ К}$	$L, L_\odot$	Спектр
Главная последовательность нулевого возраста						
50	11	0,053	2,0	37	$5 \cdot 10^5$	O6
30	8,5	0,068	3,0	36	$1,4 \cdot 10^5$	O8
20	7,2	0,075	5,0	35	$5 \cdot 10^4$	O9
15	5,8	0,11	6,2	34	14 000	B0
10	4,9	0,13	8,9	31	5 000	B2
5	3,5	0,16	20	27	630	B6
2	1,9	0,41	68	21	25	A5
1,5	1,4	0,77	88	18	6	F2
1	0,94	1,7	90	14	0,8	G3
0,5	0,40	11	84	9	0,050	M0
0,3	0,30	16	100	8	0,015	M3
0,2	0,22	26	158	7	0,006	M4
0,15	0,17	39	223	6	0,004	M4
0,1	0,12	81	690	5	0,001	M5
0,085	0,074	290	2000	4	0,0004	M6
Красный гигант						
1,3	27	0,0001	320	40	150	K2
Белый карлик						
0,9	0,01	10^6	$1,6 \cdot 10^7$	8	0,001	

Итак, звезды — практически единственные видимые объекты во Вселенной. В нашу эпоху они служат основным источником энергии и единственным «двигателем» химической эволюции вещества. А велика ли доля объема Вселенной, занятая звездами?

Пусть M_S — суммарная масса всех звезд, V_S — суммарный объем всех звезд и V_U — объем Вселенной (той ее области, в которой подсчитаны M_S и V_S). Тогда интересующее нас отношение объемов (V_S/V_U) можно выразить как $M_S V_S / M_S V_U$. Но M_S/V_S — это средняя плотность вещества в звездах (ρ), а M_S/V_U — средняя плотность звездного вещества во Вселенной (ρ_S). Следовательно, отношение объемов V_S/V_U можно заменить отношением плотностей ρ_S/ρ .

Простейшую оценку для этого отношения можно получить, если рассматривать Солнце как типичного представителя звезд главной последовательности (табл. 1.2, Ламзин, 2008). В этом случае для оценки отношения $\rho_{\odot}/\rho_{\text{Вселенной}}$ достаточно двух хорошо известных величин: средней плотности вещества Солнца $\rho_{\odot} = 1,41 \text{ г/см}^3$ (Самусь, Сурдин, 2008) и средней плотности барионного вещества (т. е. протонов и нейтронов) во Вселенной $\rho_{\text{В}} = 3,98 \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$ (Горбунов, Рубаков, 2008). Следует также учесть, что собственно в звездах заключено около 10% барионного вещества, а остальные 90% — это межзвездный и в основном горячий межгалактический газ. Таким образом, средняя плотность звездного вещества во Вселенной $\rho_{\text{С}} = 0,1 \rho_{\text{В}} = 4 \cdot 10^{-32} \text{ г/см}^3$. Отсюда легко получить оценку для той доли объема, которую во Вселенной занимают звезды главной последовательности: $\rho_{\odot}/\rho_{\text{С}} \approx 3 \cdot 10^{32}$.

Чтобы представить это отношение наглядно, оценим суммарный объем звезд наблюдаемой области Вселенной — Метагалактики. Возраст Вселенной около 14 млрд лет, следовательно, радиус доступной наблюдениям области Вселенной порядка $R_{\text{М}} \approx 14 \text{ млрд св. лет}$, или $R_{\text{М}} \approx 14 \cdot 10^9 \cdot 9,46 \cdot 10^{15} \text{ м} = 1,3 \cdot 10^{26} \text{ м}$. При этом объем Метагалактики составляет $V_{\text{У}} = 4\pi R_{\text{М}}^3/3 \approx 9,7 \cdot 10^{78} \text{ м}^3$. Отсюда найдем суммарный объем всех звезд главной последовательности: $V_{\text{С}} = V_{\text{У}} \cdot \rho_{\text{С}}/\rho_{\odot} \approx 3 \cdot 10^{47} \text{ м}^3$. Если собрать все эти звезды вместе, то они займут область размером порядка $V_{\text{С}}^{1/3} \approx 6 \cdot 10^{15} \text{ м} = 0,2 \text{ пк}$. Это заметно меньше расстояния от Солнца до ближайшей звезд (1,3 пк; Кентавра). Фактически это расстояние даже меньше радиуса облака Оорта, составляющего около 150 000 а. е. = 0,7 пк, являющегося внешней частью Солнечной системы (Бусарев, Сурдин, 2008). Таким образом, *все нормальные звезды Вселенной* легко поместились бы в пространстве Солнечной системы!

До сих пор мы рассматривали звезды главной последовательности, но можно принять во внимание и стареющие звезды — красные гиганты и сверхгиганты, имеющие чрезвычайно разреженные и протяженные оболочки. Если вновь в качестве типичной звезды такого типа взять Солнце, то на стадии красного гиганта его радиус увеличится примерно в 30 раз, а объем — в 27 000 раз. Следует учесть также, что продолжительность стадии красного гиганта (и сверхгиганта) составляет около 10% полного времени эволюции звезды (табл. 1.3). Следовательно, при постоянном темпе рождения звезд количество красных гигантов в 10 раз больше числа звезд главной последовательности, а суммарный объем красных гигантов в 2700 раз больше суммарного объема всех звезд главной последовательности. Это обстоя-

Таблица 1.3

**Продолжительность (в годах) важнейших этапов эволюции
звезд с солнечным химическим составом**

Этап эволюции	Начальная масса		
	$1 M_{\odot}$	$5 M_{\odot}$	$10 M_{\odot}$
Формирование	$4 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$
Главная последовательность	$10 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
Красный гигант	$2 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^6$

тельство увеличивает объем области, в которой можно разместить все звезды Вселенной, в 14 раз, т. е. до 2,8 пк, что лишь вдвое превышает расстояние от Солнца до соседней звезды. Эти простые оценки демонстрируют феноменальную пустоту Вселенной.

Если ограничиться только звездами нашей Галактики, число которых оценивается в $4 \cdot 10^{11}$, то легко видеть, что все звезды главной последовательности займут объем радиусом около $R_{\odot}(4 \cdot 10^{11})^{1/3}$

$5 \cdot 10^{12}$ м = 34 а. е., то есть разместятся в центральной части Солнечной системы, в пределах орбиты Нептуна! Если же учесть и красные гиганты, то эта область расширится до 480 а. е., то есть не выйдет за орбиту Седны, фактически представляющей внутреннюю часть Солнечной системы. Стоит ли удивляться, что звезды, хаотически блуждающие в Галактике миллиарды лет, не сталкиваются друг с другом. Более того, они даже не сближаются настолько тесно, чтобы рисковать разрушением своих планетных систем. Действительно, Солнце со скоростью около $v = 20$ км/с движется в течение $t = 5$ млрд лет сквозь диск Галактики, заполненный звездами с пространственной плотностью около $n = 0,2$ звезда/пк³. Вероятное минимальное расстояние сближения двух звезд $r_{\min}$ легко найти из условия, что в цилиндр объемом $\pi r_{\min}^2 vt$ должна попасть одна звезда:

$$\pi r_{\min}^2 v t n = 1.$$

Отсюда $r_{\min} \approx 800$ а. е. Таким образом, в течение всей «спокойной» жизни Солнечной системы в пределы планетных орбит и даже пояса Койпера не должно было влететь ни одной случайной звезды. За «детство» Солнца ручаться нельзя: возможно, оно прошло в более плотном окружении молодых звезд, которые сближались теснее. Некоторые пожилые звезды также имеют шанс тесно сблизиться или даже столкнуться, если обитают в плотных ядрах звездных скоплений или в ядре Галактики. Но все же это редкое исключение. В целом

нашу и другие галактики можно с полным правом считать бесстолкновительными системами, частицы которых — звезды — взаимодействуют друг с другом только гравитационно и практически никогда не соударяются (см. главу 3). Авторы старых книг любили демонстрировать это свойство галактик на бытовых примерах такого рода: представьте себе двух мух, летающих внутри куба со стороной в 500 км. Много ли у них шансов столкнуться друг с другом? Оказывается столько же, сколько у Солнца и соседних с ним звезд.

* * *

Живаясь в мир галактик, мы познакомились с характерными для них масштабами времени и расстояний, поняли, что можно увидеть невооруженным глазом и в телескоп, почувствовали, насколько разрежено звездное население галактик и прозрачна Вселенная. Следующие главы расскажут о теоретическом и наблюдательном изучении галактик, об их внутренней структуре, физических характеристиках и возможных путях эволюции. Мир галактик астрономы изучают немногим более века. Мы уже поняли, что этот мир чрезвычайно разнообразен, и что многое в нем еще непонятно для нас. Даже эволюция простейших систем из нескольких звезд еще исследована не до конца, что уж тут говорить о системах из многих миллиардов звезд и окружающего их (отчасти неизвестного нам) вещества. У исследователей галактик пока больше вопросов, чем ответов. Но это же и есть самое интересное в науке!

Литература

- Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика. М.: Наука, 1981.
- Батурин В. А., Миронова И. В., Сурдин В. Г. Физика и эволюция звезд // Астрономия: век XXI / ред.-сост. В. Г. Сурдин. Фрязино: Век 2, 2007. С. 120–161.
- Бусарев В. В., Сурдин В. Г. Малые тела Солнечной системы // Солнечная система. Ред.-сост. В. Г. Сурдин. М.: Физматлит, 2008. С. 326–397.
- Вейдеман Ф. Белые карлики // Белые карлики: сб. М.: Мир, 1975.
- Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: Изд-во ЛКИ, 2008.
- Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Происхождение галактик и звезд. М.: Наука, 1983.
- Ефремов Ю. Н. Очаги звездообразования в галактиках. Звездные комплексы и спиральные рукава. М.: Наука, 1989.
- Звезды / ред.-сост. В. Г. Сурдин. М.: Физматлит, 2008.
- Информационная база и библиотека NASA по внегалактической астрономии и космологии (обзоры, монографии, атласы, константы, данные наблюдений, калькуляторы и т. п.). <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5>

- Куимов К. В., Сурдин В. Г. Оптическая астрономия // Небо и телескоп / ред.-сост. В. Г. Сурдин. М.: Физматлит, 2008. С. 48–101.
- Ламзин С. А. Строение и эволюция звезд // Звезды. М.: Физматлит, 2008.
- Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. М.: Наука, 1984. С. 119–202.
- Млечный Путь: детальное интерактивное изображение. <http://media.skysurvey.org/interactive360/index.html>
- Ньютон И. Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света / пер. С. И. Вавилова, 2-е изд., просмотренное Г. С. Ландсбергом. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1954. С. 86–87.
- Решетников В. П. Почему небо темное. Как устроена Вселенная. Фрязино: Век 2, 2012.
- Роч Ф., Гордон Дж. Свечение ночного неба. М.: Мир, 1977.
- Самусь Н. Н., Сурдин В. Г. Наблюдаемые характеристики звезд и их классификация // Звезды. М.: Физматлит, 2008. С. 63–118.
- Сурдин В. Г. Приливные явления во Вселенной. М.: Знание, 1986.
- Сурдин В. Г. Гигантские молекулярные облака. М.: Знание, 1990.
- Сурдин В. Г. Рождение звезд. М.: УРСС, 2001.
- Чернин А. Д. Звезды и физика. М.: Комкнига, 2006.
- Чернин А. Д. Темная энергия и всемирное антитяготение // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. № 3. С. 267–300.
- Binney J., Merrifield M. Galactic astronomy. Princeton: Princeton Univ. Press, 1998.
- Chronology of the universe. Wikipedia, 2012.
http://en.wikipedia.org/wiki/Chronology_of_the_universe.
- Moore P. The data book of astronomy. Bristol, Philadelphia: Institute of physics, 2000. P. 259.
- Ochsenbein F., Halbwachs J. L. Catalogue of the brightest stars // Bull. Inf. Centre Donnees Stellaires. 1987. Vol. 32. P. 83. Новая версия доступна в Страсбургской базе данных: <http://adc.astro.umd.edu/adc-cgi/cat.pl?/catalogs/5/5053A/>.



ПРОБЛЕМА ТРЕХ ТЕЛ — БАНАЛЬНАЯ И ЗАГАДОЧНАЯ

В. В. Орлов, А. В. Рубинов

Исаак Ньютон в «Математических началах натуральной философии» (1687) показал, что две материальные точки, притягивающие друг друга с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, будут двигаться по коническим сечениям (эллипсам, гиперболам, параболам, окружностям или отрезкам прямых). А что будет, если мы добавим в систему еще одно тело?

2.1. Два плюс один

Над этим вопросом уже более 300 лет бьются лучшие умы человечества — математики, механики, физики, астрономы. Ведь эта задача имеет прямое практическое значение. Два важнейших для нас светила — Солнце и Луна — вместе с Землей как раз и составляют систему из трех взаимодействующих тел, влиянием остальных планет на которую в первом приближении можно пренебречь. Такие известные исследователи, как Леонард Эйлер, Жозеф Луи Лагранж, Анри Пуанкаре, приложили руку к решению задачи трех тел — одной из знаменитых проблем механики.

Были получены некоторые частные аналитические решения этой задачи. В 1900 г. шведский астроном Элиас Стрёмгрен (1870–1947) представил первое численное решение одного частного случая задачи трех тел. А в 1912 г. показалось, что проблема уже полностью решена, когда финский небесный механик Карл Фридьоф Сундман (1873–1949) вывел аналитические формулы для координат тел в виде сходящихся рядов по некоторой переменной, зависящей от времени. Однако последующие оценки показали, что сходимость этих рядов ужасно медленная — даже для такой простой тройной системы, как Солнце–Юпитер–Сатурн, требуется использовать невообразимо большое $\sim 10^{80000}$ число членов, чтобы получить координаты с точностью в несколько процентов на протяжении всего лишь одного оборота Юпитера.

С чем же связана сложность решения такой на первый взгляд простой задачи? Чтобы лучше осознать это, рассмотрим пример эволю-

ции тройной системы (рис. 2.3). Вначале три тела с равными массами располагались на примерно одинаковых расстояниях друг от друга и имели нулевые начальные скорости. На рисунке показаны траектории их дальнейшего движения, построенные по результатам численного решения системы дифференциальных уравнений движения. Очевидно, что это плоская, 2-мерная задача: под действием взаимного притяжения все три тела всегда будут двигаться в плоскости, проходящей через их начальные положения. Но даже в этом случае результат их взаимодействия трудно было бы предвидеть интуитивно. Единственное, что можно сказать наверняка: все три тела не могут далеко улететь поодиночке, поскольку в начальный момент полная энергия системы отрицательна (кинетическая энергия равна нулю, а потенциальная энергия гравитационного взаимодействия по определению меньше нуля).

Как видно на рисунке, вначале эти три тела выписывают клубок траекторий вблизи друг друга, испытывая при этом двойные и тройные тесные сближения. Затем два из трех тел объединяются в гравитационно связанную двойную систему и удаляются влево, а третье тело, получив импульс отдачи, улетает вправо. Энергию для этого «выстрела» система получила за счет гравитационной энергии связи двойной звезды, отлетевшей влево. В звездной динамике такой эпизод называют «эффектом гравитационной рогадки».

Но этот «выстрел» оказался недостаточно мощным: двойная система и одиночная звезда развернулись и вновь стали сближаться. В момент их тесного тройного сближения случилось замечательное событие: в двойной звезде произошла замена партнера — одиночная звезда стала членом двойной, а один из компонентов двойной полу-



Рис. 2.1. Элис Стрёмгрен.



Рис. 2.2. Карл Фритьоф Сундман.

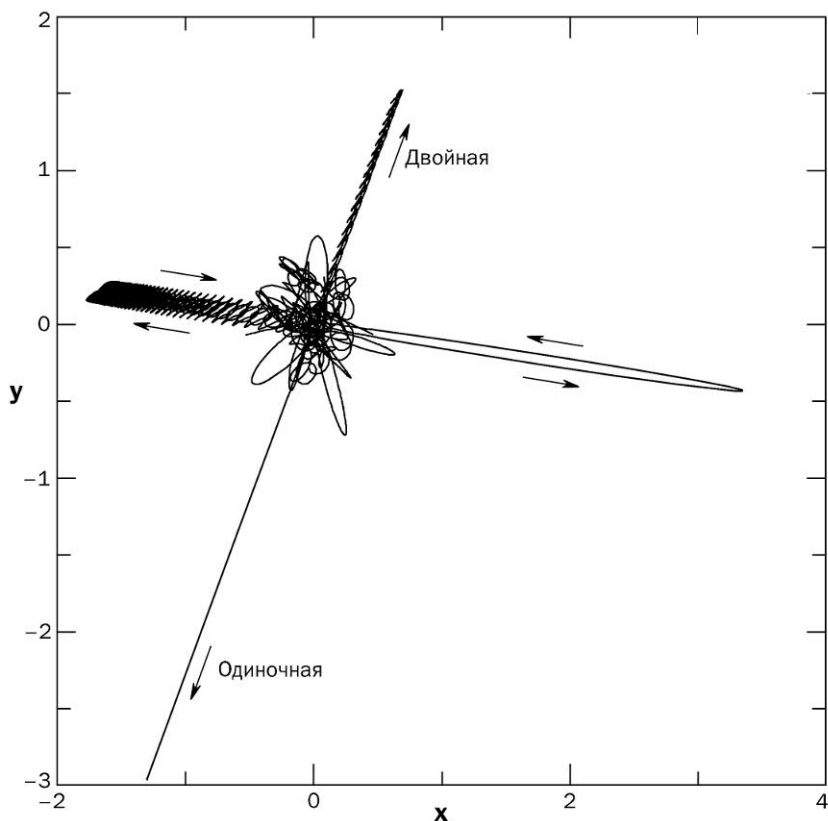


Рис. 2.3. Траектории движения в неустойчивой системе трех тел равных масс, эволюция которой завершается распадом.

чил свободу. В результате этого обмена двойная стала еще более тесной, а избыток энергии привел к новому «выстрелу»: на рисунке двойная устремилась вверх, а одиночная — вниз. На сей раз энергии «выстрела» оказалось достаточно для того, чтобы двойная и одиночная навсегда покинули друг друга.

Пожалуй, очень сложно найти гладкие функции, способные описать все это разнообразие состояний в задаче трех тел. А ведь это только один из вариантов эволюции. При других начальных положениях и скоростях тел эволюция будет развиваться совсем иначе.

В частности, кроме популяции распадающихся тройных систем есть устойчивые иерархические тройные системы, в которых одно из тел всегда находится на значительном удалении от двух других тел и «воспринимает» их как единую массу. В свою очередь, два тесно рас-

положенных тела испытывают практически одинаковое ускорение в сторону далекого третьего тела, что почти не влияет на взаимное движение двух первых тел. Поэтому в системе не происходит тесных сближений всех трех тел, которые могли бы инициировать распад тройной системы. Представим себе, что во Вселенной существует только одна иерархическая устойчивая тройная система. Тогда она будет жить вечно. В действительности на тройные системы звезд действуют внешние возмущения, например пролетающие вблизи тройной системы звезды поля и газовые облака, а также регулярное поле Галактики. Из-за этих внешних воздействий иерархические тройные звезды тоже могут распадаться.

Впрочем, не только иерархические тройные системы могут быть устойчивыми. Например, в Солнечной системе три наиболее массивных объекта — Солнце, Юпитер и Сатурн — движутся под влиянием взаимного тяготения, почти не ощущая присутствия прочих мелких объектов. При этом тройная система Солнце—Юпитер—Сатурн не обладает сильной иерархией, тем не менее она устойчива. Дело в том, что один из членов этой системы (Солнце) имеет массу, на три порядка большую, чем два других (Юпитер и Сатурн). Для устойчивости таких систем достаточно даже не очень сильной иерархии. Орбитальные периоды Сатурна и Юпитера различаются всего лишь в 2,5 раза.

Другие примеры устойчивых неиерархических тройных систем связаны с устойчивыми периодическими орбитами. Согласно теории Колмогорова—Арнольда—Мозера (КАМ-теории), в окрестности устойчивого периодического решения существует область, все траектории в которой навечно (при отсутствии внешних возмущений) «привязаны» к этой области. Если мы выберем начальные условия (координаты и скорости тел) в достаточно близкой окрестности устойчивой периодической орбиты, то такая *неиерархическая* тройная система никогда не сможет распасться.

Известно много периодических орбит в тройных системах. Первые периодические решения были найдены еще Эйлером (1767) и Лагранжем (1772). В этих системах движения происходят таким образом, что тела все время находятся на одной вращающейся прямой линии или в вершинах равностороннего треугольника. Однако эти решения неустойчивы, если массы тел сравнимы. Существуют такие периодические решения, при которых все три тела движутся вдоль одной и той же кривой, не сталкиваясь друг с другом. Такие траектории называют «хореографиями» (Шенсине и др., 2002). Три устойчивые периодические орбиты для систем с компонентами равных масс приведены на рис. 2.4, а в

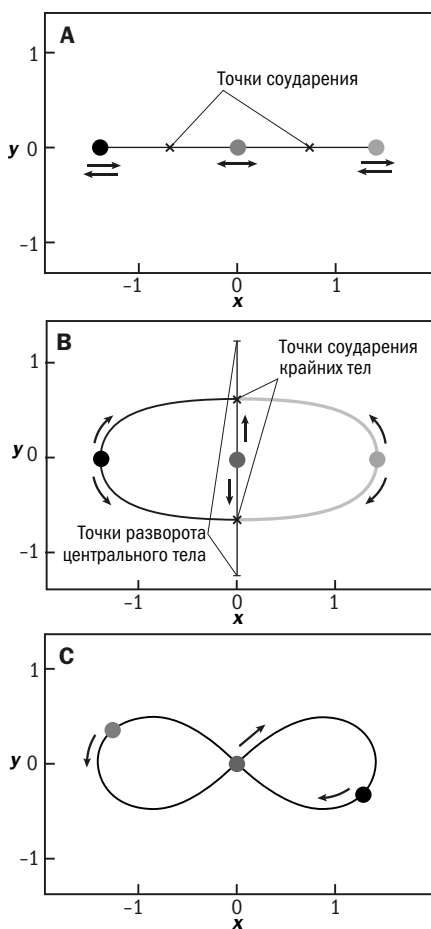


Рис. 2.4. Три устойчивые периодические орбиты в тройных системах с телами равных масс: А — Шубарта, В — Брука, С — орбита-«восьмерка». Кругами отмечены начальные положения тел, стрелками — направление движения, крестиками — места соударения.

анимированном виде они (и многие другие решения) представлены в очень интересной статье Алена Шенсина (Chenciner, 2007). Последняя из этих орбит — «восьмерка» — является хореографией. Во всех трех системах движения происходят в плоскости XY . При этом, что любопытно, все эти системы обладают нулевым моментом импульса.

В случае Шубарта (von Schubart, 1956) одно из тел бежит между двумя другими вдоль одной и той же прямой, на которой постоянно располагаются все три тела (прямолинейная задача трех тел). При этом центральное тело попеременно сталкивается то с правым, то с левым соседом. После столкновения тела упруго отскакивают. В модели Р. Брука (Broucke, 1979) одно из тел совершает периодические колебания вдоль прямой, перпендикулярной отрезку, соединяющему два других тела, и проходящей через середину этого отрезка; тела все время находятся в вершинах равностороннего треугольника (плоская равносторонняя задача трех тел). В этом примере сталкиваются только два крайних тела, а центральное избегает столкновений. В системе, описанной Муром, Шенсина и Монтгомери (Moore, 1993; Chenciner, Montgomery, 2000), три тела движутся друг за другом вдоль замкнутой кривой, имеющей форму восьмерки.

Во всех трех случаях не происходит тесных тройных сближений, хотя в первых двух случаях происходят двойные соударения, когда

два тела сталкиваются лоб в лоб. В рамках небесной механики при решении абстрактной задачи трех точечных масс удается математически корректно описать двойные соударения. Доказано, что существует аналитическое продолжение решений за момент соударения — тела разлетаются как бильiardные шары после абсолютно упругого удара. К сожалению, тройное столкновение не удается аналитически продолжить — это *существенная* особенность подобных задач.

Разумеется, продемонстрированные три модели представляют чисто теоретический интерес. Звезды и планеты — не бильiardные шары: столкнувшись, они не отскакивают невредимыми друг от друга. Если мы рассматриваем столкновение двух реальных звезд, то нужно учесть их конечные размеры и состояние газа, из которого они состоят. Численное моделирование столкновений звезд, например в работах В. Бенца и Дж. Хиллса (Benz, Hills, 1987), показало, что при определенных условиях может произойти слияние двух звезд в один объект. Возможно, именно так образуются звезды «голубые бродяги», о которых пойдет речь в разделе 7.4.4 о звездных скоплениях.

Интересно заметить, что и в неустойчивых тройных системах тела могут иногда «залетать» в окрестность устойчивой периодической орбиты и задерживаться там на длительное время. Это явление называется «прилипанием» (см., например, Dvorak et al., 1999). Фрагменты эволюции таких «липких» траекторий показаны на рис. 2.5. Состояния «прилипания» можно назвать *метастабильными*, поскольку они являются временными. Рано или поздно тройная система выходит из этого состояния, и ее эволюция завершается взаимным разлетом одиночного тела и устойчивой двойной системы (как на рис. 2.3).

2.2. От теории к наблюдениям

Однако возникает вопрос, какое отношение абстрактная математическая задача трех тел имеет к наблюдаемым звездным системам? Оказывается, имеет, причем самое непосредственное. Дело в том, что по меньшей мере 6% ближайших звезд в пределах 25 парсеков от Солнца входят в состав тройных систем (Орлов и Титов, 1994). Это не так уж мало — примерно 450 звезд из общего числа, оцениваемого примерно в 7300. Подавляющее большинство этих тройных звезд, по-видимому, являются иерархическими и динамически устойчивыми, поскольку характерные времена распада тройных систем с подобными размерами на несколько порядков меньше их возрастов. Если бы тройные системы были неустойчивы, то они уже давно бы распались на двойную систему и одиночную звезду.

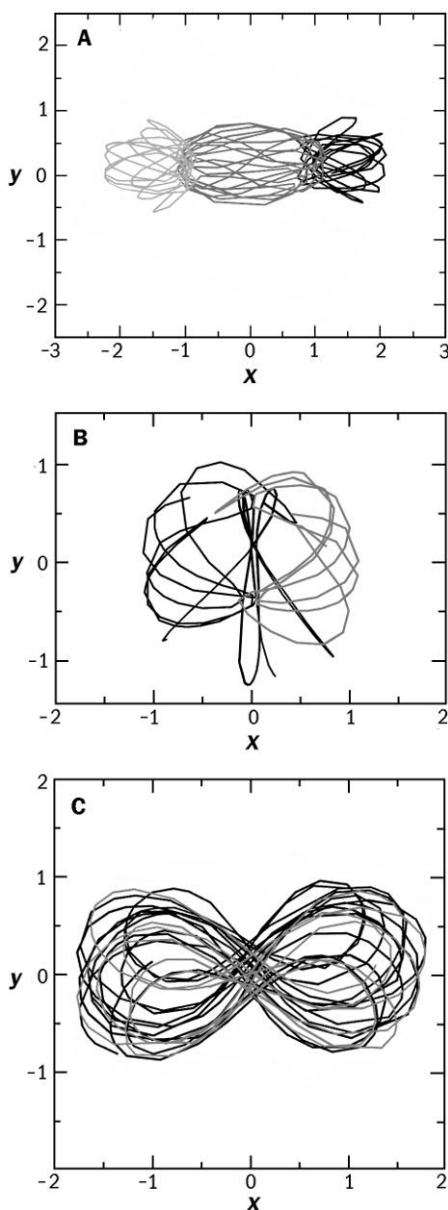


Рис. 2.5. Фрагменты «прилипания» траекторий к периодическим орбитам Шубарта (А), Брука (В) и к «восьмерке» (С), показанным на рис. 2.4.

Однако в областях современного звездообразования, где тройные системы недавно сформировались (наряду с системами большей кратности), вполне могут быть неустойчивые неиерархические системы (еще их называют системами типа Трапеции Ориона), динамическая эволюция которых в будущем завершится распадом. Между прочим, устойчивые тройные звезды могут формироваться при разрушении малых групп звезд, содержащих вначале более трех компонентов (см., например, Рубинов и др., 2002). В 10–15% случаев эволюция неустойчивых групп завершается формированием устойчивых иерархических тройных систем.

Еще один интересный вариант задачи трех тел – взаимодействие двойных звезд с одиночной (или очень тесной двойной) звездой поля при их случайном сближении. Физики называют такие встречи «рассеянием». В большинстве случаев результатом рассеяния двойной звезды на одиночной может быть либо разлет с сохранением членов пары, либо распад двойной с последующим разлетом трех одиночных звезд, либо обмен одного из членов пары на одиночную звезду. Впрочем, в зависимости от полной энергии системы, возможны и

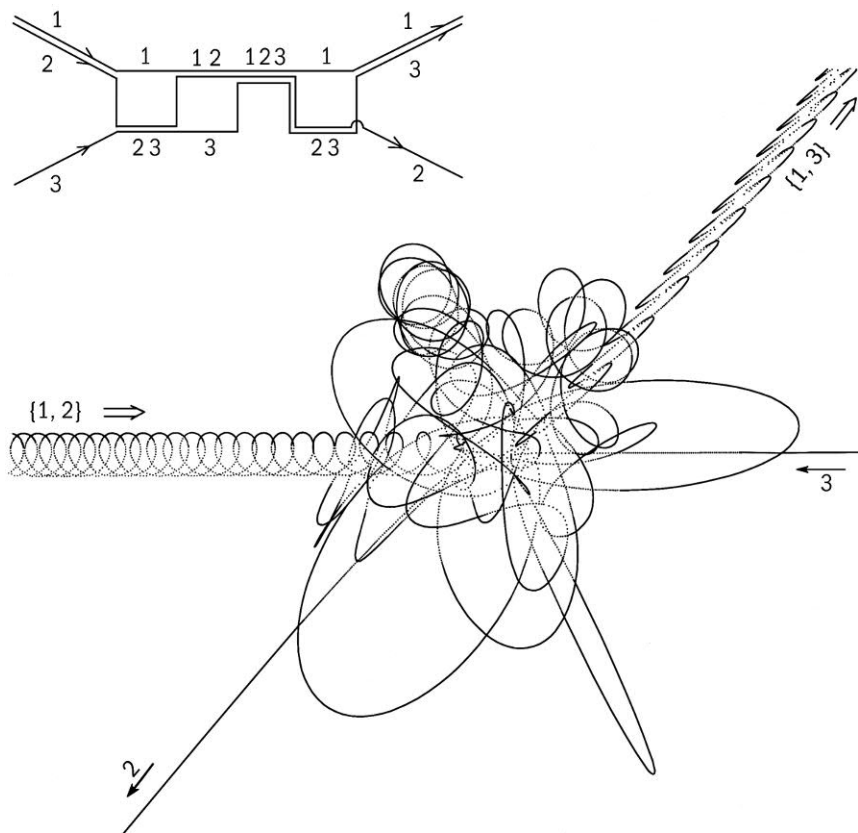


Рис. 2.6. Рассеяние двойной и одиночной звезд с обменом члена в паре. Все три звезды имеют одинаковые массы. Траектории звезд представлены линиями из точек, нанесенных через равные интервалы времени: чем реже расположены точки, тем больше скорость звезд. Слева сверху — диаграмма, демонстрирующая сложную историю взаимодействия звезд — компонентов временной тройной системы. (По: Hut, Bahcall, 1983.)

другие варианты. Но чем бы ни кончилось взаимодействие, в момент тесного сближения звезд образуется временная тройная система (рис. 2.6).

Не имея аналитического решения задачи трех тел, астрономы вынуждены проводить тысячи, а иногда даже миллионы компьютерных экспериментов по рассеянию двойных и одиночных звезд, чтобы определить вероятность того или иного исхода в зависимости от начальных параметров встречи. Зная «эффективное сечение» каждого из возможных результатов рассеяния, можно моделировать эволю-

цию плотных звездных скоплений, где взаимное сближение двух, трех и даже четырех звезд происходит довольно часто.

Таким образом, несмотря на то, что гравитационное взаимодействие трех тел описывается простыми уравнениями, множество решений этой задачи весьма обширно и разнообразно. Среди них есть как очень простые орбиты (например, периодические решения Эйлера и Лагранжа), так и очень сложные траектории, такие, как в метастабильных системах.

Литература

- Мартынова А. И., Орлов В. В., Рубинов А. В., Соколов Л. Л., Никифоров И. И. Динамика тройных систем. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та, 2010.
- Орлов В. В., Титов О. А. // Астрон. журн. 1994. Т. 71. С. 525.
- Рубинов А. В., Петрова А. В., Орлов В. В. // Астрон. журн. 2002. Т. 79. С. 1044.
- Шенсине А., Монтгомери Р., Симо К., Джервер Дж. // Современные проблемы хаоса и нелинейности. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2002. С. 206.
- Benz W., Hills J. // Astrophys. J. 1987. Vol. 323. P. 628.
- Broucke R. // Astron. Astrophys. 1979. Vol. 73. P. 303.
- Chenciner A. (2007). Scholarpedia, 2(10):2111. http://www.scholarpedia.org/article/Three_body_problem.
- Chenciner A., Montgomery R. // Ann. Math. 2000. Vol. 52. P. 881.
- Dvorak R., Contopoulos G., Efthymiopoulos Ch., Voglis N. // Planetary and Space Sci. 1999. Vol. 46. P. 1567.
- Hut P., Bahcall J. N. // Astrophys. J. 1983. Vol. 268. P. 319.
- Moore C. // Phys. Rev. Lett. Vol. 70. P. 3675.
- Strömberg E. // Meddelanden från Lunds Astronomiska Observatorium. 1900. Vol. 1, № 13. P. 115.
- Sundman K. F. // Acta Math. 1912. Vol. 36. P. 105.
- Von Schubart J. // Astron. Nachr. 1956. Vol. 283. P. 17.



3.1. Движение Солнца

В 1718 г. Эдмунд Галлей (назначенный через два года Королевским астрономом) открыл видимые перемещения одних звезд относительно других. Вначале эти *собственные движения*, как их стали позже называть, были обнаружены всего у трех звезд (Альдебаран, Арктур, Сириус), но уже к концу XVIII в. стало ясно, что взаимно перемещаются все звезды, прежде считавшиеся «неподвижными». Встал вопрос о природе этих движений. Выяснилось, что они не объясняются открытыми к тому времени прецессией, нутацией и абберацией света (т. е. явлениями, связанными с движением Земли). Естественно было считать, что оставшаяся после их учета часть собственных движений в наибольшей степени отражает перемещение в пространстве самого Солнца вместе с его планетной системой (рис. 3.1). Впоследствии это мнение подтвердилось. Но раз движется Солнце, которое считается рядовой звездой, то следует ожидать, что движутся и все остальные звезды.

Современные каталоги собственных движений включают миллионы звезд. В результате работы астрометрического спутника «Hipparcos» (ЕКА) в 1989–1993 гг. были с высокой точностью измерены собственные движения свыше 100 000 звезд. Большие надежды астрономы возлагают сейчас на спутник «Gaia» (ЕКА), запуск которого планируется на 2013 г. Он должен с еще более высокой точностью измерить положения и движения свыше 1 млрд звезд в нашей Галактике и ее соседях.

В 1783 г. основоположник галактической астрономии Вильям Гершель, используя собственные движения всего 13 звезд, впервые определил положение *апекса* (арех), т. е. точки на небесной сфере, к которой направлена скорость Солнца. По Гершелю, экваториальные координаты апекса ($A_{\odot}$ и $D_{\odot}$) составили: $A_{\odot} = 262^{\circ}$, $D_{\odot} = +25^{\circ}$. Эта точка на небе располагается недалеко от Веги, а противоположная ей точка (antapex) оказалась недалеко от Сириуса. Близкие значения полу-

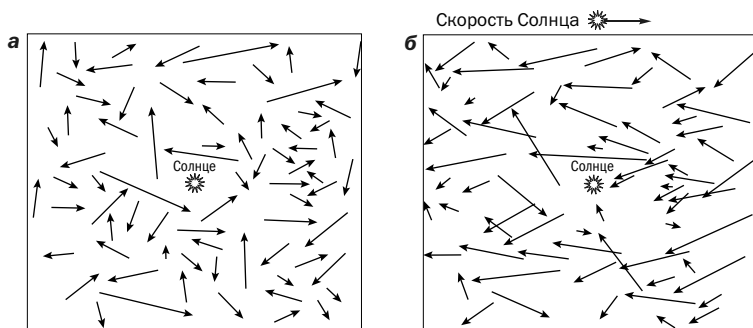


Рис. 3.1. Отражение движения Солнца в наблюдаемых скоростях звезд: *а* — если Солнце неподвижно, то скорости соседних хаотически движущихся звезд не имеют предпочтительного направления; *б* — если Солнце движется на рисунке вправо, то скорости звезд имеют предпочтительное направление влево.

чил в том же году французский астроном П. Прево по собственным движениям 80 звезд. Окончательно существование апекса установил в 1837 г. Ф. Аргеландер, работавший в то время в Або (ныне — Турку, Финляндия). Он проанализировал собственные движения уже 390 звезд. В 1843 г. пулковский астроном Х. Петерс впервые оценил линейную скорость Солнца $V_{\odot}$ (В. Гершель не смог сделать этого, так как в то время еще не были известны расстояния до звезд). А первое надежное определение этой величины принадлежит американскому астроному Уильяму Кэмпбеллу (1910), использовавшему с этой целью *лучевые скорости* звезд, т. е. проекции векторов скорости звезд на луч зрения наблюдателя, которые измеряют по смещению спектральных линий (эффект Доплера).

В настоящее время приняты следующие экваториальные координаты *стандартного апекса* — точки, в направлении которой движется Солнце относительно ближайших (т. е. ярких) звезд: $A_{\odot} = 270^{\circ}$ (т. е. 18^h), $D_{\odot} = +30^{\circ}$. В галактических координатах это $l = 57^{\circ}$ и $b = 22^{\circ}$ (все значения приведены с точностью до градуса). Скорость Солнца относительно этих звезд $V_{\odot} = 19,5$ км/с.

С современной точки зрения понятие стандартного апекса не имеет большого смысла. Еще в 1922 г. Г. Стрёмберг заметил, что скорость Солнца по отношению к физически различным группам звезд заметно различается: она максимальна относительно шаровых скоплений и минимальна относительно звезд диска Галактики. Размышляя над причиной этого явления, шведский астроном Бертиль Линдblad (1927) пришел к следующей схеме нашей звездной системы.

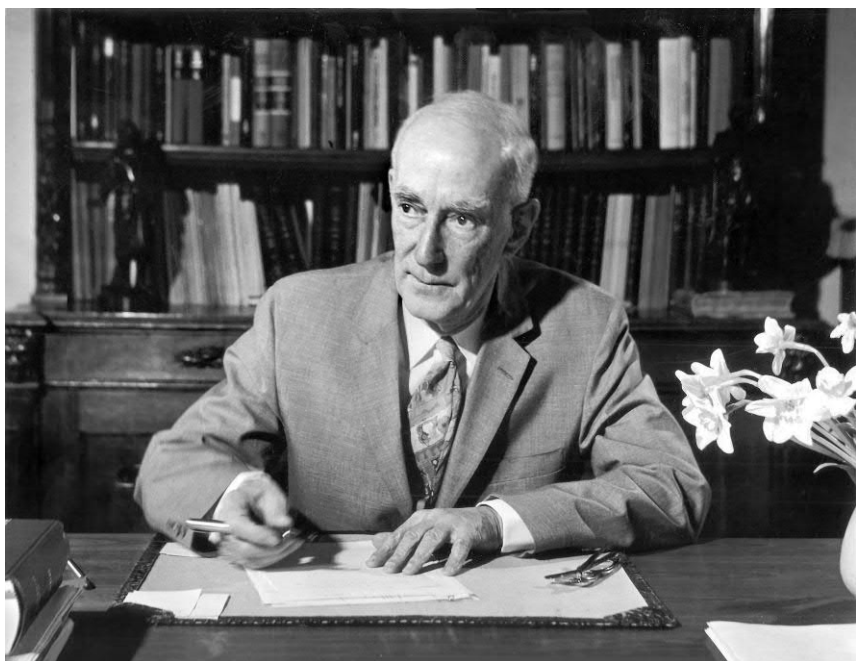


Рис. 3.2. Ян Оорт.

Галактика состоит из большого числа подсистем, различающихся как своим строением (например, сплюснутостью), так и кинематикой. Каждая подсистема вращается вокруг центра Галактики со своей скоростью. Сильно сплюснутые, почти плоские, подсистемы вращаются быстрее всего, а подсистема шаровых скоплений — медленнее остальных. Почти сразу же голландский астроном Ян Оорт привел непосредственные наблюдательные подтверждения схемы Линдблада, а это означало открытие вращения Галактики — одно из величайших открытий в галактической астрономии. Оорт впервые оценил скорость вращения Галактики в окрестности Солнца и сделал выводы о строении Галактики.

Павел Петрович Паренаго (1950) обнаружил, что все кинематические характеристики звезд главной последовательности, включая и параметры движения Солнца, претерпевают резкие изменения в спектральном классе F: скорость $V_{\odot}$ и $A_{\odot}$ на протяжении класса F возрастают, а склонение $D_{\odot}$ убывает, а затем для спектральных классов G, K, и M эти величины остаются без существенных изменений. Это явление, подтвержденное и современными исследованиями, получи-



Рис. 3.3. П. П. Паренаго.

ло название *разрыв Паренаго*. Обще-принятого объяснения ему до сих пор не найдено.

Вернемся к движению Солнца. С одной стороны, можно говорить о движении Солнца относительно той или иной подсистемы. Сравнение этих величин позволяет построить картину относительных дифференциальных движений галактических подсистем. С другой стороны, надо знать скорость Солнца в системе координат, одинаковой для всех подсистем. С этой целью проще всего рассмотреть точку, которая в окрестности Солнца двигалась бы относительно центра Галактики по круговой орбите, и определить относительно неё скорость Солнца $V_0 = (U_0, V_0, W_0)$. Здесь U_0 — компонент скорости Солнца, направленный в сторону центра Галактики, V_0 — в направлении вращения диска Галактики, W_0 — перпендикулярно плоскости диска в направлении северного полюса Галактики. Такую точку называют *местным стандартом покоя* (local standard of rest, LSR). Отметим, что в старой зарубежной литературе этот термин использовался в несколько ином смысле. По данным В. Денена и Дж. Бинни (1998),

$$U_0 = 10,0 \pm 0,4 \text{ км/с}, \quad V_0 = 5,2 \pm 0,6 \text{ км/с}, \quad W_0 = 7,2 \pm 0,4 \text{ км/с}.$$

Как видим, величина скорости Солнца относительно местного стандарта покоя $|V_0| = 13,4 \text{ км/с}$, т. е. заметно меньше, чем относительно ближайших звезд.

Если знать круговую скорость V_c местного стандарта покоя относительно центра Галактики, нетрудно перейти к галактоцентрической скорости Солнца, а затем и других звезд. Правильнее всего было бы использовать с этой целью измерение скоростей внегалактических объектов. К сожалению, V_c определяется весьма неуверенно. В последнее время обычно полагают $V_c = 220 \text{ км/с}$. Тогда период обращения местного стандарта покоя относительно центра Галактики $P = 2 R_0 / V_c$, где R_0 — расстояние от центра Галактики до Солнца (измеренное пока не очень точно). Принимая $R_0 = 8 \text{ кпк}$ и $V_c = 220 \text{ км/с}$, находим, что $P = 223 \text{ млн лет}$.

3.2. Остаточные скорости. Распределение скоростей

Итак, все звезды движутся. Являются ли эти движения совершенно беспорядочными, как движения молекул в газе или отдельных пчел внутри пчелиного роя? Движение каждой пчелы кажется хаотическим, но рой в целом перемещается в пространстве. Можно ожидать, что подобное происходит и в Галактике.

Пусть u_i — скорость i -й звезды относительно центра Галактики в направлении на ее центр, v_i — компонент скорости в экваториальной плоскости, перпендикулярный к u_i , а w_i — компонент скорости звезды, перпендикулярный к галактической плоскости. Выделим в окрестности Солнца n звезд какого-либо физического типа. Вычислим средние величины:

$$U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i, \quad V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i.$$

Каков смысл этих величин? Если $U > 0$, то это значит, что данная подсистема сжимается к центру Галактики, а если $U < 0$, то, напротив, выделенная подсистема расширяется. Если $W \neq 0$, то это означает, что подсистема как целое «подскакивает» над галактической плоскостью. По имеющимся данным, в первом приближении для всех подсистем $U \approx 0$ и $W \approx 0$. Это означает, что в первом приближении Галактика стационарна. В то же время средняя скорость $|V| \approx 0$, и для звезд плоских подсистем Галактики $|V|$ близко к V_c . Это означает, что подсистемы Галактики вращаются с угловой скоростью $\omega = V/R_0$.

Знание *средней скорости*, или *скорости центроида* (U, V, W) различных подсистем необходимо, но еще не достаточно для понимания звездных движений в окрестности Солнца. Рассмотрим для i -й звезды разности $u_i - U; v_i - V$ и $w_i - W$. Их называют компонентами *остаточной скорости* i -й звезды. Остаточные скорости аналогичны тепловым скоростям молекул в газе или потоке жидкости. Свойства Галактики и других звездных систем в большой степени определяются тем, каково распределение их остаточных скоростей.

Вернемся к примеру с роем пчел. Скорость движения роя как целого — это скорость центроида, а скорость пчелы относительно центра роя — остаточная скорость. Если рой при этом вращается или поворачивается, то в скорость центроида надо включить и скорость такого перемещения.

Рассмотрим струю воды. Скорость струи — скорость центроида, а скорость молекулы воды относительно скорости струи в данной точке — ее остаточная (тепловая) скорость.

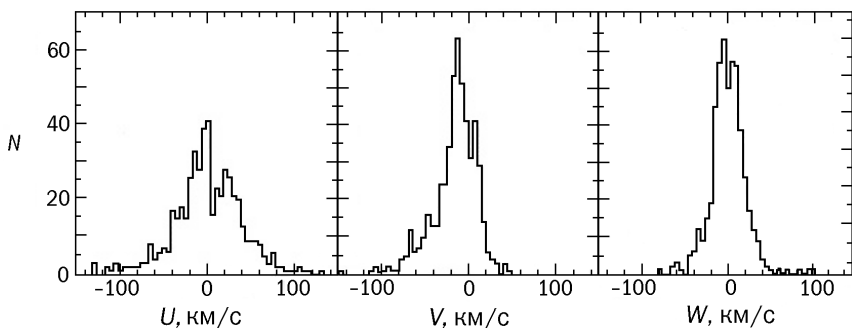


Рис. 3.4. Гистограмма распределения скоростей звезд-карликов спектральных классов К и М. Скорости даны относительно местного стандарта покоя.

Представим идеальный случай, когда все остаточные скорости равны нулю. У всех звезд одна и та же скорость, равная V_c , и они движутся как солдаты в строю, обходя Галактику за время P . Тогда говорят о модели «холодного диска», которая используется в некоторых теоретических исследованиях.

Нетрудно вообразить более общий случай, когда у половины звезд скорости будут равны $v_i = V + s$, а у другой половины $v_i = V - s$, где s — произвольная величина (не слишком большая, чтобы звезды не улетели из системы). Если $s = 0$, то вернемся к модели «холодного диска». Очевидно, что средняя скорость будет равна

$$\frac{1}{n} \left(\frac{n}{2}(V + s) + \frac{n}{2}(V - s) \right) = V.$$

В действительности распределение остаточных скоростей звезд в окрестности Солнца является, конечно, более сложным (рис. 3.4). Распределение u - и w -скоростей, а в первом приближении для однородных групп — и v -скоростей, можно аппроксимировать так называемым *нормальным законом (гауссианой)*, которому следует распределение многих случайных величин. Если $f_u du$ — число звезд, у которых компонент скорости в направлении к центру Галактики заключен между u и $u + du$, то тогда

$$f_u(u) du = \frac{n}{\sqrt{2\pi} \sigma_u} e^{-\frac{u^2}{2\sigma_u^2}} du,$$

где величина σ_u характеризует разброс значений скорости. В пределе $\sigma_u \rightarrow 0$ остаточные скорости равны нулю. Аналогично

$$f_v(v)dv = \frac{n}{\sqrt{2}} \frac{v^2}{v} e^{-\frac{v^2}{2v}} dv,$$

$$f_w(w)dw = \frac{n}{\sqrt{2}} \frac{w^2}{w} e^{-\frac{w^2}{2w}} dw.$$

Величины $\frac{2}{u}$, $\frac{2}{v}$, $\frac{2}{w}$ называют *дисперсиями остаточных скоростей*. Нетрудно найти, что если число звезд $n \gg 1$ (так что случайными флуктуациями можно пренебречь), то

$$\frac{2}{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2, \quad \frac{2}{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2, \quad \frac{2}{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i^2,$$

т. е. дисперсии являются средними квадратами остаточных скоростей. Последнее определение дисперсий скоростей сохраняет смысл и тогда, когда распределение скоростей не следует строго нормальному закону. В разные годы многие авторы предлагали иные, отличные от нормального закона, аппроксимации для функции распределения скоростей. Но обычно используется именно нормальный закон. Часто рассматривается *полная дисперсия скоростей* $\frac{2}{u} + \frac{2}{v} + \frac{2}{w}$.

Величины u , v , w называют *среднеквадратичными скоростями*. Если рассмотреть пространство переменных u , v , w (*пространство скоростей*) и построить в нем поверхности одинаковых плотностей концов векторов скоростей, то получим эллипсоиды (рис. 3.5). Поэтому распределение скоростей согласно приведенным выше формулам называют *эллипсоидальным*. Первым его предложил немецкий астроном Карл Шварцшильд в 1907 г., поэтому такое распределение скоростей называют также *шварцшильдовским*. В случае равенства дисперсий скоростей, $\frac{2}{u} = \frac{2}{v} = \frac{2}{w}$, распределение остаточных скоростей называют *сферическим*, или *изотропным*, в противном случае говорят об анизотропии их распределения. Изотропным является, например, распределение скоростей молекул в газе. Тогда число молекул, у которых абсолютная величина скорости заключена между s и $s + ds$, пропорционально

$$c^2 e^{-\frac{c^2}{v_m^2}} dc,$$

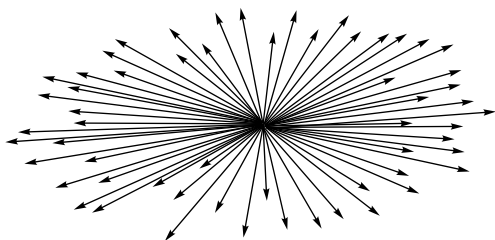


Рис. 3.5. Эллипсоидальное распределение скоростей. Стрелки показывают направления и величины скоростей звезд, заключенных в окрестности некоторой точки.

где $\nu_m^2 = 2^2 \cdot 2(\frac{2}{u} \frac{2}{v} \frac{2}{v}) = 6 \frac{2}{u}$. Такое распределение называется максвелловским (рис. 3.6). Нетрудно найти, что ν_m является наиболее вероятной скоростью. В теории газов показывается, что $\frac{1}{2} m \nu_m^2 = kT/m$, где k — постоянная Больцмана, T — температура газа, m — масса молекулы газа. Создатель газокINETической теории Людвиг Больцман установил, что максвелловское распределение скоростей молекул устанавливается в результате их взаимодействия. До конца XIX в. считалось, что и распределение скоростей звезд в Галактике является сферическим. Открытие анизотропии распределения звездных скоростей произвело впечатление катастрофы. Динамика звездных систем возникла в попытках объяснить ее.

Для звезд плоских подсистем Галактики дисперсии скоростей являются наименьшими, для них $\nu_v = 15$ км/с. В то же время для таких объектов сферической составляющей, как короткопериодические переменные звезды и субкарлики, ν_v достигает значений 100 км/с и даже 150 км/с. Для большинства подсистем Галактики $\nu_v/u = 0,6$ и $w/u = 0,5$. Известно эмпирическое соотношение (Г. Стрёмберг, 1922)

$$V_c - V = \frac{2}{u},$$

где $\frac{2}{u}$ — коэффициент пропорциональности. Сейчас принимают 0,125 с/км. Эта зависимость находит объяснение в классической

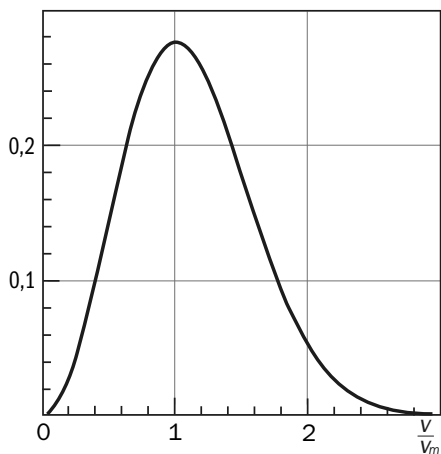


Рис. 3.6. Максвелловское распределение скоростей молекул идеального газа по абсолютной величине их скоростей. По оси ординат — относительное число молекул, имеющих скорость ν в единицах наиболее вероятной скорости ν_m .

динамике звездных систем. Сильно упрощая и пользуясь аналогией с теорией газов, можно сказать, что скорость вращения центроидов V (т. е. средняя скорость вращения ансамбля звезд) меньше скорости кругового движения материальной точки V_c за счет «давления», которое испытывает центроид при своем движении. Можно добавить, что при наличии остаточных движений часть кинетической энергии звезд уходит на эти движения и, соответственно, кинетическая энергия вращения уменьшается.

С 1950-х гг. известна зависимость «дисперсия скоростей —

возраст»: у более старых подсистем галактического диска дисперсии скоростей больше. Можно было бы объяснить это тем, что в прошлом звезды образовывались с большими остаточными скоростями, чем сейчас. Такова и сейчас точка зрения некоторых исследователей. Однако естественнее предположить, что в ходе эволюции диска дисперсия скоростей звезд увеличивается, т. е. диск, как говорят, «разогревается». Тогда чем раньше сформировалась подсистема, тем больше будет сегодня дисперсия скоростей ее звезд. Зависимость дисперсии от времени можно записать в такой форме:

$$u^2 = u_0^2 + k \frac{t}{t_0},$$

где t — возраст подсистемы, u_0 , t_0 , k — параметры. Важно определить по наблюдательным данным значение k , тогда можно было бы заключить, какой механизм нагрева диска является более вероятным. К сожалению, уверенных оценок этой величины до сих пор нет. Разные авторы получали для k оценки от $1/5$ до 1. Согласно Дж. Бинни (2000), данные наблюдений лучше всего согласуются с $k = 1/3$, а Дж. Гилмор (2007) нашел $k = 1/2$.

Для объяснения зависимости «дисперсия скоростей — возраст» выдвигались разные предположения. В настоящее время считают, что, скорее всего, дисперсии скоростей возрастают в результате взаимодействия звезд со спиральными волнами плотности и гигантскими молекулярными облаками.

3.3. Двойные системы

Естественно предположить, что причиной звездных движений является их взаимное притяжение по закону Ньютона. По каким орбитам движутся звезды? Начнем с самых простых случаев.

Еще в XVIII в. В. Гершель выявил среди звезд тесные пары, вероятно, связанные гравитационно. В результате более чем 25-летних наблюдений в 1803 г. он отметил изменения во взаимном расположении компонентов ряда двойных звезд и определил период обращения в системе двойной звезды Кастор. В дальнейшем целенаправленные длительные наблюдения двойных звезд производили В. Я. Струве и его сын О. В. Струве. Ряд авторов предложили методы определения элементов орбит двойных звезд.

Если мы будем считать каждый компонент двойной системы точечной массой, то придем к классической задаче двух тел. Как известно, в этом случае относительная орбита будет эллипсом. Казалось

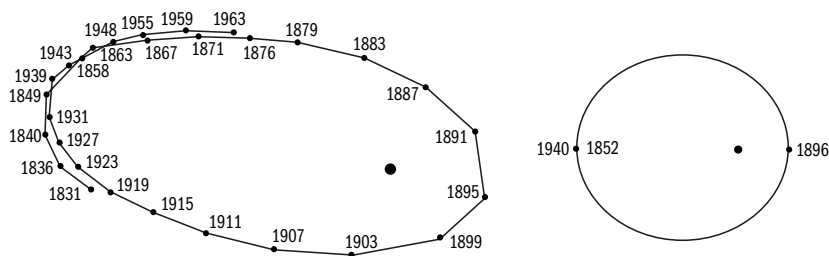


Рис. 3.7. Видимая (слева) и истинная относительные орбиты двойной звезды 70 Змееносца (в разном масштабе).

бы, нетрудно определить по наблюдениям эксцентриситет эллипса и (если известно расстояние до пары) его большую полуось. В действительности сделать это не так просто, поскольку наблюдения дают проекцию эллиптической орбиты на картинную плоскость, и форма орбиты оказывается искаженной. Применение законов механики (второго закона Кеплера) позволяет, тем не менее, восстановить истинную эллиптическую орбиту и найти ее ориентацию. В качестве примера на рис. 3.7 приведена орбита для двойной звезды 70 Змееносца. Третий закон Кеплера дает возможность найти суммарную массу пары по периоду P :

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2},$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ — гравитационная постоянная, a — большая полуось орбиты. Возможность определить массы двойных систем имеет огромное значение для астрономии, так как до сих пор это единственный способ прямого определения масс звезд.

Можно ли определить массу каждой звезды пары в отдельности? Оказывается, что можно, если измерялись не только относительные положения, но и абсолютные положения каждой звезды. Из решения задачи двух тел известно, что не только относительная орбита является эллипсом, но и каждое из тел движется по эллиптической орбите относительно общего центра масс (рис. 3.8). После того, как астрометрические измерения позволили найти истинные абсолютные орбиты компонентов двойной системы, в частности большие полуоси a_1 и a_2 , следует воспользоваться равенством $m_1/m_2 = a_2/a_1$. Зная сумму масс и их отношение, нетрудно найти массу каждого компонента.

Существенно следующее. После того, как определены элементы хотя бы относительной орбиты пары, можно вычислить видимые положения звезд в будущем и сравнить предсказание теории с наблюдения-

ми. Уже первые десятилетия наблюдений двойных звезд показали согласие с расчетами, сделанными на основе ньютоновского закона тяготения. Тем самым теория гравитации Ньютона получила непосредственную проверку не только в пределах Солнечной системы, но и на межзвездных расстояниях. Именно тогда ньютоновский закон стал законом *всемирного* тяготения.

Но следует ли этот закон однозначно из того факта, что относительная орбита в двойной звезде аппроксимируется эллипсом? Французский математик Ж. Бертран поставил в 1877 г. задачу: зная, что тела описывают конические сечения, и не предполагая более ничего, найти выражения для силы, вызывающей эти движения, как функции координат точки. К тому времени были известны два решения этой задачи: сила направлена к фиксированному центру, и ее модуль должен быть либо прямо пропорционален расстоянию, либо обратно пропорционален его квадрату. Оказалось, что других решений у проблемы Бертрانا нет. Первое из упомянутых решений — это так называемый «гуковский случай»: напряжение в упругом теле пропорционально его деформации (закон Гука). Шарик на резинке вращается по эллипсу. Свободный маятник, способный колебаться в двух плоскостях, при небольшой амплитуде колебаний тоже движется по эллипсу. В однородной гравитирующей среде, где сила притяжения к центру масс линейно возрастает с расстоянием, пробное тело тоже движется по эллипсу (центр которого лежит в центре масс). В случае же двойных звезд мы имеем два «точечных» гравитирующих тела в вакууме, сила взаимодействия между которыми может только убывать с расстоянием. Тот факт, что тела движутся по эллипсу, доказывает, что эта сила убывает обратно пропорционально квадрату расстояния — второе из двух возможных решений проблемы Бертрана. Таким образом, эллиптичность орбит в двойных звездах подтверждает, что звезды взаимодействуют именно по ньютоновскому закону обратных квадратов.

Большое значение для современной галактической астрономии имеют наблюдения звезды S2 и соседних с ней звезд, обращающихся вокруг радиисточника Sgr A*, который, как считается, связан с черной дырой в центре Галактики. По-видимому, в первом приближении орбиты этих звезд можно считать эллиптическими (см. рис. 7.31). Пара-

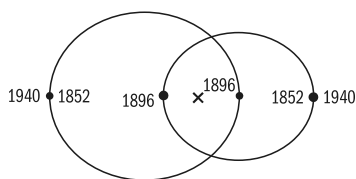
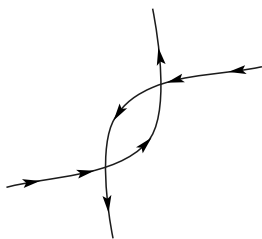


Рис. 3.8. Истинные абсолютные орбиты каждого из компонентов 70 Змееносца. Крестиком отмечен центр масс системы.



метры этих орбит позволяют вычислить массу невидимой черной дыры. Так классическая теория находит новые применения.

До сих пор мы предполагали, что энергия пары отрицательна. Только в этом случае орбиты компонентов двойной системы являются эллипсами. Если же энергия является положительной, то орбиты — гиперболы. В этом случае звезды пройдут одна мимо другой и разойдутся, изменив направления векторов своих скоростей (рис. 3.9). Такие взаимодействия — двойные сближения — имеют большое значение для динамики звездных систем, и позже мы к ним еще обратимся.

Рис. 3.9. Изменение направлений скоростей звезд при двойном сближении.

Рис. 3.9. Изменение направлений скоростей звезд при двойном сближении.

3.4. Орбиты в тройных системах

Следующим по простоте кажется случай тройных систем. Он представляет интерес и потому, что в Галактике не менее 6% звезд входит в состав тройных систем, и потому, что тройные взаимодействия галактик в группах и скоплениях, по-видимому, существенно влияют на их эволюцию. Как мы уже знаем (см. главу 2), удовлетворительного аналитического решения задачи трех гравитирующих материальных точек не найдено. В 1912 г. финский математик К. Сундман получил решение в виде рядов по вспомогательной переменной, зависящей от времени. Однако ряды эти сходятся крайне медленно. Например, для системы Солнце—Юпитер—Сатурн требуется использовать порядка 10^{80000} членов, чтобы получить координаты с точностью в несколько процентов на протяжении одного оборота Юпитера. Но проблема даже не в этом, а в том, что метод Сундмана не может дать никакой информации о глобальных свойствах даже одного решения. Если бы и удалось построить быстро сходящиеся ряды, то они сами по себе не давали бы возможности сделать заключение о форме орбиты и получить иные выводы качественного характера.

Великие математики Л. Эйлер и Ж.-Л. Лагранж еще в XVIII в. нашли простые частные решения задачи трех тел (рис. 3.10 и 3.11). В них тела все время находятся на одной вращающейся прямой или в вершинах равностороннего треугольника. Недавно были найдены любопытные решения — «хореографии» (рис. 3.12). В них все тела движутся по одной и той же кривой, не сталкиваясь друг с другом.

В 1961 г. московский математик К. А. Ситников рассмотрел следующую интересную задачу. Рассмотрим *ограниченную задачу трех тел*,

т. е. будем считать, что масса одного из тел (обозначим его C) пренебрежимо мала по сравнению с массами тел A и B . Будем считать также, что массы тел A и B равны. Тела A и B движутся по эллипсам друг относительно друга, следуя законам Кеплера. Рассмотрим плоскость, в которой постоянно находятся тела A и B , и выделим на ней центр масс этих тел. Проведем через него прямую l , перпендикулярную этой плоскости. Поместим в начальный момент тело C на эту прямую и придадим ему скорость вдоль l (рис. 3.13). Тогда тело C будет все время двигаться по прямой l .

Ситников показал, что при подходящем выборе начальных условий тело C будет колебаться относительно плоскости, содержащей тела A и B , причем амплитуда колебаний будет неограниченно увеличиваться со временем. Позднее было показано, что в задаче Ситникова масса тела C может быть конечной, и в зависимости от выбора начальных условий может быть получено любое решение.

Численные решения задачи трех тел для различных начальных условий показали большое разнообразие орбит. В ряде случаев орбиты оказываются *хаотическими*: при небольшом изменении начальных условий происходит полное изменение орбит. Хаотизации способствуют тесные сближения тел.

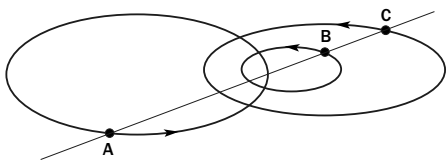


Рис. 3.10. Эйлерово решение задачи трех тел.

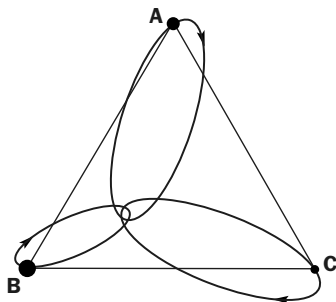


Рис. 3.11. Эллиптическое лагранжево решение задачи трех тел.

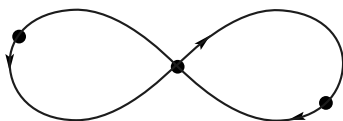


Рис. 3.12. Хореографическое решение задачи трех тел.

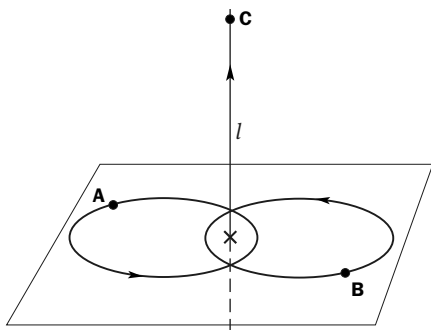


Рис. 3.13. Тройная система К. А. Ситникова.

Одним из центральных в динамике тройных систем является вопрос об их устойчивости. Легко доказывается следующее утверждение (*теорема Якоби*): если система $N \geq 3$ гравитирующих точечных масс обладает положительной энергией, то по крайней мере одно из тел улетает на бесконечное расстояние. Таким образом, система с положительной энергией неустойчива: она распадается.

А что будет при отрицательной энергии системы? В упоминавшихся выше частных случаях (Эйлера, Лагранжа, «хореографии») системы устойчивы (как говорят, движения финитны). Но не являются ли они исключениями? Можно было бы ожидать, что после того, как два тела в системе тесно сблизятся и провзаимодействуют, скорость одного из них окажется достаточно большой, чтобы преодолеть притяжение двух других тел и уйти из системы. Компьютерные эксперименты подтвердили эти ожидания. Кстати, надо иметь в виду, что в системах с отрицательной энергией невозможен полный распад, при котором все три тела неограниченно удаляются друг от друга.

Выделяют два больших класса тройных систем. В одном из них все три расстояния между компонентами сравнимы между собой (рис. 3.14). Следует ожидать, что такие системы распадаются. Как скоро произойдет распад, зависит от взаимных положений и скоростей тел в данный момент. В среднем на это нужно столько времени, сколько необходимо, чтобы компоненты успели несколько раз сблизиться и разойтись. В качестве примера приведем результаты расчета «пифагорейской» задачи трех тел, в которой три массы $m_A = 3$, $m_B = 4$, $m_C = 5$ первоначально неподвижны в углах пифагорейского треугольника, стороны которого равны 3 (напротив точки A), 4 (напротив B) и 5 (рис. 3.15).

Надо подчеркнуть, что подобные соображения справедливы, если массы всех тел одного порядка. Система Солнце–Юпитер–Сатурн по геометрической классификации также относится к этому классу, однако является устойчивой, потому что масса Солнца на три порядка больше, чем масса планет.

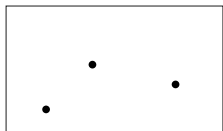


Рис. 3.14. Тройная система, в которой расстояния между компонентами сравнимы. Скорее всего, неустойчива.

Второй класс — это *иерархические системы*, в которых одно из тел всегда находится на значительном удалении от остальных и в системе не происходит тесных сближений (рис. 3.16). Тела, близкие друг другу, двигаются по орбитам, почти эллиптическим. Удаленное тело обращается вокруг центральной пары практически по эллипсу.

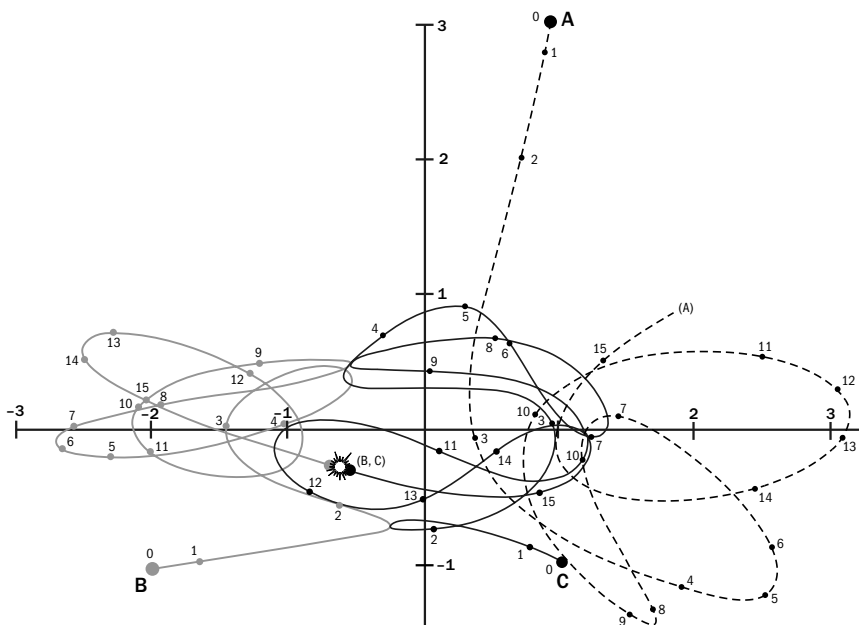


Рис. 3.15. Орбиты в пифагорейской задаче трех тел.

Поэтому разумно ожидать, что такая конфигурация окажется устойчивой. Правда, может случиться, что система первого класса временно станет выглядеть как иерархическая, а затем распадется. Но вероятность этого мала. Если же говорить о реальных тройных звездах, то следует помнить, что они испытывают внешние воздействия (пролетающие звезды поля, газовые облака и т. д.). Из-за них могут распасться даже иерархические системы.

Представим теперь, что мимо двойной звезды пролетает третья звезда. Может оказаться, что третья звезда улетит. Может случиться и так, что она оторвет один из компонентов и займет его место. Спрашивается, как изменятся в среднем размеры оставшейся пары по отношению к первоначальной. В 1950 г. этот вопрос рассмотрели Лев Эммануилович Гуревич и Борис Юльевич Левин, а в 1975 г. фундаментальное исследование выполнил в Англии Дуглас Хегги. Они нашли, что существуют два класса двойных систем в звездном поле, в зависимости от величины параметра

$$\frac{Gm_1m_2}{2am_a} \frac{2}{a}.$$



Рис. 3.16. Иерархическая тройная система.

Здесь m_1, m_2 — массы звезд пары, a — большая полуось их орбиты, m_a , σ_a^2 — масса и дисперсия скоростей звезд поля. Таким образом, $Gm_1m_2/2a$ — это энергия гравитационной связи двойной системы, а $m_a \sigma_a^2$ — удвоенная кинетическая энергия звезды поля. Если $\sigma_a^2 > 1$, то пара называется «прочной» (по Хегги: hard binary), а в противном случае — «непрочной» (по Хегги: soft binary). Были доказаны следующие утверждения (законы Гуревича—Левина—Хегги): взаимодействуя со звездами поля, прочные пары в среднем становятся все более прочными (т. е. более тесными), а непрочные пары в среднем становятся менее прочными (т. е. расширяются). Численные эксперименты подтвердили эти статистические законы.

Важное значение для понимания динамики тройных систем имело обсуждение *проблемы захвата*, происходившее в 1950-е гг. в связи с космогонической гипотезой О. Ю. Шмидта. Ставится следующий вопрос: могут ли образоваться двойные и кратные звезды в результате объединения ранее существовавших одиночных звезд в одну систему. При сближении двух звезд (рассматриваемых как точечные массы!) в рамках классической механики, как известно, они проходят друг около друга по гиперболам (рис. 3.9). Поэтому при двойном сближении двойная звезда образоваться не может. Некоторые авторитетные теоретики утверждали, что пара не может образоваться и при тройном сближении. Тем не менее Отто Юльевич Шмидт показал возможность захвата, пользуясь принципом *пространственно-временной симметрии* движения, т. е. обратимостью во времени уравнений классической механики. Напомним суть этого принципа.

Рассмотрим систему N гравитирующих точечных масс. Каждая точка движется по своей траектории. В каждый момент времени каждое тело занимает определенное положение и имеет определенную скорость. Теперь мысленно прервем движения всех тел, а затем придадим им скорости, равные по величине и противоположные по направлению тем скоростям, которые они имели. Тогда все тела будут двигаться по тем же траекториям, по которым они уже следовали, но в обратном направлении.

Теперь представим себе пару. Если мимо одного из компонентов пары пройдет третье тело, то скорость этого компонента резко изменится, это тело сможет преодолеть притяжение второго компонента пары. Двойная система окажется разорванной, и все три тела уйдут в разные стороны. Если теперь мы воспользуемся принципом пространственно-временной симметрии и изменим скорости всех трех тел на противоположные, то движение тел пойдет, как на экране при демон-

страции фильма от конца к началу. Три тела сблизятся, два из них образуют пару, а третье уйдет. Проблема состоит теперь в том, чтобы доказать, что захват не является временным и что звезды в образовавшейся паре все время будут на конечных расстояниях друг от друга. В конце концов возможность захвата была строго доказана. Наиболее полные результаты получили Г. А. Мерман в Ленинграде и В. М. Алексеев в Москве, которые нашли условия захвата.

Конечно, реальные кратные звезды вряд ли образовались таким образом. Но рассмотренные задачи представляют интерес при исследовании взаимодействия галактик. В первом приближении будем считать галактики точечными массами, окруженными облаками маломассивных тел (звезд). При взаимодействии вещество из одной галактики может «перетечь» в другую. Реальные галактики имеют конечные размеры, сравнимые с расстояниями между ними, и включают не только звезды, но и газ. Существенную роль при их взаимодействии играет динамическое трение, которое мы рассмотрим ниже. Тогда полная сила, действующая на каждую звезду, будет зависеть от скорости, вследствие чего принцип пространственно-временной симметрии уже становится неприменимым. Поэтому оказываются возможными и слияния галактик, и так называемый «каннибализм». По-видимому, такие процессы постоянно происходят в мире галактик.

Считается, что эллиптические галактики возникли в результате слияний. Признаки происходивших в прошлом подобных явлений находят и для нашей Галактики.

3.5. Регулярные и иррегулярные силы

Мы видели, что даже в тройных системах орбиты звезд являются весьма непростыми. Какими же невообразимо сложными они должны быть в шаровых скоплениях (содержащих порядка 10^5 звезд) и тем более в Галактике (10^{11} звезд)! В 1838 г. профессор Харьковского университета А. Ф. Шагин писал: «Что касается до определения общих центров тяготения и вычисления орбит звезд, то, без сомнения, это превосходит силы ума человеческого; другой Коперник или Ньютон не будут в состоянии решить сего величайшего в Природе вопроса». К счастью, это пессимистическое мнение не подтвердилось.

Прежде всего следует внимательно проанализировать суммарное силовое поле, создаваемое звездами. Еще основоположники динамики звездных систем сэр Артур Эддингтон и К. Шварцшильд поняли, что нужно различать силы двух родов. Каждая из них является гравитационной, но свойства их различны.

Нашу Галактику, другие галактики, шаровые скопления можно рассматривать как сплошные гравитирующие среды, в которых вещество распределено непрерывным образом с плотностью (x, y, z) . Например, центральные части звездных систем чаще всего являются более плотными, чем периферийные. У галактик часто выделяется плотная экваториальная плоскость. Большинство шаровых скоплений являются почти сферическими.

В каждой точке сплошная гравитирующая среда создает определенную силу. В самом центре системы такая сила, очевидно (в силу симметрии), равна нулю. Если практически вся масса M сферической системы сосредоточена внутри шара радиуса r , то при $r \geq r$ сила притяжения равна GmM/r^2 (т. е. силе притяжения со стороны «точки» массы M). Здесь m — масса притягиваемой звезды.

Многие астрономические тела и системы тел с хорошей точностью можно считать телами вращения (т. е. они обладают, как говорят, ротационной симметрией). Введем цилиндрическую систему координат R, ϕ, z с началом в центре масс системы и осью z , направленной вдоль оси симметрии. Тогда плотность $\rho = \rho(R, z)$. Величина силы притяжения со стороны системы как сплошной среды $F = F(R, z)$. Предположим, что плоскость $z = 0$ является плоскостью симметрии, т. е. $\rho(R, z) = \rho(R, -z)$. Пусть $V_c(R)$ — круговая скорость в плоскости $z = 0$ на расстоянии R от оси симметрии. Тогда справедливо равенство

$$F(R, 0) = \frac{V_c^2(R)}{R}.$$

Оно выражает условие, что при движении точки по круговой орбите сила гравитации и центробежная сила уравниваются. Выписанное равенство лежит в основе методов моделирования сглаженного распределения масс в галактиках по известной из наблюдений кривой вращения. Для сферических систем

$$F(r) = \frac{GM(r)}{r^2},$$

где $M(r)$ — полная масса, заключенная внутри шара радиуса r . Тогда

$$M(r) = \frac{rV_c^2(r)}{G}.$$

Пусть, например, $V_c(r) = \text{const}$, что по современным данным наблюдений для нашей Галактики можно принять в самом грубом приближении. Тогда получаем, что $M(r)$ линейно возрастает с расстоянием от центра: $M(r) \propto r$. Плотность на расстоянии r от центра оказывает

ся обратно пропорциональной квадрату расстояния от центра: $\rho(r) = \rho_0(r_0/r)^2$. Для несферических систем задача сильно усложняется.

Сила притяжения звездной системой как сплошной гравитирующей средой называется *регулярной* или *сглаженной*. Полная сила, действующая на каждую звезду, складывается из регулярной силы и добавки, образованной, как легко сообразить, притяжением нескольких ближайших соседей. Разность между полной и регулярной силами называют *иррегулярной*, или *случайной*, силой.

Иррегулярная сила зависит от того, как случайным образом располагаются в окрестности данной звезды ее соседи, поэтому-то она и носит случайный характер. Заранее указать величину и направление иррегулярной силы невозможно. Можно лишь найти вероятность того, что она примет то или иное значение. Например, для системы гравитирующих точек, разбросанных в пространстве равномерно с естественными флуктуациями, закон распределения случайной силы нашел в 1919 г. норвежский физик Я. Хольцмарк (он исследовал распределение электростатической силы в системе заряженных частиц, а не гравитационной силы, но различие в данном случае несущественно). Формула распределения Хольцмарка оказалась сложной, не выражающейся через элементарные функции. Однако это распределение очень близко к распределению случайной силы от ближайшего соседа данной звезды.

Специальные компьютерные исследования подтвердили стохастичность иррегулярных сил. Заметим, что регулярные и иррегулярные воздействия можно увидеть в большинстве физических, биологических и социальных процессов.

Найдем характерное время действия регулярных сил, т. е. время, за которое система может существенно измениться под действием этих сил. Регулярная сила — это сила гравитации. Поэтому характерное время ее действия должно зависеть от гравитационной постоянной G и массы системы (ее «гравитационного заряда») M . Чем меньше размер r системы с фиксированной массой, тем, очевидно, сильнее гравитационное воздействие внутри системы, тем быстрее действует регулярная сила и тем меньше ее характерное время. Таким образом, в первом приближении характерное время t_g действия регулярных сил должно зависеть от G , M , r . Из этих трех величин можно составить только одну комбинацию, имеющую размерность времени. Ее мы и примем за t_g :

$$t_g = \sqrt{\frac{r_*^3}{GM}}.$$

Эту величину называют *гравитационным временем* или *временем пересечения*. Введем среднюю плотность системы

$$\frac{3M}{4r_*^3} \quad \frac{M}{4r_*^3}$$

Тогда можно записать:

$$t_g = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{G}}.$$

Времени пересечения можно придать более наглядный смысл. Рассмотрим звезду, которая движется по круговой орбите на границе системы, на расстоянии r от центра. По третьему закону Кеплера для периода обращения P имеем:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}.$$

Отсюда заключаем, что $t_g = P/2$.

Рассмотрим другой предельный случай звездных движений — прямолинейные орбиты, проходящие через центр. Представим систему в виде однородного шара плотности ρ . Нетрудно показать, что период прямолинейных колебаний звезд

$$P = \pi \sqrt{\frac{3}{G\rho}},$$

а значит,

$$P = 2\sqrt{3}t_g.$$

Это равенство объясняет, почему t_g названо «временем пересечения». Для Галактики t_g составляет порядка 10^8 лет.

Оценим теперь относительную значимость регулярных и иррегулярных сил. Для простоты будем сравнивать регулярную силу с силой притяжения ближайшего соседа. Если сосед находится близко к данной звезде, то его притяжение превосходит регулярную силу. Поэтому около каждой звезды можно провести сферу таким образом, что внутри сферы доминирует иррегулярная сила, а вне сферы — регулярная. Пространство системы мы разбиваем этим самым на две части: области внутри сфер и вне их. Примем, что система обладает сферической симметрией и звезды распределены в ней равномерно с естественными флуктуациями. Можно подсчитать, что отношение суммы объемов, внутри которых иррегулярная сила больше регулярной, к полному объему системы составляет:

$$A \frac{2}{\sqrt{N}} \frac{\overline{m}^{3/2}}{\overline{m}^{3/2}}.$$

Здесь N — число звезд в системе, а черта означает усреднение по звездам системы. Величина A имеет смысл для любой системы. Ее называют *параметром Агеяна*, поскольку эту характеристику звездных систем ввел ленинградский астроном Татеос Артемьевич Агеян в 1960 г.

Очевидно, что чем больше значение параметра Агеяна, тем больше роль иррегулярных сил. Следовательно, если $N \gg 1$ (как в нашей Галактике), то значение иррегулярных сил ничтожно, и движения звезд определяются почти исключительно сглаженным полем. Такие системы называют *бесстолкновительными*.

Имеет значение и множитель $\overline{m}^{3/2}/\overline{m}^{3/2}$. Если бы массы всех звезд были одинаковы, он равнялся бы единице. Если же массы звезд различаются, то это выражение больше единицы. Для примера рассмотрим следующие два случая: 1) система состоит из трех звезд, причем массы двух из них одинаковы, а масса третьей больше в 10 раз; 2) система состоит из двух звезд, причем масса одной из них больше массы другой в 100 раз. В первом случае $\overline{m}^{3/2}/\overline{m}^{3/2} = 1,40$, а во втором эта дробь приближенно равна 1,39.

В нашей Галактике и других звездных системах иррегулярные силы могут быть обязаны своим существованием не только взаимодействию звезд между собой, но и воздействию со стороны гигантских молекулярных облаков, шаровых скоплений и других объектов, которые надо учитывать при вычислении параметра Агеяна. За их счет отношение $\overline{m}^{3/2}/\overline{m}^{3/2}$ может достигать значений 10^2 – 10^3 . На важную роль подобных массивных объектов в динамике Галактики обратили внимание в 1951 г. Лайман Спитцер и Мартин Шварцшильд (сын К. Шварцшильда) в США, а также Александр Игнатьевич Лебединский в СССР.

Заметим наконец, что регулярные и иррегулярные силы взаимосвязаны. Так, перераспределение звезд, вызванное иррегулярными силами, приводит к изменению регулярного гравитационного поля. В некоторых случаях, например при учете далеких звездных сближений, в уравнениях, описывающих эволюцию звездных систем, вызывает затруднения и само разделение регулярных и иррегулярных сил, являющееся до известной степени условным. С другой стороны, иррегулярные силы (в особенности возникающие при далеких сближениях) иногда рассматриваются как флуктуации регулярных.

3.6. Плоские звездные орбиты

Будем считать, что движение звезд определяется только регулярными силами. По каким орбитам будут они двигаться? Сначала рассмотрим самый простой случай — движение в центральном поле. К такой задаче мы придем, изучая движение звезды внутри сферической галактики или шарового скопления, которые будем считать стационарными. Интуитивно кажется очевидным, что тогда орбита должна быть плоской. Действительно, в механике довольно просто доказывалось, что при движении в центральном поле орбита (если она не прямолинейная) все время лежит в плоскости, проходящей через центр системы. Рассмотрим также ротационно-симметричную галактику, для которой существует плоскость симметрии, и будем исследовать орбиты в экваториальной плоскости. В этом случае опять придем к задаче о движении в центральном поле.

Введем в плоскости орбиты полярные координаты R , (с началом в центре системы). Пусть v_R — проекция скорости звезды на луч, соединяющий центр системы со звездой, v — проекция на направление, перпендикулярное этому лучу. Примем массу звезды за единицу. При движении в стационарном поле сохраняется (удельная) энергия звезды

$$E = \frac{1}{2} v_R^2 + v^2 - (R),$$

где (R) — потенциальная энергия звезды (в расчете на единицу массы), определяемая сглаженным распределением вещества в галактике. Если подавляющая часть вещества галактики сосредоточена в ядре массы M , то вне ядра $(R) = -GM/R$. Если же галактику можно считать однородным эллипсоидом, то $(R) = -\frac{1}{2} Q_0^2 - \frac{1}{2} Q_1^2 R^2$. Для того, чтобы звезда не улетела из системы, необходимо, чтобы $E < 0$.

Известно, что при движении в центральном поле сохраняется (удельный) момент импульса звезды (интеграл площадей)

$$h = Rv.$$

Это означает, что для произвольного центрального поля остается справедливым второй закон Кеплера. Величины E и h , сохраняющиеся вдоль орбиты, называются *интегралами движения*. Знание их полностью определяет глобальные свойства орбиты.

Если $h = 0$ (т. е. $v_R = 0$) и $v_R \neq 0$ и при этом $E < 0$, то звезда совершает прямолинейные колебания (*либрации*), пролетая через центр со скоростью, равной $\sqrt{2E} - (0)$. Амплитуда колебаний равняется

удвоенному положительному корню уравнения $E = (R)$. Для реалистических моделей галактик такой корень единственен.

Если же $v_R = 0$, то орбита будет круговой (звезда совершает *ротации*). В 1954 г. греческий астроном Георгиос Контопулос доказал, что для сферических гравитирующих систем круговые орбиты являются устойчивыми. Это означает, что если в начальный момент, скажем, скорость v_R не нуль, а мала, то звезда будет совершать малые колебания относительно окружности. Из устойчивости вытекает следующее свойство орбит: при заданных значениях интеграла энергии E или интеграла площадей h существует единственное расстояние от центра, на котором возможно круговое движение с этим значением интеграла.

Если мы рассмотрим движения в экваториальной плоскости сплюснутой галактики, то оказывается, что во внутренних частях круговые орбиты также устойчивы. Однако на далекой периферии сильно сплюснутых систем круговые орбиты неустойчивы, что установил Б. Линдблад в 1927 г. Эта неустойчивость послужила для него исходным пунктом ранней теории спиральной структуры.

Орбиты, близкие к круговым, называются *эпициклическими* (в связи с этим названием вспомним систему мира Птолемея с деферентами, эпициклами и эквантом). Они играют важную роль во многих теоретических исследованиях по звездной динамике. Наглядно такую орбиту можно представить следующим образом. Рассмотрим точку P (называемую *ведущим центром*), равномерно обращающуюся по круговой орбите радиуса R_c . Тогда во вращающейся системе координат, в которой ведущий центр неподвижен (рис. 3.17), орбита выглядит как эллипс («кориолисов кружок»). Можно записать, что

$$R - R_c = a \sin \kappa(t - t_0),$$

где a — амплитуда эпициклических колебаний, а величина κ называется *эпициклической частотой*. Одна из полуосей эллипса, очевидно, равна a . Доказывается, что вторая полуось — $(2a\omega/\kappa)$, где $\omega = V_c/R_c$ — круговая частота на расстоянии R_c .

По современным данным, в галактической окрестности Солнца $\omega = 27,2 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпк})$, а $\kappa = 36,7 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпк})$. Соответствующие перио-

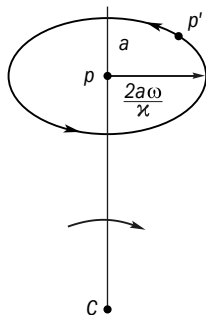


Рис. 3.17. Эпициклическое движение во вращающейся системе отсчета.

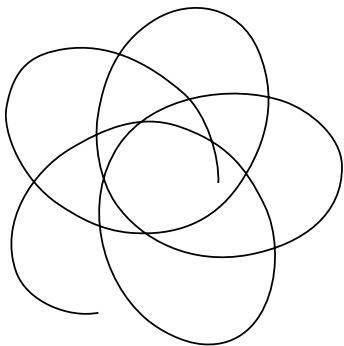


Рис. 3.18. Орбита частицы в поле с силой $F \propto r^{-1,5}$ (Сурдин, 2009).

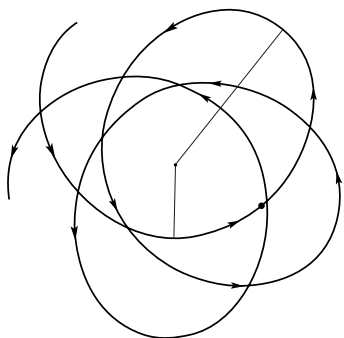


Рис. 3.19. Орбита звезды GC 15252 в экваториальной плоскости Галактики (по Г.А. Малашидзе). В качестве модели Галактики использована изохронная модель Энона. Два радиуса-вектора указывают перигалктий и апогаликтий орбиты.

ды составляют $2 / \kappa = 2,3 \cdot 10^8$ лет и $2 / \mu = 1,7 \cdot 10^8$ лет. Примечательно, что в Галактике $\mu \approx \text{const}$ (т. е. эта величина почти постоянна на разных расстояниях от центра Галактики).

Обозначим через σ_R^2 и σ^2 дисперсии остаточных скоростей v_R и $v - V - V_c$. Из теории эпициклических орбит вытекает, что

$$\frac{\sigma_R^2}{\sigma^2} \approx \frac{2}{\kappa},$$

т. е., в отличие от атомов в газе, распределение скоростей звезд в галактическом диске должно быть анизотропным (иррегулярными силами здесь пренебрегаем). Это соотношение называют *формулой Линдблада*. Оно подтверждается данными наблюдений для большинства плоских подсистем Галактики. Поэтому можно предположить, что звезды этих подсистем движутся по орбитам, близким к эпициклическим.

В общем случае звездные орбиты представляют собой наложение либраций вдоль галактического радиуса (относительно круговой орбиты) и ротации вокруг центра (рис. 3.18 и 3.19). Каждое из этих движений характеризуется своим периодом. Для эпициклических орбит они, очевидно, равны $2 / \kappa$ и $2 / \mu$.

Если отношение этих периодов рационально, то орбита будет замкнутой. Вышеупомянутый математик Бертран доказал, что все (с $E < 0$) орбиты будут замкнутыми только для двух случаев: при движении в поле точечной массы и для движений внутри однородного эллипсоида. Во всех других случаях отношение периодов может лишь случайно оказаться рациональным при исключительных начальных условиях. В общем же случае орбиты незамкнуты и плотно заполняют кольцо. Такие орбиты называют *розовыми*. Численные расчеты для нашей Галактики

показывают, что при начальных скоростях v_R до 30 км/с эпициклическое приближение остается удовлетворительным.

Каким может быть выражение для потенциальной энергии (R) ? Оно зависит от распределения плотности вещества в галактике, которое обычно представляют в виде некоторой, как правило, аналитической модели. Предлагалось много разных моделей галактик; мы кратко остановимся лишь на нескольких из них.

Долгое время для шаровых скоплений принималась модель Шустера—Пламмера. Двойное название объясняется тем, что в 1883 г. английский физик А. Шустер предложил ее для описания внутреннего строения звезд (как гравитирующих газовых шаров), а Королевский астроном Ирландии Г. Пламмер применил ее в 1911 г. к шаровым скоплениям (которые тоже рассматривались тогда как шары «газа», «молекулами» которого служат звезды). В модели Шустера—Пламмера плотность

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(1 + r^2/r_0^2)^{5/2}}.$$

Здесь и далее r_0 , ρ_0 — параметры модели. Тогда

$$\Phi(r) = -\frac{\rho_0}{(1 + r^2/r_0^2)^{1/2}}.$$

Тартуский астроном Григорий Григорьевич Кузмин в 1954 г. показал, что аналогичная функция $\Phi(R)$ применима к сильно сплюснутым галактикам.

В 1959 г. французский теоретик Мишель Энон предложил сферическую модель, для которой

$$\rho(r) = \frac{2\rho_0}{1 + \sqrt{1 + r^2/r_0^2}}.$$

Казалось бы, отличие от модели Шустера—Пламмера невелико. Но в последней плотность убывает на периферии как r^{-5} , а в модели Энона — как r^{-4} . Энон пришел к своей модели, решая следующую теоретическую задачу: найти силовое поле, в котором (как и в поле тяготения точечной массы) период обращения частиц, вылетевших из одной точки со скоростями, равными по величине, но различными по направлению, один и тот же. Можно было бы думать, что задача представляет чисто академический интерес. Оказалось, однако, что построенная Эноном *изохронная* модель часто лучше описывает реаль-



Рис. 3.20. Г. Г. Кузмин.

ные скопления, чем модель Шустера—Пламмера, а выражение для (R) можно с успехом использовать и для галактик.

Г. Г. Кузмин и его ученики Ю.-И. К. Велтманн и Г. А. Мала-сидзе в 1969–1973 гг. нашли семейство обобщенно-изохронных моделей, включающих как частные случаи модель Энона, а также модель Шустера—Пламмера. Все плоские орбиты в этом семействе выражаются сравнительно просто (через эллиптические функции).

Особый интерес представляет модель, которую авторы назвали «предельной» для данного семейства. В ней

$$(r) \quad \frac{0}{1 - r/r_0}$$

(т. е. на больших расстояниях получается притяжение точечной массы), а плотность

$$(r) \quad \frac{0}{(r/r_0)(1 - r/r_0)^3}.$$

В 1990 г. эту модель вновь открыл в США Л. Хернквист. Он показал, что на основе данной модели можно аппроксимировать ход поверхностной яркости в галактиках (так называемый профиль де Вокулёра). Сейчас эту модель нередко используют для представления плотности темного гало галактик.

3.7. Пространственные орбиты звезд

До сих пор обсуждались только орбиты в экваториальной плоскости галактик. Исследование пространственных орбит — значительно более трудная задача динамики, и большинство известных свойств таких орбит было выявлено в результате численных расчетов орбит, выполнявшихся с конца 1950-х гг. сначала Г. Контопулосом, А. Оллонгреном (Нидерланды), а затем многими другими.

Будем по-прежнему предполагать ротационную симметрию системы. Введем цилиндрические координаты R, ϕ, z , причем на этот раз удельная потенциальная энергия звезды $\Phi = \Phi(R, z)$. Интеграл энергии по-прежнему справедлив и записывается в форме

$$E - \frac{1}{2}(\nu_R^2 + \nu^2 + \nu_z^2) = (R, z),$$

где ν_z — компонент скорости звезды в направлении оси z . Существует и интеграл площадей $h = R\nu$. Знание этих двух интегралов позволяет ограничить область возможных движений звезды трубкой (поверхностью нулевых скоростей), уравнение которой имеет вид:

$$(R, z) = \frac{1}{2} \frac{h^2}{R^2} - E.$$

Для более наглядного представления движений строится так называемая *сопутствующая плоскость* R, z . Пересечение ее с поверхностью нулевых скоростей дает овал, внутри которого будет точка, изображающая звезду с данными значениями интегралов E, h .

По результатам численных расчетов получается, что наряду с интегралами энергии E и момента импульса h чаще всего существует еще один, третий интеграл движения I_3 . Действие интеграла проявляется, в частности, в том, что орбиты «прижимаются» к экваториальной плоскости, т. е. возникает препятствие выравниванию энергий движений в плоскости $z = 0$ и перпендикулярно к ней. При движении в поле однородного эллипсоида этот интеграл легко записать в явном виде. Действительно, в этом случае

$$(R, z) = Q_0^2 - \frac{1}{2}Q_R^2 R^2 - \frac{1}{2}Q_z^2 z^2.$$

Тогда колебания звезды по R и по z происходят независимо, и для движений по z существует свой интеграл энергии

$$I_3 = \frac{1}{2}\nu_z^2 - \frac{1}{2}Q_z^2 z^2,$$

равный сумме кинетической и потенциальной энергий колебаний по z . Отсюда следует, что частота колебаний звезды в вертикальном направлении равна Q_z , а амплитуда колебаний

$$z_m = (2I_3)^{1/2}/Q_z,$$

т. е. зависит только от I_3 . На сопутствующей плоскости звезда плотно зачерчивает прямоугольную область — «ящик» (рис. 3.21).

Широкий класс более реалистических моделей галактик, для которых можно записать явное выражение для третьего интеграла, в 1954 г. нашел Г. Г. Кузмин. Для этих моделей орбита заполняет на сопутствующей плоскости «ящик», ограниченный двумя гиперболами и двумя эллипсами (рис. 3.22). Такими же являются орбиты в извест-

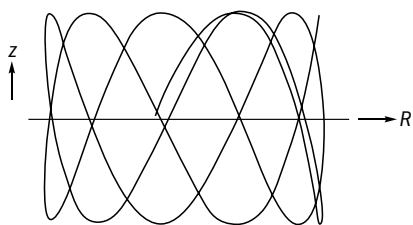


Рис. 3.21. Ящикообразная орбита в проекции на сопутствующую плоскость.

Кузмина перед прочими. Контопулос и другие специалисты по звездной динамике разрабатывали методы приближённого нахождения третьего интеграла в общем случае, причем их теоретические результаты оказались в хорошем согласии с результатами численных расчетов.

Выяснилось, однако, что природа слишком сложна даже для современных теоретиков (вспоминается приведенное выше высказывание Шагина). В ходе численных экспериментов обнаружили орбиты, для которых не существует третьего интеграла: поведение таких орбит хаотично и в принципе непредсказуемо (рис. 3.23). Существования хаотических орбит можно было ожидать на основе теории Колмогорова—Арнольда—Мозера, являющейся самым выдающимся достижением современной динамики. Поскольку даже основы этой теории весьма сложны, мы ограничимся очень грубым описанием двух из числа возможных механизмов хаотизации орбит. Оба они связаны с резким изменением силового поля вдоль орбиты звезды.

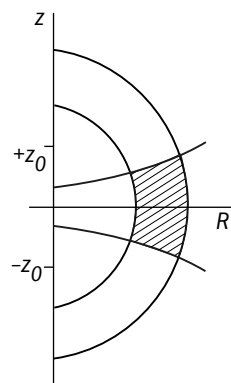


Рис. 3.22. Область, заполняемая орбитой на сопутствующей плоскости, в случае моделей Г. Г. Кузмина.

ной в небесной механике задаче двух неподвижных центров, которую решил еще Л. Эйлер. С конца 1950-х гг. она используется для моделирования движения спутников в поле геопотенциала. Однако этот класс охватывает далеко не все мыслимые модели звездных систем, и не видно каких-либо физических преимуществ моделей

Сначала рассмотрим модель несферической галактики с резко выраженным ядром. Пусть звезда подлетает к ядру по упорядоченной орбите. Тогда ядро «перекидывает» звезду на другую орбиту, и так происходит при каждом приближении звезды к ядру. Получается, что звезды хаотически блуждают между различными упорядоченными орбитами.

Теперь рассмотрим модель галактики, у которой резко выделяется плотная экваториальная плоскость. Г. Г. Кузмин в 1956 г. описал следующую модель гравитирующего диска. Находясь

выше диска, звезда движется по кеплеровскому эллипсу, как если бы на нее действовала точечная масса, расположенная под плоскостью диска. После пересечения плоскости на звезду как бы действует другая точечная масса, расположенная на этот раз выше плоскости. Таким образом, орбита состоит из дуг эллипсов. В то же время орбита остается упорядоченной. Для данной модели существует третий интеграл. В 2001 г. А. Толайн рассмотрел немного более сложную модель и обнаружил, что когда орбиты становятся хаотическими, происходит случайное перескакивание с одного кеплеровского эллипса на другой. В 2005 г. К. Хантер заменил в этой модели бесконечно тонкий диск на диск конечной толщины. Свойство хаотизации орбит при этом сохранилось.

К счастью или нет, но при движении в ротационно-симметричном поле хаотические орбиты, по-видимому, редки. Ситуация меняется, если мы рассмотрим трехосные модели галактик. Г. Г. Кузмин в 1973 г. показал, что возможны трехосные невращающиеся модели звездных систем. Для моделей Кузмина существовало три интеграла движения, которые можно было выписать в явном виде. В 1970–1980-е гг. астрономы пришли к заключению, что большинство эллиптических галактик является трехосными, и резко возрос интерес к построению таких моделей. Были построены более сложные модели трехосных галактик, и оказалось, что для них доля хаотических орбит является заметной, что приводит к принципиальным трудностям при моделировании таких систем.

3.8. Теорема вириала

В XIX в. Ж.-Л. Лагранж и К. Г. Якоби вывели для системы N гравитирующих тел соотношение, связывающее кинетическую энергию, потенциальную энергию и момент инерции. Из него вытекает, что для стационарных систем выполняется равенство

$$2K + W = 0,$$

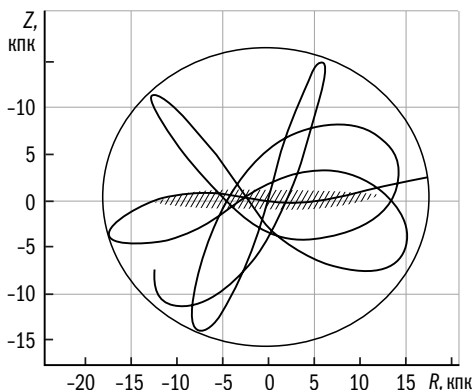


Рис. 3.23. Хаотическая орбита. Заштрихован диск галактики.

где $K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i v_i^2$ — кинетическая энергия, $W = -G \sum_{i,j}^N m_i m_j / r_{ij}$ — потенци-

альная энергия (m_i — масса i -го тела, r_{ij} — расстояние между i -м и j -м телами). Это соотношение выражает *теорему вириала* для гравитирующих систем. Немецкое название *Virial* происходит от латинского *vires*, множественного числа от *vis* — сила. Его дал немецкий физик Р. Клаузиус для аналогичного (более общего) соотношения, выведенного им в теории газов. К звездным системам теорему вириала первыми применили А. Пуанкаре и А. С. Эддингтон 100 лет назад.

Теорема вириала имеет ряд важных следствий. Сначала покажем, что ее можно использовать для оценки масс таких гравитирующих систем, как, например, скопления галактик. Для простоты будем считать, что система не вращается. Тогда

$$K = \frac{1}{2} M \sigma^2,$$

где M — масса системы, σ^2 — средняя по системе дисперсия скоростей. Из соображений размерностей можно записать, что потенциальная энергия

$$W = -GM^2/L,$$

где L можно рассматривать как характерный размер системы. Для однородного шара радиуса r легко найти, что $L = (5/3)r$, а если система обладает массивным ядром малых размеров, то и L мало. Получаем, что $M^2 = GM^2/L$, т. е. масса системы

$$M = L \sigma^2 / G.$$

Измеряя лучевые скорости галактик, входящих в скопление, можно оценить σ^2 (с ошибкой в два-три раза, поскольку мы знаем только лучевые скорости, а анизотропия распределения скоростей неизвестна). Зная угловой диаметр скопления и расстояние до него (например, по закону Хаббла), мы сможем оценить L (также с не очень высокой точностью). Тогда по приведенной выше формуле оценивается масса скопления, которая называется *вириальной массой*.

В 1930-е гг. Ф. Цвикки первым пытался определить массы скоплений галактик. Он нашел, что вириальные массы существенно — на порядки величин! — больше, чем можно было бы ожидать, просуммировав массы галактик, входящих в скопление. Многочисленные последующие исследователи пришли к тому же результату. В этом состоит, как стали говорить, *вириальный парадокс*.

Предпринимались разнообразные попытки устранить этот парадокс. Например, пусть на данное скопление случайно проецируется несколько галактик, не принадлежащих скоплению. Тогда ошибка, которую мы совершим при подсчете кинетической энергии, причислив к скоплению эти случайно проецирующиеся галактики, будет значительной. Но даже учет подобных эффектов не помог устранить превышение K над $|W|$ на несколько порядков.

Некоторые авторы предлагают «подправить» ньютоновский закон гравитации для больших расстояний, и тогда изменится соотношение между кинетической и потенциальной энергиями. С этой целью израильский физик М. Милгром разработал теорию, получившую название МОНД (модифицированная ньютоновская динамика). К ней склоняется ряд видных специалистов по динамике звездных систем, но физики в подавляющем большинстве не признают эту теорию.

Наиболее перспективными казались два пути решения вириального парадокса. Первый из них состоял в следующем. Мы предполагали, что исследуемая система стационарна. Но если она нестационарна, например распадается, то теорема вириала вообще неприменима. Такова была точка зрения В. А. Амбарцумяна (а ранее такую возможность обсуждал Ф. Цвикки). Но если для некоторых неправильных групп галактик существенную нестационарность еще и можно было бы принять, то для таких правильных скоплений галактик, как в Волосах Вероники, нестационарность маловероятна. К тому же компьютерные расчеты для небольших групп гравитирующих тел с отрицательной энергией показали, что отклонения от вириального равновесия в среднем достигают лишь нескольких процентов.

Подавляющее большинство авторов принимает сейчас другое объяснение вириального парадокса. Если большая часть массы скоплений галактик содержится не в виде галактик, а в форме, непосредственно не наблюдаемой, то потенциальную энергию мы оцениваем неправильно. Поэтому из вириального парадокса мы выводим, что подавляющая часть вещества скоплений содержится в форме *темного вещества*, которое называют также *темной материей* или *скрытой массой*. Такое же заключение по другим основаниям (по форме кривой вращения) делается и для отдельных галактик (см. раздел 7.6). Подробнее темное вещество и его связь с космологией и *темной энергией* обсуждается в работах по космологии.

Вернемся к теореме вириала. У стационарной системы сохраняется ее энергия: $K + W = E = \text{const}$. Отсюда следует, что у стационарных

гравитирующих систем сохраняются как кинетическая, так и потенциальная энергии:

$$K = -E = \text{const}, \quad W = 2E = \text{const}.$$

Для невращающихся систем отсюда получаем, что

$$E = \frac{1}{2} M \bar{v}^2.$$

Выше мы писали, что для гравитирующего газа $\bar{v}^2 = kT/m$. Будем рассматривать звездную систему как «газ», «молекулами» которого являются звезды с массами m , а «температура» T связана с дисперсией скоростей этим соотношением. Тогда

$$E = -(M/2m)kT = -\frac{1}{2}NkT.$$

Рассмотрим два равновесных состояния системы, с энергиями E_1 и $E_2 = E_1 + \Delta E$ и температурами T_1 и $T_2 = T_1 + \Delta T$. Тогда

$$\Delta E = -\frac{1}{2}Nk \Delta T$$

$$\text{и} \quad \Delta E / \Delta T = -\frac{1}{2}Nk < 0.$$

Величина $\Delta E / \Delta T$ называется *теплоемкостью*. Как видим, для гравитирующих систем теплоемкость отрицательна — парадоксальный результат с точки зрения классической термодинамики. В конечном счете именно отсюда следует успокоительный для нас вывод, что в мире гравитации «тепловая смерть» невозможна.

Теперь рассмотрим вращающуюся галактику. Скорость i -й звезды $\mathbf{v}_i = \mathbf{V}_i + \mathbf{v}_i$, где $\mathbf{V}_i$ — скорость центроида в той точке, где находится звезда, $\mathbf{v}_i$ — остаточная скорость. Если галактика вращается твердотельно, то $\mathbf{V}_i = R_i \boldsymbol{\omega}$, где R_i — расстояние до оси вращения, а $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость. Тогда кинетическая энергия

$$K = \sum_{i=1}^N m_i (R_i \boldsymbol{\omega} + \mathbf{v}_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i R_i^2 \omega^2 + \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i^2 + \boldsymbol{\omega} \sum_{i=1}^N m_i R_i \mathbf{v}_i.$$

Последнее слагаемое обращается в нуль (по определению остаточной скорости). Поэтому

$$K = \frac{1}{2} M \bar{v}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i R_i^2 \omega^2.$$

Величина $J = \sum_{i=1}^N m_i R_i^2$ называется моментом инерции относительно оси, и она зависит от распределения массы в системе. Итак,

$$M^2 + J^2 = -W.$$

Тогда

$$J^2 < (-W)/J.$$

Таким образом, мы вывели ограничение на угловую скорость твердотельно вращающихся стационарных систем. Качественно ясно, что стационарные системы не могут вращаться сколь угодно быстро, иначе они развалились бы под действием центробежной силы. В 1885 г. А. Пуанкаре получил верхний предел для угловой скорости в результате довольно сложных рассуждений, а затем этот предел уточняли другие авторы. Данный выше элементарный вывод ограничения для J^2 нашел в 1957 г. основоположник отечественной звездной динамики Кирилл Федорович Огородников. Это неравенство можно уточнить, а также обобщить на нетвердотельно вращающиеся системы.

3.9. Время релаксации

До сих пор мы ничего не говорили об иррегулярных силах в звездных системах. Играют ли они хоть какую-нибудь роль? Исходя из выражения для параметра Агекияна, мы заключили, что в системах большого числа гравитирующих тел иррегулярные силы малосущественны. Но все же в реальных системах они действуют и рано или поздно проявляют себя. Каково характерное время их действия и какие изменения в системе они могут вызвать?

Наибольший вклад в создание классической теории иррегулярных сил внесли известные астрофизики Джеймс Джинс (Англия) и Субраманьян Чандрасекар, индеец по происхождению, работавший в основном в США. Они нашли, что иррегулярные силы существенно проявляют себя за время

$$t_r = \frac{3}{4 \sigma^2 G^2 m^2 n}.$$

Его называют *временем релаксации*. Здесь σ^2 — дисперсия остаточных скоростей, m — масса звезды, n — число звезд в единице объема. Величина t_r учитывает влияние далеких сближений звезд. Обычно полагают $t_r \propto \ln N$, где N — число тел в системе. При выводе этого выра-

жения для времени релаксации предполагалось, что массы всех звезд одинаковы.

По прошествии времени релаксации распределение скоростей должно становиться изотропным максвелловским, по крайней мере приближаться к нему. В сферических системах устанавливается так называемый изотермический ход плотности. Формула для него не выражается через элементарные функции, но, исключая центральные области, можно с хорошей точностью считать, что $\rho(r) = \rho_0(r_0/r)^2$. В системах с ненулевым моментом количества движения вращение должно становиться твердотельным, $\omega(r) = \text{const}$ (Л. Э. Гуревич, 1954; К. Ф. Огородников, 1957). Численные расчеты показали близость хода плотности к наблюдаемому закону де Вокулёра. В нашей Галактике даже в центральных частях вращение определенно не является твердотельным, а распределение скоростей анизотропно, так что релаксация еще не произошла. Но наблюдаемое шварцшильдовское распределение скоростей имеет такую же форму, что и максвелловское, и, казалось бы, должно устанавливаться в результате релаксации.

Введем безразмерный параметр $\eta = V/v$ (где V — типичная скорость вращения). В зависимости от его величины можно судить о том, какие движения преобладают в системе: упорядоченные (вращение) или остаточные. Для Галактики $\eta \approx 10$. Считая, что справедлива теорема вириала, легко найти, что

$$\frac{t_r}{t_g} \approx \frac{1}{3} \frac{1}{(1 - \eta^{-2})^{3/2}} \frac{N}{\ln N} \gg 1.$$

В этой формуле t_g — введенное ранее время пересечения, т. е. характерное время изменения системы под действием регулярных сил. Отсюда для Галактики $t_r \approx 10^{-5} N t_g \approx 10^6 t_g$, т. е. $t_r \approx 10^{14}$ лет. Итак, время релаксации для Галактики оказалось практически бесконечным, на несколько порядков превышающим ее возраст. Поэтому если опираться на теорию Джинса—Чандрасекара, то следует признать роль иррегулярных сил совершенно пренебрежимой. Тогда естественно считать, что нынешнее состояние Галактики отражает в основном условия ее формирования.

Для шаровых скоплений $t_g \approx 10^6$ лет, $t_r \approx 10^8$ лет. Для карликовых галактик $t_g \approx 10^8$ лет, $t_r \approx 10^{11}$ лет, а для сферических скоплений галактик $t_g \approx 10^{10}$ лет, $t_r \approx 10^{13}$ лет.

В практической бесконечности времени релаксации К. Ф. Огородников (1957) увидел парадокс классической звездной динамики. Действительно, и с современной точки зрения представляется маловероят-

ным, что в ходе формирования и эволюции Галактики с ней не произошли статистически необратимые изменения. Требуется объяснить, почему плотность галактик следует закону де Вокулёра, а поверхностная плотность галактических дисков падает экспоненциально.

Профиль де Вокулёра получился и во многих компьютерных экспериментах. Выше упоминалась зависимость дисперсии скоростей звезд от возраста. Еще Ф. Цвикки нашел, что ход плотности в богатых скоплениях галактик близок к изотермическому. В 1990-е гг. был выполнен ряд численных экспериментов, в которых исследовалась эволюция системы N гравитирующих тел (Г. Кандруп в США и др.). Они показали, что эволюция таких систем действительно является статистически необратимой, хотя надежно определить время, за которое проявляется необратимость, не удалось. За последние 50 лет обсуждался ряд возможных путей решения парадокса классической теории релаксации. Условно их можно разбить на три группы.

Во-первых, существенным может оказаться взаимодействие звезд с массивными объектами, т. е. эффективным может оказаться рассеяние на массивных объектах. Можно показать, что тогда время релаксации

$$t_r \sim \frac{A}{m_c^2 n_c},$$

где m_c — масса рассеивателей, n_c — их число в единице объема, а величина A практически такая же, как при релаксации в результате звездно-звездных сближений. Подбирая m_c и n_c , можно получить любое заранее заданное время релаксации.

Вычисляя, как меняется функция распределения скоростей звезд при рассеянии на массивных объектах, Л. Спитцер и М. Шварцшильд (1951) нашли увеличение дисперсий скоростей с возрастом в согласии с данными наблюдений. Л. Э. Гуревич (1954) и Г. Г. Кузмин (1961) разработали более детальную теорию, предполагая, что массивные рассеиватели лежат в галактической плоскости и движутся по круговым орбитам. Они показали, что распределение скоростей становится анизотропным. По Кузмину, для отношения σ_R/σ_z справедлива приводившаяся выше формула Линдблада, а $(\sigma_R/\sigma_z)^2 = 1 + (\sigma_R/\sigma_z)^2$. Последняя формула согласуется с данными наблюдений.

Казалось бы, парадокс релаксации решен, по крайней мере для плоских подсистем. Но остался открытым основной вопрос: что это за «массивные объекты», взаимодействие с которыми приводит к увеличению дисперсий скоростей. До середины 1970-х гг. ясного ответа не было. После открытия гигантских молекулярных облаков появилась надежда,

что искомые рассеиватели наконец найдены. Было опубликовано много работ, в которых вновь исследовалась проблема релаксации. К сожалению, оказалось, что при массах и численности реальных облаков рассеяние на них происходит все же слишком медленно. Выявились и другие затруднения теории. Поэтому рассматривалось и рассеяние звезд на гипотетических объектах, таких как черные дыры гало Галактики и темные скопления, состоящие из «юпитеров», но по разным причинам и от этих объяснений пришлось отказаться.

Еще в 1960-е гг. высказывалось предположение, что дисперсия скоростей звезд может увеличиваться в результате воздействия спиральных рукавов. В 1980-е гг. Дж. Селвуд (США) и др. детально исследовали такую возможность. При этом приходилось предполагать, что спиральные ветви случайным образом появляются, а затем расплываются в диске Галактики. Одна из трудностей этой теории состоит в том, что рассеяние звезд на спиральных рукавах, лежащих в галактической плоскости, не приводит к увеличению остаточных скоростей звезд в вертикальном направлении, т. е. росту σ_z . Поэтому наиболее правдоподобным считается комбинированное действие гигантских молекулярных облаков и спиральных рукавов.

Второй подход к решению парадокса классической звездной динамики сводится к ревизии теории Джинса—Чандрасекара. Эта теория строилась по образцу кинетической теории газов (вклад в которую внес и молодой тогда физик Дж. Джинс). Но в газе силы взаимодействия молекул очень быстро спадают с расстоянием между молекулами, и основные качественно верные результаты можно получить, рассматривая молекулы как упруго соударяющиеся шары конечного размера. Главное — что в газе нет регулярных сил, если только нет внешних воздействий. Иное дело — система гравитационно взаимодействующих звезд. В ней регулярные силы можно рассматривать как внешнее воздействие, ускоряющее эволюцию. Рассмотрим, например, каплю краски в стакане воды. В результате диффузии капля будет постепенно расплываться. Если же помешивать воду ложкой, то этот процесс заметно ускорится. Регулярные силы играют такую же роль, как помешивание ложкой.

Идея такого подхода (развивавшегося И. Л. Генкиным в Алма-Ате) ясна и не может вызвать принципиальных возражений. Однако построить на его основе признанную количественную теорию пока не удалось. Интересный результат опубликовали недавно А. С. Расторгуев и В. Н. Семенцов (МГУ). Пусть τ — время, за которое начинают становиться заметными стохастические явления (конечно, оно меньше,

чем время релаксации). Оказалось, что если не учитывать тесные сближения звезд, то отношение σ/t_g меняется пропорционально $N^{1/5}$, т. е. слабо зависит от числа звезд. Этот вывод качественно согласуется с результатами численных экспериментов.

3.10. Бесстолкновительная релаксация

Описанные выше подходы вполне традиционны. Но в 1960-е гг. в динамике звездных систем появилось новое направление: к гравитирующим системам стали применять методы, разработанные в физике плазмы. Среди пионеров нового подхода были Д. Линден-Белл в Англии и Л. С. Марочник и М. Н. Максумов в СССР. В русле этих исследований появилось понятие *бесстолкновительной релаксации в звездных системах*, заимствованное из теории плазмы. Основная идея ее состоит в следующем: надо отказаться от представления о том, что действие регулярных сил приводит только к эволюции, однозначно определяемой начальными условиями. Развившаяся как раз в это время концепция детерминированного хаоса, или стохастической неустойчивости нелинейных колебаний (восходящая к гениальным догадкам А. Пуанкаре), показала, что в большинстве систем, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, малые изменения в начальных условиях могут привести к непредсказуемым последствиям. Исходные уравнения могут быть обратимыми во времени, и для них может выполняться упоминавшийся выше принцип пространственно-временной симметрии. Но наблюдатель, располагающий микроскопом лишь конечной разрешающей силы, сделает вывод, что в системе произошла необратимая эволюция.

Применяя эти общие соображения к динамике галактик, в первую очередь вспомним, что пространственные орбиты могут быть хаотическими. Если бы большинство орбит в галактиках были такими, то действительно произошла бы своего рода релаксация, которая привела бы к выравниванию плотности и распределения скоростей. Численно подобные процессы исследовали Д. Пфеннигер (Швейцария), Г. Кандруп и др. Вполне возможно, что эти процессы заметны в трехосных эллиптических галактиках и спиральных системах типа SB. Но такая релаксация, по-видимому, не играет большой роли в динамике галактик, обладающих в первом приближении ротационной симметрией, так как в них доля хаотических орбит, вероятно, очень мала.

Сглаженное гравитационное поле звездных систем не было неизменным в течение всего времени их существования. Не является в

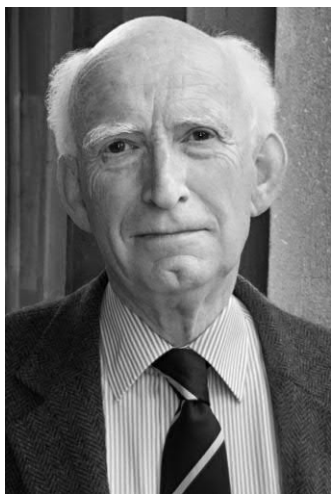


Рис. 3.24. Дональд
Линден-Белл.

точности стационарным оно и сейчас. Например, одним из источников постоянной нестационарности могут быть внешние воздействия от других галактик, которые следует считать случайными. Каждая звезда, двигаясь под действием регулярной силы, постоянно испытывает случайные толчки. Накопление таких толчков дестабилизирует систему и в конечном счете также приводит к бесстолкновительной релаксации. Внешние воздействия, а также разнообразные внутренние процессы приводят к возбуждению колебаний собственного гравитационного поля системы, также случайным образом искажающих звездные орбиты. К сожалению, детали по-

добных процессов пока плохо изучены.

Изложение современных представлений о происхождении и ранней эволюции галактик не входит в нашу задачу. Существенно лишь то, что в прошлом регулярные силы в галактиках испытывали сильные пространственно-временные изменения, которые могли быть случайными. Плотность и распределение скоростей подверглись при этом значительным необратимым изменениям, которые в конце концов за время порядка t_g привели к наблюдаемой структуре галактик. Дональд Линден-Белл (1967) назвал этот процесс *бурной релаксацией* (violent relaxation). Он построил статистическую механику бурной релаксации, представляющую значительный общенаучный интерес. По Линден-Беллу, если бы бурная релаксация завершилась, то устанавливалось бы не максвелловское, а ферми-дираковское распределение скоростей, известное в квантовой теории. Кстати, в Галактике распределение скоростей звезд отклоняется от максвелловского (шварцшильдовского), по-видимому, скорее в противоположную сторону (Р. Б. Шацова). Общие качественные соображения и численные эксперименты приводят к заключению, что бурная релаксация оказывается тем более полной, чем сильнее начальная нестационарность, а при слабой нестационарности оказывается незавершенной. В теории бурной релаксации остается ряд нерешенных вопросов. Характерно название сравнительно недавней статьи Д. Линден-Белла с соавтором: «О несостоятельности теорий бурной релаксации». С астрономиче-

ской точки зрения важнейшей является следующая проблема: какое конкретное физическое явление приводит к бурной релаксации.

Резюмируя, можно заключить, что в истории нашей Галактики и других звездных систем, несомненно, произошли необратимые изменения, но конкретизировать это утверждение мы пока не можем.

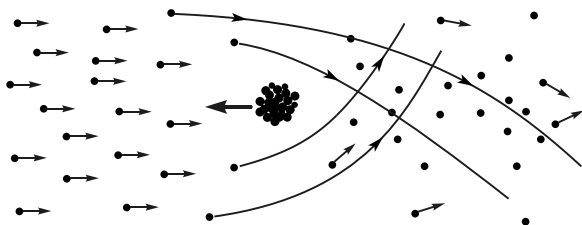
3.11. Динамическое трение

Иррегулярные силы могут проявляться не только непосредственно. Важным является эффект, получивший название *динамическое трение*. Его открыл в 1943 г. С. Чандрасекар из несколько формальных соображений. Он показал, что в результате действия иррегулярных сил звезды в среднем замедляются в направлении движения, так как для быстрых звезд более вероятно замедление, а для медленных положительные и отрицательные приращения скорости в направлении движения примерно одинаковы. Наглядно причину динамического трения разъяснили в 1949 г. Т. А. Агемян и в 1950-е гг. — специалисты по физике плазмы.

Пусть массивное тело (будем называть его звездным скоплением) пролетает через среду, заполненную неподвижными маломассивными телами (звездами). Каждая звезда облетает скопление по гиперболической орбите: происходит, как говорят, гравитационная фокусировка — за скоплением тянется плотный шлейф из звезд (рис. 3.25). Этот эффект называют поляризацией, и он является основной причиной динамического трения, если масса скопления много больше массы звезд. Гравитационное воздействие со стороны шлейфа тормозит скопление. В результате на скопление при его движении в Галактике помимо регулярной силы (притяжения со стороны Галактики) действует сила динамического трения, зависящая от скорости.

К чему приводит динамическое трение? Если орбита скопления была мало вытянутой, то в конце концов она станет круговой. Если же орбита является вытянутой (как для шаровых скоплений нашей Галактики), то скопление будет падать к центру Галактики, пополняя население ее ядра (Сурдин, Чариков, 1977).

Рис. 3.25. Динамическое трение. Массивный объект, двигаясь сквозь поле легких объектов, создает за собой их уплотнение, к которому сам и притягивается.



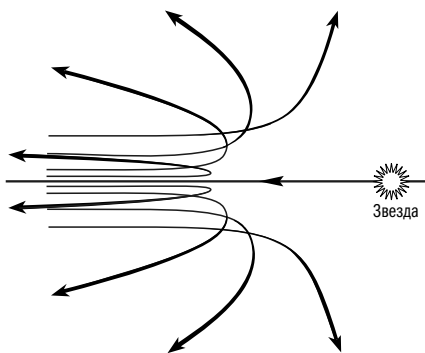


Рис. 3.26. Звезды, сближающиеся с пылевыми облаками, разгоняют пылинки.

Звезды, сближающиеся с пылевыми облаками, разгоняют пылинки. На эту возможность указал Т. А. Агекян в 1949 г.

Звезды же высокой светимости, разгоняющие газопопылевые облака, напротив, ускоряются (Т. А. Агекян, 1950). Причина этого лежит в световом давлении со стороны звезды. Приближаясь к облаку, звезда гонит перед собой частицы. Позади звезды частиц нет, или их мало, а впереди много, и они притягивают звезду (рис. 3.26). Вычисления показывают, что звезда спектрального класса О со скоростью 5 км/с удвоит свою скорость за 10^7 лет. На первый взгляд этот результат может показаться парадоксальным. Уж очень это напоминает человека, который сам себя поднимает за волосы. Однако подсчет баланса энергии и количества движения системы звезда—облако как целого подтверждает сделанный вывод.

3.12. Испарение звезд из скоплений

В рассеянных звездных скоплениях число звезд, как правило, сравнительно невелико, не более 10^3 . Время релаксации для них оказывается порядка 10^6 – 10^7 лет и близко к времени пересечения. Поэтому иррегулярные силы играют существенную роль в динамике таких систем. Напротив, роль внутренних регулярных сил для рассеянных скоплений уменьшается. По-видимому, к рассеянным звездным скоплениям можно применить теорию релаксации Джинса—Чандрасекара, что подтверждают и специальные компьютерные исследования.

Для рассеянных скоплений становится заметным еще одно проявление иррегулярных сил, а именно *диссипация*, или «испарение» звезд из скоплений. Оказывается, что иррегулярные силы не только подводят систему к равновесному состоянию, но сами же это равно-

Динамическое трение испытывает и звезда при прохождении через пылевое облако. При этом существенно, что частицы пыли в шлейфе будут неупруго соударяться и терять энергию. В результате энергия пылинки относительно звезды может стать отрицательной, и она окажется гравитационно связанной с звездой. Таким образом, формально в рамках задачи двух тел может произойти захват массивным телом пылевой частицы.

весие разрушают. Весьма вероятно, что процесс испарения звезд привел к полному разрушению значительной части рассеянных скоплений и даже заметно снизил популяцию значительно более массивных шаровых скоплений Галактики.

Примеры испарения в мире молекул хорошо известны: вода из рек, озер, морей и океанов испаряется, но по человеческим меркам процесс этот происходит крайне медленно. Вода, подогреваемая в чайнике, испаряется много быстрее. Для астрономии важна диссипация атмосфер звезд и планет. К счастью для нас, Земле потеря атмосферы в обозримом будущем не грозит, а вот у Луны атмосферы давно уже нет.

Избежать испарения можно лишь в том случае, если система хаотически движущихся частиц окружена непроницаемыми стенками. Кстати, в некоторых теоретических работах по звездной динамике такие модели исследуются. Но реальные звездные скопления не заключены в контейнеры с отражающими стенками. Поэтому те звезды, которые в результате сближений с другими звездами приобретают скорости, большие, чем скорость отрыва от системы, улетают из нее. Скопление теряет массу и в конце концов разрушается.

Как быстро происходит этот процесс? Для ответа надо оценить долю звезд, диссипирующих из скопления за время релаксации. Первым такую оценку сделал в 1938 г. 29-летний профессор Ленинградского университета, будущий академик В. А. Амбарцумян. Ничего не зная об этом, два года спустя такой же результат получил 26-летний Л. Спитцер, будущий выдающийся американский астроном и физик, член Национальной АН США. Желая оценить долю звезд, покидающих скопление за время релаксации, Амбарцумян и Спитцер рассуждали следующим образом. В каждой точке скопления существует определенное значение скорости отрыва $v_p = [-2 \langle \epsilon \rangle]^{1/2}$. За время релаксации в скоплении устанавливается максвелловское распределение скоростей, в том числе некоторая доля звезд получает скорости $v > v_p$. Это так называемый «хвост» максвелловского распределения. Каждая из таких звезд сразу же, за время пересечения, улетает из скопления. Какова же доля звезд, скорости которых попадают в «максвелловский хвост»? Из теоремы вириала легко найти, что в среднем по системе $v_p = 2$. Если бы скопление находилось в непроницаемом контейнере, в нем установилось бы идеальное максвелловское распределение, «хвост» заполнился бы звездами с $v > v_p$, и их доля от полного числа звезд составила бы 0,0074 (это число легко найти, проинтегрировав распределение Максвелла от 2 до ∞). Открыв контейнер, мы сразу потеряем эти звезды. Но после того как они улетели,

равновесие системы окажется нарушенным. В скоплении снова будет устанавливаться максвелловское распределение скоростей, поэтому через время релаксации его «хвост» вновь заполнится, и т. д. Отсюда следует, что саморазрушение скопления вследствие испарения описывается уравнением

$$\frac{N}{N} = \frac{t}{t_r},$$

где N — число звезд, улетающих (астрономы говорят — диссипирующих) за время t . Можно ожидать, что время полного разрушения скопления будет порядка $t_r/135t_r$.

В 1950 г. значительный вклад в теорию диссипации звездных систем сделали Л. Э. Гуревич и Б. Ю. Левин. Попытаемся воспроизвести вероятный ход их рассуждений. Каждая звезда постоянно испытывает множество слабых воздействий со стороны других звезд системы. Изменение энергии каждой звезды со временем можно считать непрерывным. Когда энергия становится нулевой, скорость звезды оказывается равной скорости отрыва от системы, и звезда улетаёт. Таким образом, можно считать, что в первом приближении из системы диссипируют только звезды с нулевой энергией. В этом случае при диссипации энергия скопления остается неизменной. В то же время, поскольку диссипация — процесс медленный, для скопления справедлива теорема вириала. Тогда, как мы видели, сохраняются по отдельности как кинетическая энергия, так и потенциальная. Из сохранения кинетической энергии вытекает, что при потере массы увеличивает дисперсия скоростей, т. е. при диссипации остаток скопления «разогревается», звезды движутся все быстрее. Из сохранения потенциальной энергии следует, что размер скопления уменьшается, а плотность увеличивается. Нетрудно подсчитать, что время релаксации при этом уменьшается. Вначале медленное, испарение звезд из скопления становится все более быстрым, «лавинным». Гуревич и Левин нашли явные выражения для зависимости числа звезд в скоплении и других его характеристик от времени. Оказалось, что формальное время полного распада системы равно $(2/7)(t_r/) \approx 39 t_r$.

В дальнейшем теорию испарения звездных систем развивали многие авторы. В 1960-е гг. М. Энон получил результат, который показался парадоксальным. Если принять во внимание наличие регулярных сил, то увеличение в среднем энергии звезды означает, что звезда переходит на орбиту, лежащую в более периферийных частях скопления. Но там плотность звезд меньше, следовательно, время релаксации больше, звездные сближения происходят реже, и диссипация

почти прекращается. Можно увидеть в этом «парадоксе Энона» проявление общего принципа Ле Шателье, согласно которому реакция системы на воздействие, которое вывело ее из состояния равновесия, сводится к тому, чтобы нейтрализовать это воздействие.

Согласно Т. А. Агеяну, этот парадокс показывает, что наибольшее значение для испарения звездных систем имеют очень редкие тесные сближения звезд. При этом энергия звезды может сразу увеличиться на большую величину и стать положительной. Такая звезда сразу покинет скопление. Агеян и его ученица И. В. Петровская, а также ряд других исследователей разрабатывали соответствующую теорию, но вследствие больших математических трудностей ее еще нельзя считать завершенной.

Т. А. Агеян в 1962 г. обратил внимание на то, что испарение из сферических скоплений может происходить значительно быстрее, чем по классическим оценкам. Весьма вероятно, что на ранних стадиях эволюции сферических звездных систем орбиты звезд были радиально вытянутыми. Большинство звезд пролетало тогда через плотный центр, где время релаксации существенно меньше, чем в остальных частях системы. Звезды пролетают одна возле другой, взаимодействуют и приобретают скорость, превышающую скорость отрыва. В результате сферическая система с преобладанием сильно радиально вытянутых орбит теряет большую часть своих звезд.

К чему приведут испарение звездных скоплений и другие механизмы их разрушения, на которых мы не будем останавливаться? Некоторое время вдоль орбиты скопления будет двигаться рой звезд, не выделяющихся по плотности, но обладающих близкими скоростями. Затем эти звезды разойдутся по Галактике.

В нашей Галактике в окрестности Солнца свыше ста лет известны так называемые движущиеся скопления (см. главу 5). В качестве примера укажем на поток Большой Медведицы. Некоторые авторы, от С. Росселанда до Т. А. Агеяна, предполагали, что это — остатки распавшихся скоплений. Во всяком случае, такую возможность нельзя исключить, по крайней мере в отношении некоторых из них. Подобные группы звезд были выявлены и в гало Галактики.

3.13. Особенности «звездного газа»

Выше неоднократно указывалось на аналогию между звездной системой, которая рассматривалась как совокупность большого числа гравитирующих точечных масс, и газом, ансамблем молекул или атомов. Понятие «звездный газ» ввел в 1904 г. лорд Кельвин, великий классик

XIX в., а далее его развил А. Пуанкаре в замечательной статье «Млечный Путь и теория газов» (1906).

Динамика звездных систем до сих пор строится на основе этой концепции. Как и в теории газов, основной в звездной динамике является функция распределения звезд по координатам и скоростям $F(\mathbf{r}, \mathbf{v})$, для нахождения которой достаточно знать функцию звездной плотности $\rho(\mathbf{r})$ и функцию распределения скоростей в данной точке $f_{\mathbf{r}}(\mathbf{v})$. Очевидно, что $F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = \rho(\mathbf{r})f_{\mathbf{r}}(\mathbf{v})$.

Существует, однако, значительное различие между «звездным газом» и обычным газом. При обсуждении принципиальных особенностей галактик как «звездного газа» будем для простоты не принимать во внимание пыль, обычный газ и даже «темное вещество». Прежде всего бросается в глаза сильная разреженность «газа» из звезд. Так, в окружающем нас воздухе молекулы азота имеют радиус $3,3 \cdot 10^{-8}$ см, а среднее расстояние между ними — около $3,3 \cdot 10^{-7}$ см. Как видим, оно в среднем лишь в 10 раз больше радиуса самих молекул.

Теперь обратимся к звездам. Радиус Солнца $6,96 \cdot 10^{10}$ см, а расстояние от Солнца до ближайшей к нему звезды Проксима Кентавра $4,07 \cdot 10^{18}$ см, т. е. в $6 \cdot 10^7$ раз больше радиуса Солнца. Мы видим, что отношение, характеризующее степень дискретности, в Галактике в $6 \cdot 10^6$ раз больше, чем в воздухе. Плотность газа обратно пропорциональна кубу среднего расстояния между соседними атомами. Поэтому получаем, что Галактика менее плотна, чем воздух, в $(6 \cdot 10^7/10)^3 \cdot 2,2 \cdot 10^{20}$ раз!

Но еще более существенно для динамики «звездного газа» то, что он является самогравитирующим. Из этого вытекает ряд принципиальных отличий «звездного газа» от обычного газа.

Мы уже рассматривали *испарение* звезд из гравитирующих систем и особенности, которыми оно сопровождается (увеличение плотности и дисперсии скоростей остатка скопления). Этого явления уже достаточно для недостижимости в гравитирующих системах точного статистического равновесия.

Упомянутые выше законы Гуревича—Левина—Хегги выражают другую особенность кинетики гравитирующих систем: «прочные» двойные в звездном поле становятся еще более «прочными». Отсюда следует, что хотя при взаимодействии третьей звезды с парой суммарная энергия трех тел сохраняется, часть ее переходит в кинетическую энергию звезд поля и энергию орбитального движения пары (источником дополнительной кинетической энергии звезд служит гравитационная энергия пары). Поэтому сближение звезды с «проч-

ной» парой можно рассматривать как неупругое столкновение, в отличие от парных сближений. В результате таких взаимодействий эволюция «звездного газа» ускоряется.

Как было сказано выше, иррегулярные силы ведут к установлению максвелловского распределения скоростей, которое нарушается только диссипацией — процессом, обычно на порядок более медленным, чем релаксация. Сомнений в этом не было до 1962 г., когда в «Вестнике Ленинградского университета» появилась статья Вадима Анатольевича Антонова, в то время аспиранта К. Ф. Огородникова. Работа эта была неудачной по форме, она содержала много сложных формул, и, вероятно, большинство читателей не поняло, о чем, собственно, в ней идет речь. Д. Линден-Белл был одним из немногих, оценивших эту статью: он разъяснил ее смысл астрономической и физической общественности. Как выяснилось, В. А. Антонов доказал, что максвелловское распределение скоростей является наивероятнейшим (для сферических систем) только в том случае, когда отношение центральной плотности системы к плотности на периферии не превосходит критическое значение, равное 708,61. В противном случае будет происходить процесс, который Линден-Белл назвал *гравитермической катастрофой*: «горячее» плотное ядро будет становиться все плотнее и «горячее», а наружные части будут «охлаждаться». Таким образом, закон возрастания энтропии приводит для гравитирующих систем к нарушению второго начала термодинамики (в формулировке Клаузиуса). Причина гравитермической катастрофы лежит в том, что теплоемкость гравитирующих систем является отрицательной (что, как мы видели, вытекает из теоремы вириала).

В обычном газе, состоящем из молекул разных масс, в результате столкновений устанавливается *равнораспределение по энергии*. В принципе, то же самое происходит и в гравитирующих системах: действие иррегулярных сил приводит к равенству $m_i \frac{1}{2} \overline{v_i^2} = \text{const}$, где m_i — масса звезд i -й группы, $\frac{1}{2} \overline{v_i^2}$ — дисперсия их остаточных скоростей. Тогда более массивные звезды «оседают» в центре системы, а менее массивные звезды занимают больший объем.

В 1969 г. Л. Спитцер показал, что при слишком большом различии масс звезд равнораспределение по энергии не достигается. Массивные звезды (массы m_2), взаимодействуя с легкими, отдают им энергию (в соответствии с тенденцией к равнораспределению). Скорости звезд уменьшаются, поэтому они двигаются медленнее и в среднем перемещаются к центру системы. Если массивных звезд было много, то такое их перемещение будет означать сжатие системы. Тогда скорости звезд

увеличатся (из теоремы вириала следует, что уменьшение размеров приводит к увеличению дисперсии скоростей). Затем звезды массы m_2 опять отдадут энергию звездам массы m_1 , снова будут сжиматься к центру и еще сильнее увеличат свою энергию. Процесс будет продолжаться и далее. Расчет показывает, что эволюция зависит от значения параметра

$$\frac{M_2}{M_1} \frac{m_2}{m_1}^{3/2},$$

где M_i — суммарная масса звезд массы m_i . Равнораспределение по энергии не наступает, если $\frac{M_2}{M_1} \frac{m_2}{m_1}^{3/2} > 0,16$.

Из других особенностей статистической механики гравитирующих систем назовем *гравивращательную катастрофу*. Она проявляется в том, что на периферии вращающихся систем не устанавливается твердотельное вращение, а, напротив, движение становится всё более дифференциальным.

Анри Пуанкаре в упоминавшейся статье отметил ряд отличий «звездного газа» от идеального и указал, что более правильным было бы сопоставить звездные системы с газом в трубке Крукса. Он имел в виду ионизованный газ, состоящий из электронов и ионов, которые взаимодействуют по закону Кулона, т. е. речь шла о плазме, но в то время это слово физики еще не использовали. Действительно, у динамики звездных систем и у теории плазмы, созданной американцем И. Ленгмюром и советскими физиками Л. Д. Ландау и А. А. Власовым, исходные положения совпадают. «Самосогласованное поле» в плазме — это регулярные силы в гравитирующих системах. Как плазму, так и звездные системы обычно считают бесстолкновительными, а теория столкновительной плазмы строилась (в том числе Л. Спитцером) по образцу теории релаксации Джинса—Чандрасекара.

Основным в динамике звездных систем является уравнение для функции распределения звезд по координатам и скоростям $F(\mathbf{r}, \mathbf{v})$. Это уравнение выражает постоянство F вдоль траектории при движении в регулярном поле. Хотя оно впервые было выведено Дж. Джинсом в 1915 г., чаще всего (с легкой руки самого Джинса) его называют *бесстолкновительным уравнением Больцмана*. Но оно совпадает с основным в теории плазмы уравнением Власова (1938).

Вместе с тем между плазмой и «звездным газом» имеются существенные различия. Если в плазменную среду внести, скажем, положительно заряженный ион, то вокруг него появится облако из электронов. Поэтому притяжение к иону удаленного электрона будет

компенсироваться отталкиванием от электронов облака. Это явление в плазме называется дебаевским экранированием (по имени известного физика П. Дебая). Вследствие этого плазму можно неограниченно надстраивать, почти не изменяя ее локальных свойств.

Напротив, в гравитирующих системах при появлении возмущения будет развиваться джинсовская *гравитационная неустойчивость*, которая в конечном счете ответственна за формирование внутренней структуры в гравитирующих средах, образование галактик, звезд, планет.

3.14. Равновесие звездных систем

Одной из основных задач звездной динамики является построение стационарных моделей звездных систем. Под стационарностью, естественно, подразумевается равновесие в поле регулярных сил, так как при учете иррегулярных сил равновесие, как мы видели, в принципе невозможно. Да и бесстолкновительные системы можно считать равновесными только при пренебрежении внешними полями (воздействием соседей данной системы и общего галактического или метагалактического фона).

Для построения равновесной модели необходимо найти функцию распределения звезд по координатам и скоростям $F(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ и плотность $\rho(\mathbf{r})$. В каждой точке системы должна быть известна потенциальная энергия точки единичной массы $\Phi(\mathbf{r})$. Чаще всего стараются строить *самосогласованные модели*, в которых функция $\rho(\mathbf{r})$ определяется ходом плотности $\rho(\mathbf{r})$ по формулам ньютоновской теории гравитации. В соответствии с бесстолкновительным уравнением Больцмана функция распределения $F(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ постоянна вдоль траектории. Напомним, что такие функции называются *интегралами движения*, и они определяют свойства звездных орбит. Таким образом, $F(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ является интегралом движения. Значит, координаты $\mathbf{r}$ и скорости $\mathbf{v}$ могут входить в F не произвольным образом, а через определенные комбинации — интегралы движения, такие, как интеграл энергии и интеграл момента импульса. Это утверждение известно как *теорема Джинса*, и оно лежит в основе построения пространственно-кинематических моделей звездных систем.

Итак, если для движений в заданном силовом поле известны все интегралы движения, то проблема построения стационарных самосогласованных моделей будет чисто технической. В 1953 г. Г. Г. Кузмин и в 1962 г. Д. Линден-Белл показали, что если орбиты в данном поле, как правило, незамкнуты и плотно заполняют трехмерную область,

то аргументами функции распределения может быть не более трех интегралов. Сильно упрощая, можно сказать, что эти интегралы определяют амплитуды колебаний звезд по трем координатам. Но как быть в случае, когда для части орбит существуют три интеграла (аналитически выразить которые, пусть в сложной форме, можно лишь приближенно), а часть орбит являются хаотическими, причем области хаотического и упорядоченного движения перемешаны? Ясного ответа на этот вопрос до сих пор нет.

Существуют два основных подхода к построению равновесных моделей звездных систем. В первом из них исходной является функция распределения как функция интегралов движения $F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = (I_1, I_2, I_3)$. Из нее находится плотность $\rho(\mathbf{r})$, а затем — поле регулярных сил и $\Phi(\mathbf{r})$. С чисто теоретической точки зрения этот способ может показаться предпочтительным, однако при этом приходится решать довольно сложные нелинейные уравнения.

Можно было бы, например, начинать с шварцшильдовского распределения скоростей. Оказалось, однако, что не существует стационарных самогравитирующих моделей конечной массы, в каждой точке которых скорости распределены по закону Шварцшильда. В частности, сферическая модель с максвелловским распределением скоростей (изотермическая модель, которая упоминалась выше как наименее вероятнейшая) обладает бесконечной массой и бесконечной потенциальной энергией. Айван Кинг (США), а затем и другие авторы несколько «подправили» максвелловское распределение, аппроксимируя решение уравнений, описывающих столкновительную эволюцию сферических звездных систем. Модели Кинга часто используются при исследовании звездных скоплений.

Второй способ состоит в построении самосогласованных моделей по заданному закону пространственной плотности. Наиболее простым является случай сферических систем. И здесь мы сталкиваемся с *проблемой выбора*.

Дело в том, что при заданном ходе плотности возможны различные распределения скоростей. Так, для любой сферической системы можно представить, что орбиты всех звезд — круговые. О такой модели писали в 1928 г. московский математик В. В. Степанов, а спустя десять лет — А. Эйнштейн (в контексте общей теории относительности). В 1916 г. А. С. Эддингтон нашел, как строить самосогласованные модели с изотропным распределением скоростей. В 1979 г. были найдены более общие модели, в которых распределение скоростей в каждой точке является эллипсоидальным, но не шварцшильдовским.

Для таких моделей $F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = (E + \mathbf{M}^2)$, где E — энергия звезды, $\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{v}$ — ее полный момент импульса, а — произвольный параметр, от значения которого зависит анизотропия распределения скоростей. Различные более сложные модели предлагали Ю.-И. К. Велтманн (Тарту), О. Герхард (Гейдельберг) и др. Еще В. В. Степанов и много позднее Т. А. Агекян обсуждали модели с чисто радиальными движениями. Какую же из них выбрать для конкретных реальных систем?

К сожалению, чисто теоретические соображения помочь в этом отношении не могут. Так, модели с круговыми орбитами представляются маловероятными, но четко и вразумительно объяснить, почему, мы не можем и вынуждены ссылаться на неясные космогонические соображения. Только когда у многих звезд в шаровых скоплениях будут известны собственные движения и для большого числа объектов в шаровых скоплениях и сферических скоплениях галактик будут известны лучевые скорости, для построения моделей этих систем можно будет привлечь кинематические данные, и тогда проблема выбора будет решена.

Обратимся теперь к равновесным моделям сплюснутых галактик. Более или менее разработанные методы существуют только для моделей с осью симметрии (осью вращения) при том предположении, что функция распределения зависит только от интеграла энергии $E = \frac{1}{2}(\nu_R^2 + \nu^2 + \nu_z^2)$ (R, z) и от проекции момента импульса на ось вращения $h = R\nu$, т. е.

$$F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = (E, h).$$

Уже из этой формы видно, что такие модели не могут объяснить наблюдаемую в Галактике трехосность эллипсоида скоростей. Действительно, в скорости ν_R и ν_z входят равноправно, через комбинацию $\nu_R^2 + \nu_z^2$. Поэтому дисперсии скоростей ν_R и ν_z одинаковы, $\frac{\sigma_R^2}{R^2} = \frac{\sigma_z^2}{z^2}$. Первые модели звездных систем такого типа строили В. Фрикке (1949) и Г. Г. Кузмин и С. А. Кутузов (1962).

Введем четную и нечетную по скоростям части функции распределения,

$$F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = F_+(\mathbf{r}, \mathbf{v}) + F_-(\mathbf{r}, \mathbf{v}),$$

где

$$F_+(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = \frac{1}{2} [F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) + F(\mathbf{r}, -\mathbf{v})], \quad F_-(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = \frac{1}{2} [F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) - F(\mathbf{r}, -\mathbf{v})].$$

Нечетная по скоростям функция $F_-(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ в принципе не может быть определена по распределению масс. Действительно, эта функ-

ция определяет распределение в системе момента импульса, т. е. то, насколько быстро вращается модель, какие части вращаются быстрее, а какие медленнее. В качестве простейшего примера рассмотрим предельный случай бесконечно тонкого диска. Пусть все звезды движутся в диске по круговым орбитам в одну сторону. Тогда у системы будет максимально возможный момент импульса. Теперь обратим направление движения у половины звезд. Тогда момент импульса станет нулевым. Очевидно, что возможны и промежуточные случаи. Подобные рассуждения справедливы и для систем конечной толщины. Аналогичным образом легко сделать вращающейся обсуждавшуюся выше модель шара с круговыми орбитами.

Интуитивно кажется, что дискообразные системы должны вращаться быстрее всего, а сферические системы не должны вращаться. В теории классических фигур равновесия однородных твердотельно вращающихся жидких масс это представление несколько уточняется. В теории вводится безразмерный параметр

$$\frac{2}{\Omega^2 G},$$

где Ω — угловая скорость вращения, ρ — плотность. Для равновесных эллипсоидов вращения, называемых эллипсоидами Маклорена, этот параметр является однозначной функцией сплюснутости. Оказывается, что для сферических систем $\Omega^2 = 0$, в пределе диска опять $\Omega^2 = 0$, а наибольшее значение $\frac{2}{\Omega^2 G}$, равное приблизительно 0,2247, соответствует отношению осей эллипсоида, равному 0,368.

Для бесстолкновительных звездных систем, как показывают приведенные выше рассуждения, корреляции между той или иной «мерой вращения» и сплюснутостью нет, в отличие от эллипсоидов Маклорена. Поэтому удивление вызывали встречавшиеся до середины 1970-х сообщения об обнаружении подобной корреляции для реальных галактик. Но в 1977 г. Г. Иллингворт, а затем и другие авторы определили, что наблюдавшиеся ими эллиптические галактики практически не вращаются. Равновесие таких систем оказывается возможным не из-за баланса гравитационной и центробежной сил, а вследствие анизотропии распределения скоростей.

Теперь обратимся к четной по скоростям части функции распределения $F_+(\mathbf{r}, \mathbf{v})$. Д. Линден-Белл доказал в 1962 г., что в принципе она однозначно определяется распределением масс. К сожалению, до сих пор не существует аналитических алгоритмов нахождения этой функции, пригодных для реалистических выражений для функции плотно-

сти ($\mathbf{r}$), хотя Х. Дейонге (Гент) в 1986 г. и К. Хантер (Таллахасси) в 1992 г. сделали крупные шаги в этом направлении.

В случае моделей Кузмина, для которых известен третий интеграл I_3 , основы теории нахождения равновесной функции распределения были сформулированы самим Г. Г. Кузминым в 1956 г. Если $F(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = (E, h, I_3)$, то опять встает проблема выбора. Существенного развития теории удалось достичь в 1988 г. молодым в то время Х. Дейонге и Т. де Зееуву, которые нашли пример такой функции распределения. Затем, в 1990-е гг., Дейонге вместе с появившимися у него учениками предложил численную технику построения моделей с трехосным распределением скоростей и применил ее к ряду галактик. Подобные методы разрабатывались и для построения моделей трехосных невращающихся звездных систем, для которых известны три интеграла движения.

Значительное развитие получила теория равновесных моделей звездных систем, имеющих форму однородных эллипсоидов. Пионерскими здесь являются выполненные в 1960-е гг. исследования К. Фримена, работавшего в то время в Кембридже (Англия) над диссертацией. У построенных им моделей трехосных эллипсоидов было следующее любопытное свойство: эллипсоид, разумеется, вращался твердотельно, но внутри него во вращающейся системе отсчета скорость центроида была отлична от нуля. Она являлась линейной функцией координат, но на границе эллипсоида обращалась в нуль. Таким же свойством обладали трехосные жидкие гравитирующие эллипсоиды, о которых писал великий математик Б. Риман в 1860 г., но которые затем сто лет почти не привлекали внимания. Можно сказать, что внутри таких эллипсоидов вещество обладает циркуляцией. На первый взгляд данное свойство моделей кажется экзотикой, тем более, что найденное Фрименом выражение для функции распределения физически неправдоподобно. Однако появлялись сообщения об обнаружении подобного рода внутренних движений у реальных галактик.

В дальнейшем развитии теории участвовал ряд авторов, но наибольших успехов добился Б. П. Кондратьев (Ижевск), в работах которого данное направление звездной динамики было в известной степени завершено.

В 1979 г. 67-летний М. Шварцшильд, автор многих получивших признание исследований по различным разделам астрофизики и физики, опубликовал статью, которая привела к принципиально новому подходу к построению равновесных моделей звездных систем.

Несколько упрощая, метод Шварцшильда можно описать следующим образом. Мы исходим из выражения для плотности (ρ) и соответствующей функции (ψ). Все пространство разбивается на большое количество малых ячеек. Вычисляется большое число орбит с разнообразными начальными условиями. При этом находится время пребывания каждой звезды в ячейках, которые она пересекает. Затем для каждой ячейки подсчитывается суммарное время пребывания в ней звезд. Следующей задачей является приписывание каждой орбите такого веса, чтобы получившаяся плотность заполнения ячеек соответствовала исходной плотности. После этого по орбитам, попавшим в ячейку, с учетом весов орбит для каждой ячейки можно определить скорость центроида, дисперсии остаточных скоростей и, наконец, функцию распределения скоростей. Таким образом удастся численно построить самосогласованную модель звездной системы. В дальнейшем многие авторы усовершенствовали или модифицировали метод Шварцшильда с тем, чтобы учесть наличие в системе как упорядоченных, так и хаотических орбит, лучше привязать модель к наблюдательным данным для реальных галактик и т. д. В настоящее время большое число моделей звездных систем (включая и нашу Галактику) построено подобным образом.

3.15. Об устойчивости звездных систем

В природе реализуются только равновесные состояния, устойчивые относительно постоянно существующих малых возмущений. Например, никто не видел карандаш, стоящий на острие. Если обсуждавшиеся выше модели звездных систем пригодны для описания реальных систем, то они должны быть устойчивыми.

Фундаментальные исследования устойчивости фигур равновесия гравитирующей жидкости (таких, как упомянутые выше эллипсоиды Маклорена) выполнил сто лет назад великий русский математик А. М. Ляпунов. В 1960-е гг. новый метод исследования этих проблем разработал С. Чандрасекар. Между фигурами равновесия несжимаемой гравитирующей жидкости и галактиками существует глубокая аналогия, но непосредственно к звездным системам результаты великих классиков применить нельзя. В частности, дело тут в том, что в теории фигур равновесия, как правило, рассматриваются только возмущения, приводящие к поверхностным деформациям, без нарушения пространственной однородности, а у реальных галактик четких наружных границ нет, не говоря уже о том, что они не являются однородными.

3.15.1. Гравитационная неустойчивость

Большое астрономическое значение имеет упоминавшаяся выше джинсовская, или гравитационная, неустойчивость, приводящая к росту первоначально малых неоднородностей плотности. Правильное по порядку величины выражение для критической длины волны Джинса λ_J , т. е. для наименьшего размера неоднородности, приводящего к неустойчивости, можно получить из следующих элементарных соображений.

Пусть R — первоначальный радиус возмущения, которое будем представлять однородным газовым шаром. На возмущение действуют сила гравитации, стремящаяся сжать его, и препятствующая этому сила газового давления. Если бы не было давления, все частицы шара упали бы радиально к центру за время, имеющее порядок времени пересечения для шара. Точнее, по третьему закону Кеплера, определим его как половину орбитального периода движения по сильно вытянутой кометообразной орбите:

$$P_g = \sqrt{\frac{3}{8GM}},$$

где M — масса шара. Вводя плотность шара $\rho = 3M/(4\pi R^3)$, получаем

$$P_g = \frac{1}{\sqrt{G\rho}}.$$

Это характерное время сжатия шара (так называемое *время свободного падения*) при наличии гравитации и отсутствии газового давления. А если бы не было гравитации, но было внутреннее давление, шар расширялся бы со скоростью распространения малых возмущений в среде; ее называют скоростью звука. Обозначим ее c . Тогда характерное время расширения $P_e = R/c$ (обычно его называют *динамическим временем*). В теории газов выводится выражение для скорости звука. В случае адиабатических процессов в идеальном газе (когда тепловыми явлениями можно пренебречь)

$$c = \sqrt{\frac{\gamma T}{\mu}},$$

где R — универсальная газовая постоянная, μ — молекулярная масса, T — температура возмущения. Коэффициент γ называется показателем адиабаты, и его численное значение зависит от свойств среды. Для одноатомного идеального газа $\gamma = 5/3$. Из этих соотношений сле-

дует, что при фиксированных значениях температуры и плотности среды

$$P_e/P_g \quad ,$$

т. е. большой шар будет быстрее сжиматься, чем расширяться (сила гравитации является дальнодействующей!). В критическом случае $P_e = P_g$. Тогда критический размер возмущения

$$J = \frac{T^{1/2}}{G} \quad .$$

Разумеется, формулы самого Джинса (1902, 1928) были значительно более сложными. Он исходил из уравнений гидродинамики, которые решал известным в математической физике методом разделения переменных. Выполнить математически безупречный анализ уравнений Джинс не сумел и был вынужден сделать предположения, логически противоречащие одно другому. В этой связи в некоторых книгах пишут о «мошенничестве Джинса» (Jeans' swindle). Сейчас ясно, что лобой на его месте «смошенничал» бы точно так же. В теории Джинса предполагается, что в исходном состоянии гравитирующая среда является однородной, бесконечной и стационарной, чего быть не может. Для построения математически последовательной теории требуется существенно изменить постановку задачи, например, считать среду нестационарной (как это делается в космологии).

Джинс рассматривал газовую систему. Для звездных систем мы можем формально выразить температуру через дисперсию скоростей σ^2 , и тогда получим, что джинсовская длина волны λ_J пропорциональна σ^{-1} . Это значит, что чем больше остаточные скорости в галактике, тем она устойчивее. А если теперь воспользоваться теоремой вириала (забыв, что система предполагалась бесконечной), то найдем, что критическая длина волны будет порядка размеров системы. Советуем читателям самостоятельно убедиться в этом.

В действительности подобный формальный перенос результатов, полученных для газа, на бесстолкновительные галактики является необоснованным, так как газовая среда и звездные системы описываются разными уравнениями. Для исследования устойчивости звездных систем следует положить

$$\begin{aligned} F(\mathbf{r}, \mathbf{v}; t) &= F_0(\mathbf{r}, \mathbf{v}) + F_1(\mathbf{r}, \mathbf{v}; t), \\ (\mathbf{r}; t) &= (\mathbf{r}_0; t) + (\mathbf{r}_1; t), \\ (\mathbf{r}; t) &= (\mathbf{r}_0; t) + (\mathbf{r}_1; t), \end{aligned}$$

где функции $F_0(\mathbf{r}, \mathbf{v})$, $\rho_0(\mathbf{r})$, $\rho_0(\mathbf{r})$ соответствуют невозмущенному состоянию, устойчивость которого исследуется, а F_1 , ρ_1 , ρ_1 — возмущения, которые считаются настолько малыми, что квадратами этих величин пренебрегают. Такие выражения подставляются в бесстолкновительное уравнение Больцмана и в условие самогравитируемости, связывающее плотность и потенциальную энергию. Затем обычно полагают

$$F(\mathbf{r}, \mathbf{v}; t) = F_1(\mathbf{r}, \mathbf{v}) e^{ist}$$

и аналогично другие возмущения. Удивляться тому, что в выражение для вещественной функции F входит мнимая единица i , не следует. Если наряду с $F_1 e^{ist}$ в общее решение уравнений для возмущений входит и комплексно сопряженное выражение (равное $F_1 e^{-ist}$ в случае вещественности s и F_1), то сумма их, очевидно, будет вещественной. В то же время подобная запись выражений для возмущений значительно упрощает расчеты.

В результате получается система линейных уравнений для амплитуд возмущений F_1 , ρ_1 , ρ_1 , в которую входит величина s в качестве параметра. Обычно оказывается, что эта система имеет решение только при определенных значениях s (говорят, что их совокупность составляет спектр). Если все s , для которых существует решение, являются вещественными, то решение будет ограниченным во времени, и возмущения будут изменяться со временем периодически, с периодом, равным $2\pi/|s|$ (вспомним формулу Эйлера $e^{ist} = \cos st + i \sin st$). В таком случае исследуемая невозмущенная модель является (линейно) устойчивой. Если же s — мнимое или комплексное с мнимой частью, отличной от нуля, то в зависимости от знака $\text{Im } s$ данное частное решение будет или экспоненциально возрастать со временем (что означает неустойчивость), или затухать.

Итак, общий план исследования устойчивости ясен. К сожалению, практически реализовать его до сих пор удавалось лишь в очень немногих случаях из-за огромных технических трудностей.

Теперь вернемся к джинсовской неустойчивости. Для бесстолкновительных систем ее исследовали в 1960-е гг. Д. Линден-Белл, а затем М. Н. Максумов и Л. С. Марочник и др., более или менее следуя описанной схеме. Конкретнее, пришлось воспользоваться теорией плазменных неустойчивостей, разработанной в 1946 г. Л. Д. Ландау, приспособив ее к гравитирующим средам. Оказалось, что при реалистических распределениях скоростей критическая длина волны остается практически такой же. Однако поведение решений для газовой и звездной сред при малых масштабах возмущений оказалось различ-

ным: если в газе происходят колебания плотности, то в звездной системе возмущения будут затухать (это аналог известного в физике плазмы затухания Ландау). Избежать в этой теории «мошенничества Джинса» не удалось.

3.15.2. Устойчивость сферических звездных систем

Первые строгие содержательные результаты по теории устойчивости точных моделей бесстолкновительных звездных систем были получены в 1960 и 1962 гг. В. А. Антоновым, исследовавшим устойчивость сферических систем с изотропным распределением скоростей, так что для этих моделей функция распределения $F_0(\mathbf{r}, \mathbf{v}) = (E)$. Основные результаты Антонова можно выразить в виде следующих законов.

1. Если функция (E) является убывающей (как это имеет место для всех более или менее реалистичных моделей с распределением скоростей, напоминающим максвелловское), то звездная система устойчива, если устойчив газовый гравитирующий шар с таким же законом плотности. Таким образом, первый закон Антонова сводит сложную задачу об устойчивости бесстолкновительной звездной системы к много более простой задаче об устойчивости звезд.

2. Если функция распределения (E) является убывающей, то звездная система устойчива относительно всех возмущений, нарушающих сферическую симметрию.

Вместо третьего закона Антонова приведем более сильный результат, который установили в 1971 г. П. Доремус, М. Фэ (М. Feix) и Г. Бауман: если (E) является убывающей функцией, то система устойчива относительно радиальных возмущений.

Из этих утверждений следует устойчивость упоминавшихся выше моделей сферических систем Шустера—Пламмера, Энона, Кузмина—Маласидзе—Велтманна в случае изотропного распределения звездных скоростей. Метод Антонова позволяет также исследовать устойчивость и некоторых моделей с анизотропным распределением скоростей относительно радиальных возмущений.

Г. С. Бисноватый-Коган, Я. Б. Зельдович и А. М. Фридман доказали в 1969 г. устойчивость систем с круговыми орбитами (модель Степанова). В дальнейшем А. М. Фридман и И. Г. Шухман дополнили и уточнили этот вывод. Оказалось, в частности, что даже вращающийся шар с круговыми орбитами, как это ни удивительно, устойчив. Почему же нам не удастся обнаружить шаровые скопления с круговыми орбитами, и у шаровых скоплений не наблюдается сколько-нибудь заметного вращения? (Скопление Кентавра — не сферическое, и вообще это

особая система.) Естественно задаться теоретическим вопросом: устойчивы ли сферические системы с промежуточным (радиально сплюснутым) распределением скоростей? Для произвольных моделей вопрос пока открыт, но для сильно идеализированной модели однородного шара положительный ответ дали в 1990 г. В. А. Антонов и его ученик С. Н. Нуритдинов.

Большой космогонический интерес представляет другой предельный случай, когда все звезды двигаются по радиальным орбитам, проходящим через центр. В 1973 г. В. А. Антонов доказал, что такая модель неустойчива. Этот результат не явился неожиданным. Система с радиальными орбитами может рассматриваться как «холодная» в поперечном направлении, а тогда неустойчивость могла бы ожидаться на основании критерия Джинса. Вследствие неустойчивости у звезд появятся поперечные скорости, что приведет к перестройке хода плотности. По расчетам некоторых авторов система сначала станет трехосной, напоминающей SB-галактику, а затем может снова стать сферической. Доказанная Антоновым неустойчивость получила название «неустойчивость радиальных орбит». Ее открытие послужило исходным пунктом для большого количества исследований, в которых с развитием этой неустойчивости связывалось формирование наблюдаемой структуры галактик. В. Л. Поляченко и И. Г. Шухман (Иркутск) на примере некоторых простых моделей показали, что неустойчивы и сферические звездные системы с сильно вытянутыми (хотя и не прямолинейными) орбитами.



Рис. 3.27. В. А. Антонов.

3.15.3. Неустойчивости в моделях сплюснутых галактик

А что можно сказать об устойчивости таких звездных систем, равновесие которых поддерживается в основном за счет вращения? Рассмотрим предельный случай бесконечно тонкого диска, который будем считать твердотельно вращающимся. Пусть σ_0 — поверхностная плотность диска, Ω — угловая скорость его вращения, R — радиус диска. Полная масса диска равна $\sigma_0 R^2$. Предположим, что диск немного сжался до $(1 - \epsilon)$ первоначального размера. Новую угловую скорость обозначим Ω_1 . В результате сжатия звезда на периферии диска будет испытывать дополнительное гравитационное притяжение:

$$G_0 R_*^2 \frac{1}{(1 - \epsilon)^2 R_*^2} \frac{1}{R_*^2} \approx 2 G_0.$$

Поскольку при сжатии масса и момент импульса сохраняются, то

$$R_*^2 \approx (1 - \epsilon)^2 R_*^2,$$

т. е. новая угловая скорость $\omega_1 = \omega_0 / (1 - \epsilon)^2$. Поэтому центробежная сила изменяется на величину

$$\frac{1}{2} (1 - \epsilon) R_*^2 \omega_1^2 \approx \frac{1}{2} (1 - \epsilon) R_*^2 \omega_0^2 \frac{1}{(1 - \epsilon)^4} = \frac{1}{2} R_*^2 \omega_0^2 \frac{1}{(1 - \epsilon)^3} \approx \frac{1}{2} R_*^2 \omega_0^2 \frac{1}{(1 - \epsilon)^3}.$$

Если центробежная сила увеличится на большую величину, чем сила гравитации, то система будет стремиться в исходное состояние, т. е. будет устойчивой. Отсюда получаем условие неустойчивости

$$\frac{1}{2} R_*^2 \omega_0^2 \frac{1}{(1 - \epsilon)^3} \leq 2 G \Sigma_0$$

или

$$R_* \leq \frac{2 G \Sigma_0}{\omega_0^2}.$$

Таким образом, вращение препятствует гравитационной неустойчивости, если размер системы больше некоторого предела, т. е. влияние вращения противоположно влиянию остаточных скоростей.

Неустойчивость «холодного» диска относительно возмущений, лежащих в плоскости, установили в 1963 г. Л. Местель и К. Хантер. Существенно более подробный анализ устойчивости дифференциально вращающегося звездного диска выполнил в 1964 г. Алар Тоомре (Массачусетский технологический институт, США). Наиболее неустойчивыми оказались возмущения с длиной волны

$$\lambda_* = \frac{2 G \Sigma_0}{\kappa^2},$$

где κ — эписицическая частота. Развитию более длинноволновых возмущений препятствует стабилизирующее действие вращения, а более коротковолновых — остаточные скорости звезд (при большей дисперсии скоростей звезды улетят из возмущенной области до того, как она сожмется). При развитии гравитационной неустойчивости расстояние между соседними уплотнениями должно быть порядка λ_* . Тоомре нашел, что диск локально устойчив относительно осесимметричных возмущений, если дисперсия скоростей σ_R превосходит критическое значение $\sigma_{R,c}$:

$$\sigma_R = k G \Sigma_0 / \kappa,$$

где k — числовая константа. По Тоомре, $k \approx 3,36$. В дальнейшем другие авторы уточняли значение k , учитывая, например, конечную толщину диска. В окрестности Солнца в Галактике $\rho \approx 3$ кпк, а $v \approx 20$ км/с. Для старых звезд диска Галактики ρ_R почти вдвое больше.

Вообще сильно сплюснутым гравитирующим системам угрожают разнообразные неустойчивости. Критерий Тоомре гарантирует локальную устойчивость только для возмущений, не нарушающих ротационную симметрию, но ничего не говорит об устойчивости относительно неосесимметричных возмущений, которые представляют наибольший интерес как возможные генераторы спиральной структуры галактик. В ряде работ исследовалось развитие так называемой бармоды, т. е. превращение кругового диска в эллиптический. В 1981 г. А. Г. Морозов (работавший в то время в Иркутске) обобщил условие Тоомре. Для диска с невозмущенной поверхностной плотностью $\Sigma_0(R) = \text{const}$ и угловой скоростью вращения $\Omega(R) = R^{-1}$ для подавления всех неосесимметричных возмущений необходимо, по Морозову, чтобы

$$\kappa_R \geq (2/\lambda),$$

где κ_R — критическая дисперсия Тоомре. Неравенство Морозова согласуется с результатами численных экспериментов.

До сих пор обсуждались только возмущения, лежащие в плоскости диска. К. Хантер (1969) подробно исследовал мембранные колебания, изгибающие плоскость диска. К. Хантер и А. Тоомре пытались объяснить подобным образом наблюдаемый изгиб плоскости Галактики. При существенной анизотропии распределения скоростей звезд вместо устойчивых колебаний развивается «шланговая неустойчивость». В. Л. Поляченко и И. Г. Шухман (1977, 1979) нашли, что диск может быть неустойчив по отношению не только к крупномасштабным деформациям, но и к мелким изгибам в вертикальном направлении. Наблюдателю со стороны будет казаться, что диск «распух», а у звезд появились скорости в вертикальном направлении. Поэтому шланговая неустойчивость может быть одним из механизмов увеличения дисперсии скоростей с возрастом.

Любопытно, что самогравитация диска дестабилизирует возмущения в плоскости диска, но стабилизирует изгибные. Напротив, остаточные скорости звезд дестабилизируют изгибные возмущения, но способствуют рассасыванию гравитационных возмущений (критерии Тоомре и Морозова).

Приведенные выше результаты относились к предельно сплюснутым самогравитирующим моделям; вероятно, они справедливы и

для дисков конечной, но малой толщины. Не потому ли галактик, состоящих из одной дисковой составляющей, не наблюдается? При более детальном анализе оказывается, что или сплюснутые галактики погружены в гало, или у них имеются признаки «темной материи» (такие как почти плоская кривая вращения), в которую они погружены.

Естественна гипотеза, что сильно сплюснутые устойчивые гравитирующие системы должны рассматриваться как находящиеся внутри гало («мертвого», или, что лучше, «живого», т. е. реагирующего на изменения в диске). Численные эксперименты согласуются с этой гипотезой. Не стал неожиданным и полученный при этом результат: если масса гало превосходит массу диска, то бар-мода стабилизируется. Однако не все так просто. Согласно В. Л. Поляченко и И. Г. Шухману, гало, превосходящее по массе диск в 3–4 раза, дестабилизирует изгибные возмущения. Однако выполненные в 1991 г. расчеты ученицы А. Г. Морозова Е. А. Михайловой (Волгоград) показали, что наличие сколь угодно массивного гало не препятствует существованию дисков, устойчивых относительно как гравитационных, так и изгибных возмущений.

Об устойчивости звездных систем промежуточной сплюснутости (между шарами и дисками) известно мало. В 1970-е гг. В. Л. Поляченко, И. Г. Шухман и А. Г. Морозов тщательно исследовали устойчивость моделей однородных двух- или трехосных эллипсоидов (модели Фримена). Зависимость свойств моделей от отношения осей эллипсоидов получилась сложной, область неустойчивости оказалась «кlyккообразной» (рис. 3.28). Возможно, что эти результаты (полученные численными расчетами) еще будут уточнены.

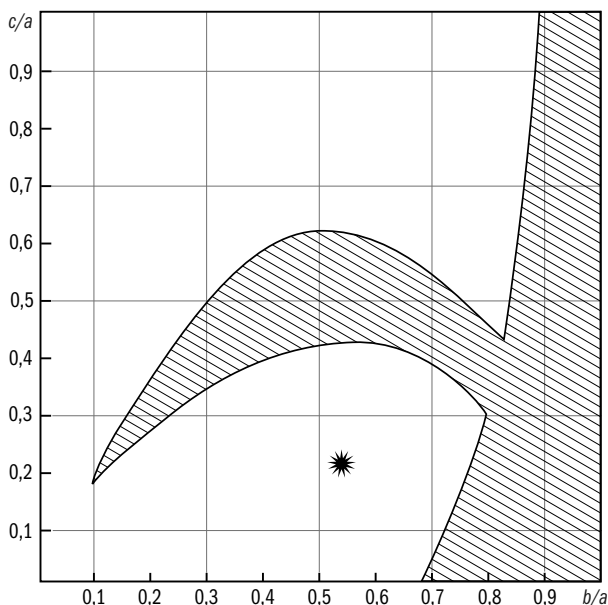
В 1973 г. известные (а в то время — молодые) американские астрофизики П. Пиблз и Дж. Острайкер выдвинули гипотезу, согласно которой устойчивость (или неустойчивость) изолированной гравитирующей системы, обладающей ротационной симметрией, определяется отношением

$$t = K_{\text{rot}} / |W|,$$

где K_{rot} — кинетическая энергия вращения, а W — потенциальная энергия. По теореме вириала $2(K_{\text{rot}} + K) = |W|$, где K — кинетическая энергия остаточных движений. Обозначим $t = K / K_{\text{rot}}$, т. е. это безразмерное число, характеризующее соотношение между остаточными и упорядоченными движениями в системе. Тогда получаем, что

$$t = 1/(2 + 2 \epsilon).$$

Рис. 3.28. Области устойчивости и неустойчивости (заштрихована) для моделей трехосных эллипсоидов Фримена. По осям отложены отношения осей эллипсоида. Звездочка соответствует галактике NGC 4027.



Отсюда следует, что $0 \leq t \leq 1/2$, причем для «холодных» систем ($\gamma = 0$) получаем $t = 1/2$, а для невращающихся систем (когда $\gamma = 1$) имеем $t = 0$. По гипотезе Пиблза—Острайкера для систем любой природы критическое значение параметра t должно быть близким к универсальному значению

$$t = 0,14 \pm 0,08.$$

Известно, что для серии эллипсоидов Маклорена критическим является значение 0,1376, при переходе через которое сфероиды превращаются в трехосные эллипсоиды. Для жидких гравитирующих систем критическим является значение 0,137.

По Пиблзу и Острайкеру, если система настолько «горячая», что $t < t_c$, то «сильные» неустойчивости в ней должны быть подавлены. Под «сильными» здесь понимаются такие неустойчивости, которые приводят к заметным изменениям крупномасштабной структуры системы за время порядка времени пересечения.

Численные эксперименты, проведенные Пиблзом и Острайкером, подтвердили, что при $t > t_c$ модели быстро перестраивают свою форму (даже если выполняются локальные критерии устойчивости), причем существенную роль при этом играет бар-мода. В результате эволюции система «нагревается», и t уменьшается до t_c . В то же время для эллип-

соидов Фримена, устойчивость которых доказана (по крайней мере относительно наиболее крупномасштабных возмущений), $t > t_c$. Известны и другие примеры нарушения критерия Пиблза—Острайкера. Поэтому, хотя данный критерий, по-видимому, справедлив для систем, близких к осесимметричным, он явно нарушается в случаях заметной трехосности. В силу этого критерий Пиблза—Острайкера в значительной степени утратил популярность. В основном вопрос сводится к тому, считать ли развитие бар-моды исключительным явлением или нормальным событием в жизни галактик.

Поскольку в дисках галактик кинетическая энергия вращения обычно больше энергии остаточных движений, можно было бы ожидать, что галактик без центральных баров наблюдаться не должно. То, что такие галактики встречаются, показывает, что действуют другие механизмы стабилизации. В частности, стабилизирующую роль может играть темное гало, за счет чего увеличивается $|W|$ и подавляется даже бар-мода.

3.16. О спиральной структуре галактик

Спиральная структура галактик, как правило, производит наибольшее впечатление на рассматривающих их изображения. В 1845 г. ирландский любитель астрономии У. Парсонс (граф Росс, лорд Оксмантан) увидел и зарисовал спиральную структуру у М51, а затем других туманностей (природа которых была в то время неизвестна). С тех пор множество исследователей пыталось понять, что это такое. Были и чисто качественные догадки, и явно фантастические умозрения, и детальные теории, разработанные математически. Спиральные рукава, иногда эффектные, но чаще, к сожалению, короткие и недолговечные, получались в последние десятилетия и при компьютерном моделировании галактик. На протяжении почти сорока лет один из основоположников звездной динамики Б. Линдبلاد старался выяснить, когда и почему у некоторых галактик появляется спиральный узор, и с этой целью развивал несколько сильно различающихся гипотез. Свои представления о природе спиральной структуры были у А. Пуанкаре, Дж. Джинса, лауреатов Нобелевской премии В. Гейзенберга, Э. Ферми, С. Чандрасекара. И даже сейчас мы не можем быть уверены, что идем по верной дороге, а не в тупик.

Представим галактику в виде диска и начертим на его поверхности спиральную ветвь. Придадим диску вращение. Может оказаться, что галактика будет волочить за собой ветвь, так что она будет «закручивающейся». Такую ветвь называют отстающей (trailing). При

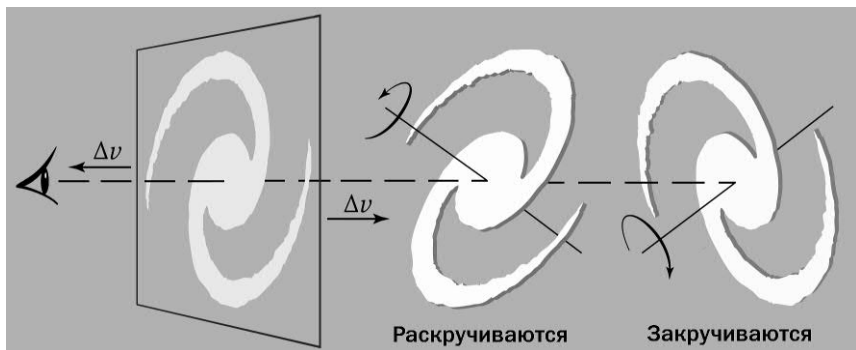


Рис. 3.29. Измерение лучевых скоростей без знания о наклоне галактики не позволяет понять, закручиваются или раскручиваются ее спиральные рукава.

вращении галактики в противоположную сторону ветвь будет «раскручиваться». В этом случае говорят о лидирующей (leading) ветви. Каково же направление вращения реальных спиральных галактик? Определить это непросто. У галактик, наблюдаемых плашмя, хорошо заметна спиральная структура, но невозможно определить направление их вращения, поскольку лучевые скорости всех точек диска практически одинаковы. Если же галактика наблюдается с ребра, то ее вращение легко определяется, но не видны ветви.

В результате длительной дискуссии было установлено, что у большинства галактик спиральный узор является отстающим. Изредка, у взаимодействующих галактик, встречаются лидирующие ветви. Известны также «γ-формы» с ветвями обоих типов.

По первоначальной теории Б. Линдблада спиральная структура возникла из-за истечения вещества вследствие неустойчивости круговых орбит на периферии звездных систем. Такие ветви должны быть лидирующими, что в конце концов было признано противоречащим наблюдениям. Последние теории Линдблада допускали ветви обоих типов, но сам Линдблад все равно склонялся к раскручиванию. В какой-то степени это обусловило скептическое отношение большинства астрономов к теориям Линдблада.

В 1960-е гг. популярностью пользовалась магнитная теория спиральной структуры. Согласно этой теории, в первоначальной газовой туманности образовалось магнитное поле, собравшее газ в спиральные жгуты вдоль магнитных силовых линий. Если напряженность магнитного поля достаточно велика, оно полностью определяет движение замороженного в него газа. Вещество в жгутах уплотняется, и газ конденсируется в звезды. Поэтому как газовые облака, так и молодые

звезды (горячие гиганты и сверхгиганты) должны располагаться в спиральных ветвях. Это соответствует данным наблюдений. Увы, оценки напряженности магнитного поля в галактиках показали, что оно недостаточно сильно, чтобы удерживать газ в спиральных ветвях. Поэтому приходится заключить, что роль электромагнитных сил в генерации и поддержании спиральной структуры может быть лишь вторичной, а основными являются гравитационные эффекты.

Возможны две принципиально различные концепции спиральной структуры. Одну из них условно называют «материальной»: спиральные рукава считаются материальными образованиями (звезды или газ с магнитным полем), движущимися в каждой точке вместе с локальной скоростью центроида. Таким образом, в спиральных ветвях все время будут одни и те же объекты, т. е. ветви «сцеплены» с вращающимся галактическим диском. Вряд ли эта концепция встретила бы серьезные возражения, если бы в галактиках произошла релаксация, они были бы почти однородными и вращались бы как твердое тело, исключая самые периферийные области. Но реальные галактики вращаются дифференциально: угловая скорость вращения $\omega = \omega(\mathbf{r})$. Поэтому если, например, в начальный момент ветвь была прямолинейной (образующие её объекты выстроились бы вдоль радиуса), то через несколько оборотов она превратилась бы в тугую свернувшуюся «змею», а через десяток оборотов размылась бы на галактическом фоне.

Интересный вариант материальной теории разработали в 1965 г. П. Голдрайх и Д. Линден-Белл. Они предположили, что газовый слой вращается в сильном внешнем гравитационном поле, которое считается заданным и не подверженным возмущениям. На основе гидродинамических уравнений авторы исследовали эволюцию со временем возмущения плотности, форма которого считалась неизменной во вращающейся с галактикой системе отсчета. Эта эволюция, как оказалось, напоминает зарождение, нарастание и распад спиральной структуры. Без всякой теории ясно, что любое материальное образование, связанное с дифференциально вращающейся галактикой, будет растягиваться в отрезки спиралей, а затем исчезнет за время порядка нескольких времен пересечения. Поэтому материальные ветви будут короткоживущими. Маловероятно, что у всех галактик наблюдаемая сейчас спиральная структура возникла почти одновременно. Отсюда надо сделать вывод, что спиральные ветви постоянно возобновляются («регенерируются»), и теория Голдрайха и Линден-Белла называется регенеративной.

В спиральных ветвях концентрируются газ и молодые звезды, вследствие чего появление и исчезновение ветвей может быть связано со вспышками звездообразования в локальных областях диска (схема, которую развивали Х. Герола и П. Зайден, 1978). За время активного звездообразования (менее 10^8 лет) яркая область, содержащая молодые звезды, вытягивается в дугу. В каждый момент времени будет ряд вспышек звездообразования, поэтому наблюдатель заметит ряд дуг, положение которых не будет случайным, поскольку уже возникшие звезды будут индуцировать звездообразование в соседних областях.

Ясно, что эти и подобные теории неприменимы к галактикам с такими мощными ветвями, как у M51, обладающими упорядоченной структурой (Grand design). Но, быть может, они подходят для объяснения нередко наблюдаемых многочисленных клочковатых ветвей (так называемая флоккулентная структура).

Материальными ветвями особого рода можно считать длинные спиралевидные хвосты, наблюдаемые у взаимодействующих галактик и возникающие, вероятно, в результате приливного воздействия.

Альтернативной является концепция спиральных ветвей как *волн плотности*, восходящая к Б. Линдбладу и разделяемая сейчас большинством исследователей. Современные работы опираются на классические результаты, полученные во второй половине 1960-х гг. под руководством Линя Цзяцзяо, крупного американского ученого китайского происхождения, одного из создателей теории гидродинамической устойчивости. Из сотрудников Линя отметим Ф. Шу, которому принадлежат и значительные самостоятельные исследования (в частности, по теории бурной релаксации), Чи Юаня (Тайвань), Дж. Бертина (Италия). Согласно данной концепции, спиральные ветви являются волнами плотности, которые вращаются (твердотельно) независимо от дифференциального вращения галактики.

Первоначально Линь и Шу обратили внимание на следующее. Если применить критерий Тоомре к центральным областям Галактики, то для минимальной дисперсии скоростей, делающей диск локально устойчивым, получается нереально большая величина: 90 км/с. Если бы в действительности было таким, то звезды из центральных областей Галактики достигали бы окрестности Солнца. Но таких звезд в сколько-нибудь заметном количестве в галактическом диске нет. Отсюда следует, что вблизи центра $R < R_c$ и, следовательно, эта область локально неустойчива. В то же время солнечная окрестность, по-видимому, локально устойчива. Одновременное сосуществование неустойчивых и устойчивых областей диска может привести

к стационарной волне плотности (гипотеза о квазистационарности спиральной структуры).

В системе координат, вращающейся вместе со спиральной структурой, картина поддержания спирального узора выглядит следующим образом. Вначале в спирали появляется возмущение плотности, оно изменяет регулярную гравитационную силу, которая возмущает звездные орбиты, направляя их к спирали и тем самым поддерживая избыток плотности в ветви. Поскольку спиральная структура вращается относительно галактического диска, в каждый момент времени ее будут образовывать разные звезды. Поэтому со стороны будет казаться, что по диску распространяется волна плотности. Примерно такая же картина будет и в случае газового диска.

Волновая теория спиральной структуры развивалась в большом числе работ Линя и его сотрудников, а также А. Кальнайса (Австралия), Г. Контопулоса и др. В нашей стране различные варианты теории разрабатывались сначала в школе Л. С. Марочника (А. А. Сучков, М. Н. Максумов, Ю. Н. Мишуров, В. И. Корчагин и др.), а затем А. М. Фридманом, В. Л. Поляченко, А. Г. Морозовым. Рассказать здесь даже об основных идеях всех этих работ невозможно, поэтому отметим лишь несколько принципиальных вопросов.

Линь, при поддержке таких ведущих астрономов, как Я. Оорт, Б. Бок, Б. Стрёмгрен, Л. Вольтер, с самого начала отказался от трудной задачи разработки строгой математически последовательной теории и основные усилия направил на построение полуэмпирической модели спиральной структуры, которую можно было бы сопоставить с данными наблюдений. Своей первой целью он поставил продемонстрировать возможность существования квазистационарных спиральных ветвей, отодвигая на второй план вопросы, связанные с динамическими механизмами неустойчивости. И такой подход увенчался успехом! Так, теория предсказывала колебания скорости газа в ветвях, согласованные по длинам волн и фазам с колебаниями плотности. Именно такие колебания удалось обнаружить, измеряя поле скоростей газа в галактиках. Ветви могут быть как раскручивающимися, так и закручивающимися. Последующее развитие теории показало, что предпочтение следует отдавать закручивающемуся спиральному узору, в согласии с наблюдениями.

В то же время с самого начала теория Линя и Шу столкнулась с серьезными затруднениями. В 1972 г. их суммировал В. А. Антонов в докладе «О принципиальных затруднениях волновой теории спиральной структуры». Он обращал внимание, в частности, на следующее.

В 1967 г. Д. Линден-Белл и Дж. Острайкер доказали «антиспиральную теорему», согласно которой невозможна спиральная форма так называемых нейтральных колебаний как звездных, так и газовых (но бездиссипативных) систем. В сущности, эта теорема является следствием упоминавшегося выше принципа пространственно-временной симметрии. Действительно, обратим направление времени и одновременно повернем все движения в экваториальной плоскости в обратную сторону. Тогда мы придем к состоянию, в котором на такой же стационарный фон (включая направление вращения) наложено возмущение с противоположным направлением закручивания спиралей. Частоты колебаний в исходном и преобразованном состояниях должны совпадать, и нет оснований отдавать предпочтение одному из них. Соответствующие решения линеаризованных уравнений для колебаний будут антиспиральными. Но эта теорема работает не всегда (она несправедлива, если есть так называемые резонансные звезды, для которых частоты орбитальных колебаний находятся в резонансе с волнами).

Если считать, как это подразумевал Линь, что неустойчивость, приводящая к возникновению ветвей, является локальной, то появляется трудная проблема синхронизации колебаний в разных частях реальной системы. Другая сторона той же проблемы — выбор единственной длины волны из множества возможных. По-видимому, в рамках линейной теории невозможно получить удовлетворительные ответы на эти вопросы. В 1970–1980-е гг. А. М. Фридман и М. Г. Абрамян (Ереванский университет) развивали теорию спиральной структуры как солитонов, т. е. нелинейных уединенных волн. К сожалению, дальнейшего развития это направление не получило.

Все волны интерферируют. Однако нет наблюдательных свидетельств интерференции спиральных ветвей, какую можно было бы ожидать для взаимодействующих галактик. Важный результат получил в 1969 г. А. Тоомре. Он нашел, что волны спиральной формы распространяются в радиальном направлении с довольно большой скоростью, т. е. пакет из спиральных волн сносится, и в конце концов спиральные волны должны исчезнуть. Поэтому необходим генератор спиральной структуры. Таким образом, фактически мы вернулись к проблеме, от которой пытались уйти, выдвигая концепцию спиралей как волн плотности. Было предложено несколько механизмов генерации спиральной структуры.

Наиболее естественной кажется поддержка колебаний диска вращающимся баром. Противоположным является возбуждение волн

плотности галактиками-спутниками или близко проходящими соседями. А. М. Фридман предположил, что основную роль в возникновении ветвей играют гидродинамические (не гравитационные) неустойчивости в газовом диске галактики. Наиболее подробно он и А. Г. Морозов рассматривали неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, которая возможна при резких перепадах в ходе кривой вращения, часто наблюдаемых в центральных частях галактик. Тогда первичными являются спиральные ветви в газе, а волны плотности в звездном диске — это вторичное явление. Между прочим, М. Н. Максумов развивал противоположную концепцию, по которой сначала появляются спиральные волны в старом звездном диске, и уже они индуцируют развитие спиральной структуры в газовом диске, оказывающейся более заметной для наблюдателя. Предлагались и более сложные механизмы генерации спиральной структуры.

Специфическими спиральными ветвями являются «мосты», соединяющие взаимодействующие галактики. Еще в 1950-е гг. такие крупные астрономы, как В. Бааде и Ф. Цвикки, высказали естественную мысль, что «мосты» имеют приливное происхождение. Но когда в 1960-е гг. сначала в Швеции и Германии, а затем и в СССР выполнялись первые расчеты приливного взаимодействия галактик (на основе по необходимости очень грубых схем), некоторые известные специалисты осудили их как «механистические», тянувшие исследование галактик назад. В 1972 г. А. Тоомре и его брат Ю. Тоомре (обладавший лучшими возможностями для численных расчетов) выполнили обстоятельное исследование взаимодействия галактик. В рамках ограниченной задачи трех тел братья Тоомре рассмотрели типичные случаи взаимодействия. С тех пор представления о приливной природе «мостов» и «хвостов» стали практически общепринятыми и подтверждались многочисленными расчетами на основе задачи многих тел. Приливные взаимодействия, выбросы и слияния галактик являются важнейшим фактором их динамической эволюции. Теорию этих процессов еще предстоит разработать.

Литература

- Агекян Т. А. Звездная Вселенная. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1955 (гл. VI).
- Вощинников Н. В., Осипков Л. П. Галактическая астрономия // История астрономии в России и СССР / ред. В. В. Соболев. М.: Янус-К, 1999. С. 278–340.
- Демин В. Г. Судьба Солнечной системы. Популярные очерки по небесной механике. М.: Наука, 1975 (§ 27, 28, 32).

- Кинг А. Р. Введение в классическую звездную динамику. М.: Едиториал УРСС, 2002.
- Огородников К. Ф. Динамика звездных систем. М.: Физматгиз, 1958.
- Огородников К. Ф. Загадки космоса (строение звездного мира). М.: Воениздат, 1963.
- Огородников К. Ф., Осипков Л. П. Звездная астрономия // Очерки истории отечественной астрономии. С древнейших времен до начала XX в. / ред. И. А. Климишин. Киев: Наукова думка, 1992. С. 386–406.
- Орлов В. В., Рубинов А. В. Задача N тел в звездной динамике. СПб: СПбГУ, ВВМ, 2008.
- Осипков Л. П. Универсальные понятия, характеризующие развитие статистических систем, на примере звездной динамики // Развитие классических методов исследования в естествознании («Проблемы исследования Вселенной», вып. 17) / ред. В. В. Чешев. СПб.: НИИ радиоэлектронных комплексов РАН, 1994. С. 465–470.
- Осипков Л. П. Существует ли парадокс релаксации в звездных системах? // Улугбековские чтения. Т. 1 / ред. С. Н. Нуритдинов. Ташкент, 2004. С. 46–56.
- Осипков Л. П. Статистическая механика звездных систем: от Амбарцумяна и далее // Астрофизика. 2008. Т. 51, № 4. С. 505–522.
- Паша И. И. Теории спиральной структуры галактик в 1960-е годы. I // Историко-астрономические исследования. 2002. Вып. 27. С. 102–156; II // Историко-астрономические исследования. 2003. Вып. 29. С. 8–77.
- Пуанкаре А. Млечный Путь и теория газов // Наука и метод. СПб.: Изд-во Н. П. Карбасникова, 1910. С. 209–223.
- Рольфс К. Лекции по теории волн плотности. М.: Мир, 1980.
- Спитцер Л. Динамическая эволюция шаровых скоплений. М.: Мир, 1990.
- Сурдин В. Г. Динамика звездных систем. М.: МЦНМО, 2009.
- Сурдин В. Г., Чариков А. В. Влияние динамического трения на движение шаровых скоплений в Галактике // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 24–27.
- Шагин А. Ф. О собственном движении звезд // Журн. М-ва народ. просвещения. 1838. Ч. XVIII, № 4, отд. 2. С. 446–457.



ГАЛАКТИКА И ЕЕ ОКРЕСТНОСТИ

Д. З. Вибе, В. Г. Сурдин

От общих проблем звездной динамики пора перейти к знакомству с конкретной звездной системой — с нашей родной галактикой. Знания астрономов о ней чрезвычайно неоднородны: окрестности Солнца изучены весьма детально, зато о некоторых удаленных областях Галактики почти ничего не известно. Мы даже в точности не знаем, как выглядит наша звездная система. В чем же причины этого? Их как минимум три: две связаны с тем, что мы находимся внутри Галактики, а третья — с тем, что мы к тому же находимся в ее специфической области. Вот эти причины.

1. Галактика везде вокруг нас, со всех сторон. Для ее изучения астрономы вынуждены исследовать весь небосвод — все 4π стерадиан, или 41 253 квадратных градуса. А это очень много. Например, если использовать обзорный телескоп с большим полем зрения, такой как камера Шмидта Паломарской обсерватории (диаметр поля 6°), то для однократного фотографирования всего неба понадобится сделать не менее 1200 экспозиций. Если же мы захотим исследовать пространство поглубже, используя для этого крупный рефлектор (диаметр поля около 10), то придется сделать около 1,5 млн экспозиций, что вообще выходит за пределы разумного. В то же время для фотографирования внешних галактик, как правило, требуется одна экспозиция. Даже ближайшие спиральные системы — М31 и М33 — занимают на небе не слишком большой телесный угол — не более 3 квадратных градусов, что позволяет фотографировать их за весьма короткое время.

2. Мы находимся внутри Галактики, поэтому очень велика разница в расстояниях до ее ближайших и наиболее удаленных объектов: расстояние от Солнца до соседних звезд ~ 1 пк, а до края Галактики $\sim 100\,000$ пк. Поэтому приходится применять разные инструменты и разные методы для изучения сходных объектов Галактики, расположенных на разных расстояниях от нас. Чтобы сравнивать характеристики этих объектов, требуется «привести» измерения к одному стан-

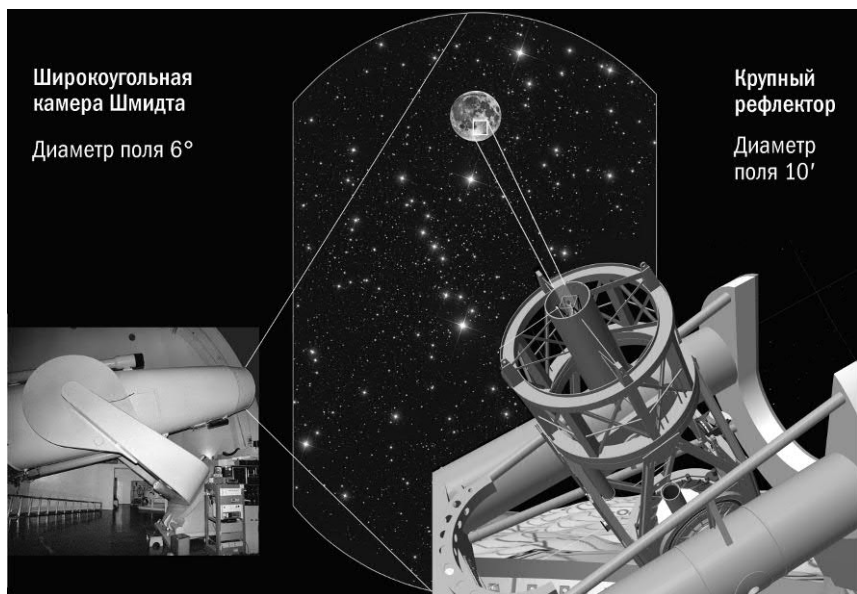


Рис. 4.1. Площадь поля зрения обзорного телескопа в 1000 раз больше, чем у крупного рефлектора XX в. Но при этом проникающая способность обзорного телескопа значительно ниже.

дартному расстоянию, а значит, необходимо определить удаленность каждого из объектов, что далеко не всегда удается сделать с приемлемой точностью.

3. Мы находимся не просто внутри Галактики, а внутри плотной экваториальной части ее газово-пылевого диска. Межзвездная пыль очень сильно поглощает свет далеких объектов, наблюдаемых близ галактического экватора (а таких большинство в нашей плоской системе!). Например, в направлении на центр Галактики межзвездное поглощение света составляет около 30^m ; иными словами, и без того слабый поток света от далеких объектов ослабляется из-за поглощения еще в 10^{12} раз! Поэтому наиболее информативные, оптические, методы изучения звезд и горячих туманностей часто беспомощны в нашей галактике, хотя отлично работают при изучении других галактик.

По указанным причинам до сих пор не создан достаточно полный портрет нашей галактики; постоянно вносятся уточнения в ее морфологический тип (даже то, что наша спиральная галактика имеет бар, выяснилось сравнительно недавно); трудно составлять однородные выборки объектов, особенно редких, разбросанных по всему объему Галактики. Межзвездное поглощение света чрезвычайно затрудняет

изучение молодых массивных звезд: даже вспышки сверхновых нередко остаются незамеченными!

С другой стороны, только в нашей галактике удастся изучать объекты низкой светимости: звезды-карлики (красные и белые), коричневые карлики, экзопланеты... Только у некоторых ближайших звезд нам удастся прямо измерить диаметр и форму и даже разглядеть детали поверхности. Разумеется, практически одинаковая удаленность от нас всех частей каждой внешней галактики позволяет создавать однородные выборки ее объектов. Но у этого преимущества есть и обратная сторона: в то время как строение внешних галактик мы знаем лишь в проекции на небесную сферу, свою галактику мы изучаем в 3D. Только в окрестности Солнца мы имеем возможность измерять расстояния до звезд прямым методом тригонометрических параллаксов, закладывая этим надежный фундамент для шкалы космических расстояний. Так что астрономы не должны сетовать на свое положение в пространстве, а скорее должны радоваться тому, что наша планетная система не плывет в межгалактической пустоте. Вокруг нас, рядом с нами много интересных объектов, достойных пристального изучения, и мы уже немало о них узнали.

4.1. Галактическое краеведение

Как известно, краеведение — это всестороннее изучение определенной части страны, города или деревни местным населением, для которого эта территория считается родным краем. Но что каждый из нас считает своим родным краем? И далеко ли простираются границы «родного края»? Территория, которую изучают краеведы, обычно невелика, и это вполне логично: подробно изучать имеет смысл лишь те пространства, которые непосредственно окружают человека и влияют на его повседневную жизнь. В этом отношении сочетание слов «Галактика» и «краеведение» может показаться странным: космос так далек от нас, зачем тратить время на изучение того, что никак не затрагивает наши судьбы? Тем не менее наиболее пытливые представители рода человеческого снова и снова пытаются постичь устройство Вселенной и понять, так ли уже независимо от нее проходит наша жизнь.

Плоды их усилий иногда прорываются к жителям Земли через средства массовой информации — в сильно преувеличенном, а то и совершенно искаженном виде. Журналисты нередко подхватывают и распространяют слухи о несущемся на Солнечную систему смертоносном межзвездном облаке, об ужасной черной дыре, готовой в бли-

жайшие дни поглотить Землю, о космических лучах, способных разрушить нашу атмосферу... Почти каждое из этих сообщений имеет в своей основе научные факты и почти каждое искажает их до неузнаваемости. Поэтому важно разобраться с тем, какое место на самом деле мы занимаем в космосе и насколько действительно опасно или полезно для нас соприкосновение с Галактикой.

Первые попытки осознать место человека во Вселенной, по сути, мало отличались от краеведения в современном смысле этого слова. Ойкумена охватывала не более чем родной край, то есть место, заселенное твоим народом. За пределами этой местности жила всяческая нечисть, наподобие людей с собачьими головами, а еще дальше располагался край Земли, под которым прятались те самые слоны и черепаха. В эпоху ранних астрономических наблюдений граница Вселенной отодвинулась за орбиту Сатурна, но и тогда мысль об изучении небесной тверди и того, что находится за ней, посещала немногие продвинутые умы.

4.2. Новая космография

История сохранила упоминания об античных мыслителях, высказывавших догадки о том, что Сатурном Вселенная не заканчивается. Однако эпоха подлинной «космографии» началась в XVII в., когда Галилей при помощи своего простенького телескопа доказал, что Млечный Путь — не дымка и не полоса тумана, а скопище огромного количества звезд. Чуть более столетия спустя Томас Райт и Иммануил Кант предложили объяснение этому открытию: Млечный Путь, писали они, — это «эклиптика для звезд», т. е. проекция на небосвод гигантского плоского звездного скопления, в состав которого входит и Солнце.

Первым подлинно научным картографом далекого космоса стал великий астроном Вильям Гершель (1738–1822), применивший для изучения Галактики собственный метод выборочных звездных подсчетов, который он назвал методом «звездных черпков» (star gauges). Понимая, что невозможно детально исследовать все небо (41 253 квадратных градуса — это 210 тыс. лунных дисков!) Гершель с помощью своей сестры Каролины произвел подсчеты звезд разной яркости на 683 небольших площадках, распределенных по небу. Для визуальных наблюдений (фотографию еще не изобрели) использовался «Большой 20-футовый рефлектор» — ньютоновский телескоп с главным зеркалом диаметром около 19 дюймов и диаметром поля зрения 15°. По-видимому, в него были видны звезды до 14^м, когда наблю-

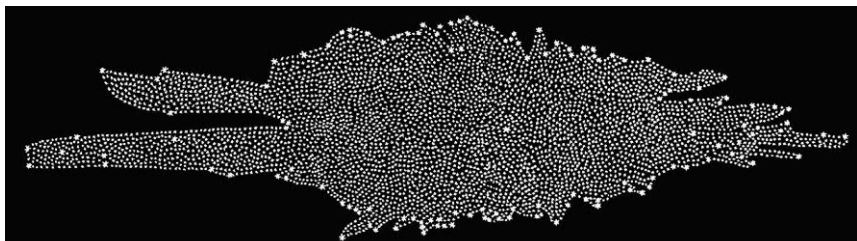


Рис. 4.2. Карта меридионального (т. е. перпендикулярного плоскости экватора) сечения галактического диска, построенная Вильямом Гершелем на основе «звездных черпков». Здесь она показана в негативе. Солнце — жирная точка — оказалось почти в центре звездного острова.

дения велись в прямом фокусе. Заметим, что на всем небе примерно 16 млн звезд ярче 14^m , поэтому полный визуальный обзор неба на такую глубину представляется совершенно невыполнимой задачей. В результате своего выборочного обследования неба Гершель насчитал 117 600 звезд ярче 14^m . Позже его сын Джон Гершель завершил эти подсчеты на южном небе. Метод Гершеля оказался вполне работоспособным и служил астрономам еще два столетия.

Проинспектировав небо многочисленными «черпками», Гершель построил первую карту Галактики и опубликовал ее в 1785 г. в статье под названием «On the construction of the heavens» («О строении небес»). Правда, эта карта оказалась неточной, поскольку при ее создании Вильям Гершель исходил из не вполне верных представлений. Он считал, что все звезды имеют одинаковую светимость и что в свой огромный телескоп он видит все звезды без исключения, поэтому чем слабее блеск звезды, тем дальше она расположена, а если звезд в телескоп не видно, то в данном направлении их вовсе нет.

На карте Гершеля Солнце разместилось близ центра звездного диска. Причина понятна: телескоп при визуальном наблюдении не позволял заметить слишком тусклые звезды, в особенности те, чей блеск был существенно снижен из-за межзвездного поглощения света, о котором в те годы вообще не знали. Поэтому взгляд Гершеля во всех направлениях вдоль Млечного Пути проникал примерно на одинаковую дистанцию. Впрочем, на карте видны и многочисленные «фьорды», направленные от Солнца на непрозрачные облака, заслонившие лежащие за ними звезды. Самый глубокий провал виден слева — это темная полоса, «Вилка Млечного Пути», идущая от Лебедя к Скорпиону.

Солнце, по Гершелю, расположено примерно в центре звездного «пирога», толщина которого равна 150 средним расстояниям между

звездами первой величины, а поперечник — 800 таким расстояниям. Если перевести эти числа в привычные для нас единицы (с учетом современной информации о среднем расстоянии между звездами), то получится, что Галактика имеет диаметр 1800 пк и толщину 340 пк. Любопытно, что оценка толщины Млечного Пути с тех пор осталась примерно той же, а вот поперечник галактического диска Гершель сильно недооценил. Теперь мы знаем, что наша звездная система простирается на многие десятки тысяч парсеков, но из-за межзвездного поглощения света для наблюдений доступны светила лишь в сравнительно небольшой окрестности Солнца (Гершель догадывался об этом, но доказательств не было). Фактически мы видим лишь кусочек звездного диска: при наблюдении в любом направлении вдоль плоскости Галактики наш взгляд «застревает в пыли» уже на расстоянии немногим более 1 кпк. Именно поэтому на карте Гершеля Солнце оказалось близко к центру Галактики. К счастью, толщина газово-пылевого диска меньше, чем 1 кпк, только поэтому мы видим далекие области Вселенной, но лишь вне полосы Млечного Пути.

Метод Гершеля оказался настолько полезным, что практически ту же работу в середине XIX в. предпринял российский астроном Василий Яковлевич Струве (1793–1864), а в начале XX в. — голландский астроном Якобус Каптейн (1851–1922). Разумеется, каждый из них использовал все достижения современной ему астрономии: Струве уже знал параллаксы ближайших звезд, а Каптейн применял фотографическую технику. В отличие от Гершеля, Струве подсчитывал количество звезд разного блеска, стремясь выяснить их распределение в пространстве. Если звезды распределены в пространстве однородно, то отношение количества звезд до двух последовательных значений звездной величины (например, до $+6^m$ и $+5^m$) должно быть почти в точности равно 4. Доказать это легко: при удалении звезды в 10 раз поток света от нее уменьшается в 100 раз, или на 5 звездных величин (по определению). Следовательно, уменьшению блеска на 1^m соответствует удаление в $10^{1/5} = 1,585...$ раза. При этом объем пространства, а значит, и количество звезд, если они однородно заполняют это пространство, возрастает в $(1,585...) ^3 = 3,98...$ раза. Из наблюдений, однако, получалось меньшее значение, к тому же постепенно убывающее при переходе к подсчетам все более тусклых звезд (табл.). Василий Струве был уверен, что в пространстве между звездами свет испытывает поглощение, и даже оценил его среднее значение в $0,6^m/\text{кпк}$ в визуальных лучах, что не так уж далеко от истины (около $1,6^m/\text{кпк}$), но большего в эпоху визуальных наблюдений он сделать не мог.

Количество звезд (N) на всем небе, имеющих блеск ярче указанной звездной величины (m)

m	N	m	N	m	N , млн	m	N , млн
-1	1	4	513	9	0,121	14	15,5
0	4	5	1 602	10	0,340	15	36,9
1	14	6	4 800	11	0,927	16	83,7
2	48	7	14 000	12	2,46	17	182
3	170	8	42 000	13	6,29	18	374

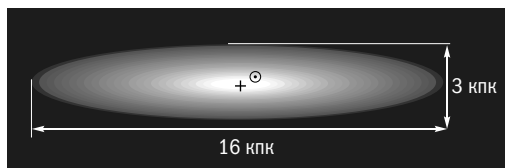
Используя возможности фотопластинки, Каптейн продвинулся дальше. В 1901 г. он определил среднее расстояние до звезд, блеск которых заключен в определенных интервалах звездных величин, что позволило Хуго Зелигеру (1849–1924) оценить диаметр Галактики в 7 кпк при толщине около 2 кпк — вчетверо больше, чем у Гершеля. Затем в течение двух десятилетий Каптейн с коллегами подробно исследовал 206 областей неба (площадки Каптейна), измеряя положение, блеск и спектральный тип звезд. Однако полученная в результате этой работы карта Галактики, по большому счету, не отличалась от карты Гершеля: Солнце тоже оказалось недалеко от центра, хотя размер звездной системы существенно возрос благодаря тому, что фотопластинка «видит» звезды намного более тусклые, чем замечает наш глаз, а теория позволяет точнее определять расстояние до них. В 1920 г. на основе подсчетов звезд до $13,5^m$ Зелигер построил новую модель Галактики — сфероид размером $14,4 \times 3,3$ кпк с Солнцем в середине. В 1922 г. Каптейн уточнил эту модель — сфероид размером 16×3 кпк, а Солнце на расстоянии 0,65 кпк от центра. Межзвездное поглощение света при этом считалось чрезвычайно слабым ($0,08^m/\text{кпк}$), в чем и состояла основная ошибка.



Рис. 4.3. Якобус Каптейн.

Таким образом, в начале XX в. астрономы уже понимали, что наблюдениям в Млечном Пути мешает межзвездное поглощение света, но точно оценить и преодолеть его они еще не могли. Ситуацию с исследованием Галактики в те годы наглядно

Рис. 4.4. Сечение Галактики согласно модели Каптейна 1922 г. Отмечен центр звездной системы (+) и положение Солнца (☉) всего лишь в 650 пк от центра Галактики.



представила Сесилия Пейн-Гапошкина (1954): «Проблему исследования нашей собственной Галактики можно сравнить с заданием: стоя на пересечении 125-й стрит и Парк-авеню, составить карту Нью-Йорка. Хотя наблюдателю, расположенному в этой точке, было бы ясно, что город очень велик, какое-либо суждение о его протяженности и плане было бы, очевидно, невозможно. Для большей аналогии следовало бы выбрать Лондон с его туманами и смогом».

На правильное место в Галактике наше дневное светило удалось поставить лишь американскому астроному Харлоу Шепли (1885–1972). Он рассудил так: если вдоль улиц не просматривается центр города, то нужно поднять голову и попытаться разглядеть верхушки небоскребов — где их больше, там и центр. В качестве реперов для построения карты Галактики он выбрал не звезды, а шаровые звездные скопления. Межзвездное поглощение, как мы теперь знаем, вызвано мелкими пылевыми частицами, рассеянными между звезд. Эти пылинки сосредоточены главным образом вблизи плоскости Млечного Пути. А большинство шаровых скоплений расположено высоко над диском, потому поглощением они почти не затронуты. Впрочем, в те годы Шепли думал, что поглощения вообще нет. На карте Галактики, впервые построенной Шепли в 1917 г., Солнце оказалось не то чтобы на окраине, но и далеко не в центре — примерно в 13 кпк от середины гигантского звездного облака поперечником 100 кпк. И хотя в наши дни расстояние от Солнца до центра Галактики считается несколько меньшим (от 7,5 до 8,5 кпк), суть от этого не меняется: с представлениями о Солнце как о центре мироздания пришлось расстаться раз и навсегда.

Как водится, любая смена парадигмы не обходится без перегибов и дискуссий. Вопрос о размере Галактики и расположении Солнечной системы в ней астрономы попытались разрешить по-новому — в форме открытого диспута, названного позже «Великим спором». В апреле 1920 г. в Национальной академии наук в Вашингтоне сошлись два известных астронома — Харлоу Шепли и Гебер Кёртис (1872–1942). Первый считал, что наша галактика огромна и объединяет в себе все видимые на небе объекты, а второй — что наша галакти-

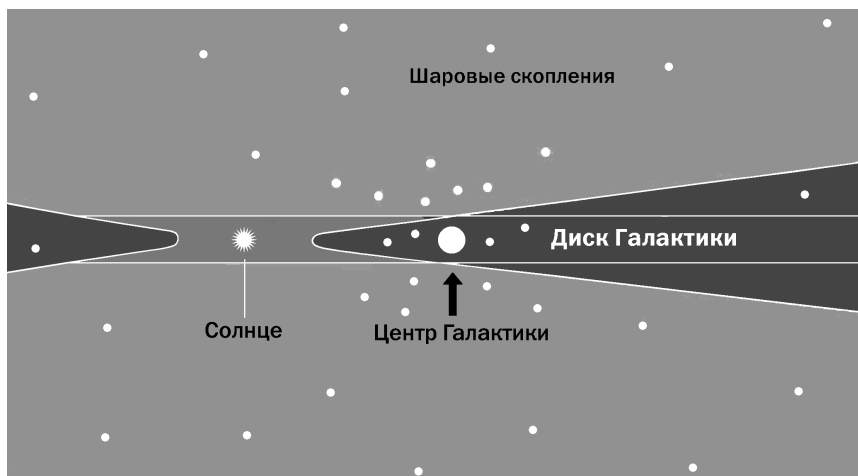


Рис. 4.5. Схема сечения Галактики вдоль оси вращения через центр и положение Солнца. Темно-серым залиты области, недоступные для оптических наблюдений из-за межзвездного поглощения света. Естественно, Солнце оказалось в центре той области диска, которая доступна для наблюдений. Большая часть диска скрыта от нас, однако объекты гало — шаровые звездные скопления — в основном видны, а их концентрация к центру Галактики указывает на положение центра и позволяет определить расстояние до него.

ка не так уж велика и что многие подобные ей звездные системы, такие как Туманность Андромеды, находятся далеко за ее пределами. В результате диспута, как водится, каждый остался при своем мнении, а позже выяснилось, что каждый из них отчасти заблуждался, а кое в чем был прав.

Теперь мы знаем, что основу структуры Галактики составляет *тонкий диск*, толщина которого не превышает нескольких сотен парсеков (в этом смысле можно сказать, что оценка Гершеля по-прежнему справедлива). Масса тонкого диска примерно $10^{11} M_{\odot}$, а радиус — не менее 20 кпк. Это наиболее заметная часть нашей галактики и других подобных ей систем (рис. 4.6) — именно в тонком диске сосредоточены все самые яркие и молодые звезды. Помимо тонкого диска выделяют еще и более старый *толстый диск*. Он имеет толщину около 1,5 кпк и массу около $10^{10} M_{\odot}$.

С центром тонкого диска совпадает центр еще одной галактической подсистемы — *балджа*, центрального «вздутия». Балдж — это гигантское сфероидальное звездное скопление диаметром в несколько килопарсеков и массой примерно $10^{10} M_{\odot}$. Он тоже хорошо заметен на фотографиях. В отличие от тонкого диска, балдж населен более



Рис. 4.6. Соседняя спиральная галактика M81 (NGC 3031) внешне, вероятно, похожа на нашу: спиральные рукава с ответвлениями, скопления ярких голубых звезд, темные волокна пылевых облаков и яркое пятно балджа в центре. Гало слишком тусклое, чтобы его можно было различить на таком снимке. Фото: R. Jay GaBany и др.

старыми звездами и потому на цветных снимках имеет характерный желтоватый цвет.

Наконец, самая обширная подсистема Галактики — *гало*, сферическое звездное облако поперечником в десятки килопарсеков и массой примерно $10^{10} M_{\odot}$. Гало населено самыми старыми в Галактике звездами и шаровыми скоплениями. Исследования последних лет, в первую очередь данные Слоановского цифрового обзора (SDSS), показали, что гало, на первый взгляд кажущееся сферой, на самом деле имеет сложную структуру и разделено на многочисленные «звездные потоки» — группировки звезд, движущиеся по общим орбитам и, вероятно, представляющие собой остатки карликовых галактик, поглощенных Млечным Путем.

Итак, наше Солнце — звезда тонкого галактического диска, удаленная от центра Галактики примерно на 8 кпк и находящаяся в 10 пк над экваториальной плоскостью Млечного Пути. Конечно, с тем же успехом можно было считать, что Солнце расположено *под* плоскостью Млечного Пути, но так уж повелось, что мы привыкли считать верхом ту сторону, где находимся сами.

4.3. Вокруг Галактики

Прежде чем мы начнем разбираться с нашими ближайшими окрестностями, коротко взглянем на окружающую Вселенную в более крупном масштабе. Поперечник нашей Галактики составляет многие десятки килопарсеков. Если мы отлетим чуть дальше, то попадем в царство галактик-спутников. Вообще Млечный Путь похож в этом отношении на любой крупный город: динамично развивающаяся центральная часть, окраины, бывшие в недавнем прошлом отдельными деревеньками, и более далекие пригороды, сумевшие до поры до времени сохранить относительную независимость. Таких самостоятельных «пригородов» у Галактики сейчас известно около двух дюжин (см. Приложение 8). Крупнейшие и самые известные из них — Магеллановы Облака, пара неправильных галактик с продолжающимся звездообразованием. Собственно, именно благодаря ярким молодым звездам эти галактики и прославились. Возможно, Большое Магелланово Облако прежде было небольшой спиральной галактикой с баром, но теперь от нее остался лишь бар с «огрызками» спиральных рукавов. Оба Магеллановых Облака богаты газом, поэтому там часто рождаются звезды, в том числе и очень массивные.

У других наших спутников вся активность осталась в прошлом. Теперь это карликовые сфероидальные галактики, населенные старыми звездами, которые и заметить-то удалось лишь благодаря упорству астрономов, тщательно просеивающих результаты звездных обзоров. Эти галактики не заслужили даже собственных имен; их называют по именам созвездий, в которых они находятся (галактика Печь, галактика Скульптор, галактика Насос и т. п.).

Сейчас популярна теория, согласно которой все крупные галактики образовались в результате слияния большого количества «мелких» звездных систем. С точки зрения этой теории теперешние спутники Млечного Пути — лишь несколько оставшихся «кирпичиков», которым пока не нашлось места в галактическом здании. На справедливость этого предположения указывает карликовая галактика в созвездии Стрелец, которую Млечный Путь поглощает буквально у нас на глазах. Правда, происходит это далеко, на противоположной стороне галактического диска.

Вся «городская агломерация» Млечного Пути простирается на 300 кпк, а уже в 780 кпк от нас расположен другой «мегаполис», центром которого служит Туманность Андромеды (М31) — галактика, похожая на Млечный Путь, хотя и не являющаяся его копией. Она также окружена группой из двух десятков спутников, среди которых

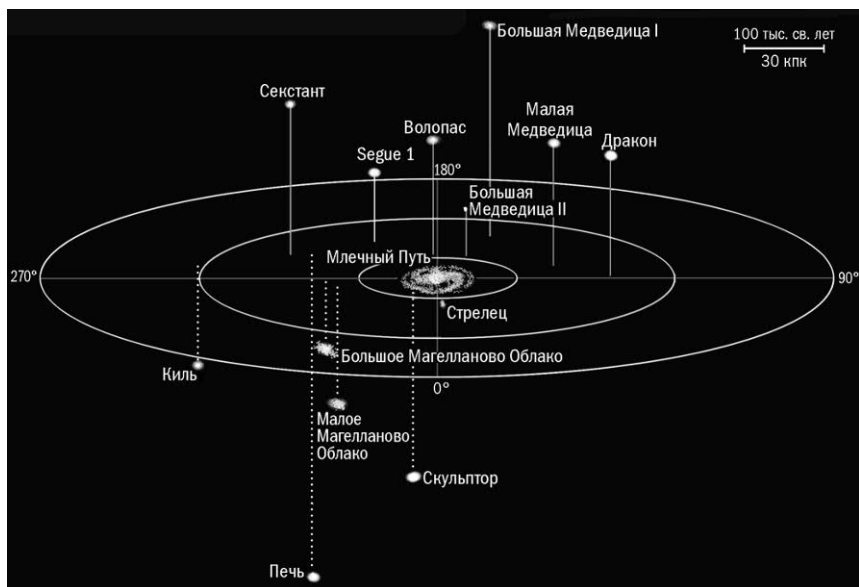


Рис. 4.7. Наша галактика с «пригородами». Расположение карликовых галактик, спутников Млечного Пути, отмечено относительно плоскости галактического экватора; на внешнем круге указана галактическая долгота. Некоторые далекие спутники не показаны.

есть два маленьких эллиптических карлика (M32 и M110). Впрочем, возможно, что и небольшая спиральная галактика M33 является спутником Туманности Андромеды.

Семейства Млечного Пути и Туманности Андромеды вкупе еще с несколькими десятками галактик помельче образуют так называемую Местную группу галактик поперечником примерно 2 Мпк. Изучение распределения галактик показывает, что именно в таких группах сосредоточено наибольшее количество звезд во Вселенной, поэтому неудивительно, что и наше Солнце оказалось в одной из них, а не в каком-либо крупном скоплении галактик. Ближайшее же к нам «настоящее» скопление галактик, насчитывающее тысячи членов, — это известное скопление в Деве (Virgo). Расстояние до него не так велико, около 10 Мпк, что дает повод писать иногда, что Местная группа находится на окраине этого скопления. Но на самом деле это не так важно: понятно, что четких границ между группами нет, и потому зачастую о принадлежности конкретной галактики к группе или скоплению можно говорить лишь с долей уверенности.



Рис. 4.8. Центральная часть Местной группы галактик — подгруппы Млечного Пути и Туманности Андромеды. БМО — Большое Магелланово Облако, ММО — Малое Магелланово Облако.

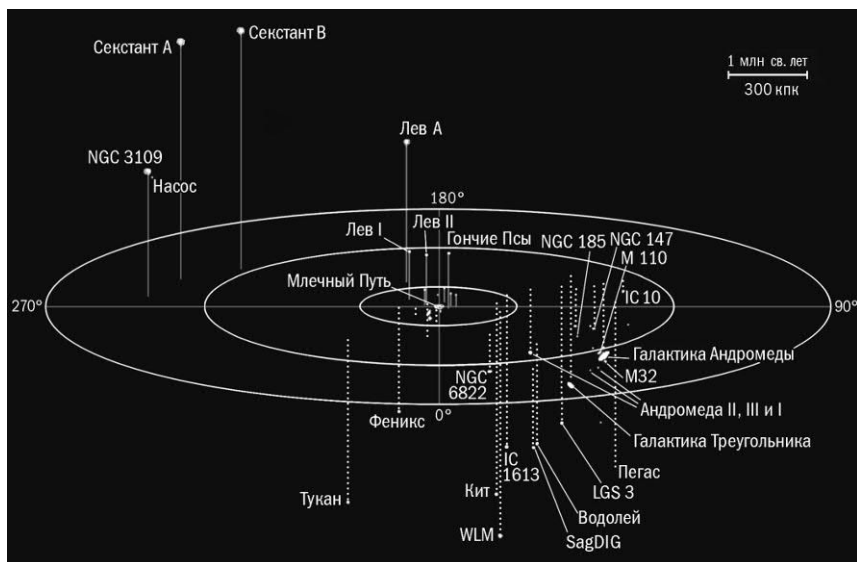


Рис. 4.9. Местная группа галактик и ближайшая соседняя группа Насоса—Секстанта. Расположение галактик показано относительно экваториальной плоскости Галактики. На внешнем круге указана галактическая долгота.

Интересно, что структура многих групп галактик оказывается схожей со структурой Местной группы: они представляют собой пару доминирующих по массе галактик, удерживающих вокруг себя несколько десятков небольших звездных систем. Динамические расчеты по-



Рис. 4.10. Результат тесного сближения двух крупных звездных систем демонстрируют «Мышки» (NGC 4676) — взаимодействующие галактики, расположенные на расстоянии 89 Мпк от нас в направлении созвездия Волосы Верики. Фото: космический телескоп «Хаббл» (NASA, ESA).

казывают, что в будущем большинство членов таких групп ожидает неминуемое слияние. Соответственно, в Местной группе это означает слияние Млечного Пути и Туманности Андромеды. Действительно, по лучу зрения галактика в Андромеде движется к Солнцу со скоростью 301 км/с. Правда, основной вклад в эту скорость вносит движение самого Солнца по галактоцентрической орбите, но и с учетом этого Туманность Андромеды приближается к нашей галактике со скоростью 117 км/с. К сожалению, нам пока неизвестна составляющая ее скорости в перпендикулярном к лучу зрения направлении, однако динамические соображения, в частности вытекающие из анализа движения галактики М33, говорят о том, что в поперечном направлении Туманность Андромеды летит со скоростью, не превышающей 100 км/с. Так что ее сближение с нами так или иначе происходит. Примерно через 4 млрд лет два крупнейших звездных острова Местной группы ожидает если не лобовое столкновение, то уж по крайней мере тесное сближение, в результате которого их структура кардинальным образом изменится.

Как именно произойдет сближение двух галактик и на что будет похожа будущая «Млечномеда», если произойдет слияние, сейчас сказать нельзя, хотя астрономы и пытаются моделировать этот процесс (рис. 7 на цветной вкладке) и искать во Вселенной его аналоги (рис. 4.10). При некоторых вариантах сближения наших галактик Солнце и другие периферийные звезды могут быть выброшены на очень далекие орбиты, которые будут охватывать обе взаимодействующие

системы. Так что у наших потомков будет возможность следить за столкновением с безопасного расстояния! Правда, предварительно им нужно будет найти способ преодолеть неприятные последствия превращения Солнца в красный гигант...

4.4. Положение Солнца в Галактике

Осмотревшись по сторонам в окологалактическом пространстве, вернемся в нашу звездную систему. Мы уже говорили, что Галактику в первом приближении делят на гало, балдж и диск; именно в состав диска входит и наше Солнце. Сам диск также обладает внутренней структурой, разглядеть которую нам, находящимся внутри, практически невозможно. В прошлом ученые в таких случаях нередко призывали на помощь аналогию. Например, Иммануил Кант (1724–1804) предположил, что многие туманности представляют собой подобные Млечному Пути «островные Вселенные» (хотя сам этот термин возник позже — его ввел А. Гумбольдт в 1850 г.). Когда астрономы начали наблюдать туманности в телескоп, оказалось, что на дисках многих из них видны полосы повышенной яркости, исходящие из центра туманности и простирающиеся к периферии диска по спирали. Эти полосы стали называть «спиральными рукавами» или «спиральными ветвями». Поскольку к тому времени аналогия между Млечным Путем и туманностями уже получила хождение, естественно было распространить ее и на более тонкие детали структуры, такие как спиральные рукава.

Первые предположения о том, что наша галактика, подобно прочим туманностям, украшена спиральным узором, высказывались еще в середине XIX в., однако убедительно *доказать* наличие спиральных рукавов в Млечном Пути удалось лишь сто лет спустя, в середине XX в. Дело в том, что из Солнечной системы спиральный рисунок галактического диска не бывает виден никогда, даже в те эпохи, когда в ходе своих вертикальных колебаний относительно центральной плоскости диска наша планетная система вместе с Солнцем поднимается над плотной частью пылевого слоя. Мы удалены примерно на 8,5 кпк от центра Галактики, а приподнимаемся над ее плоскостью не более чем на 85 пк, т. е. на $1/100$ галактоцентрического расстояния. Поэтому свою звездную систему обитатели Солнечной системы всегда видят практически «с ребра», в проекции на довольно узкую полосу небосвода. Различить, где заканчивается один спиральный рукав и начинается другой, очень сложно. А чтобы создать трехмерную модель Галактики, нужны точные данные о расстояниях до различных объек-

тов, но они пока доступны лишь для очень небольшой области пространства вокруг Солнца...

Поэтому астрономам до сих пор не удается окончательно решить вопрос о количестве рукавов в нашей звездной системе. На протяжении долгого времени доминировала четырехрукавная модель с рукавами Персея, Стрельца, Наугольника и Щита—Кентавра. Тут надо отметить, что названия рукавов, расположенных между Солнцем и центром Галактики, окончательно не устоялись. Так, например, рукав Стрельца называют еще рукавом Киля или рукавом Киля—Стрельца, а рукав Щита—Кентавра — также рукавом Креста—Щита: эти области Млечного Пути обильно усеяны звездами.

Новая карта Галактики была построена в 2008 г. по наблюдениям с космическим инфракрасным телескопом «Спитцер», имеющим бериллиевое зеркало диаметром 85 см. Запущенный в 2003 г. на гелиоцентрическую орбиту, он до 15 мая 2009 г. работал в криогенном режиме ($T = 5,5$ К), позволявшем проводить наблюдения в диапазоне от 3 до 180 мкм, а затем продолжил наблюдения при «комнатной» температуре. Поскольку в инфракрасном диапазоне излучения межзвездное поглощение не столь велико, карта Галактики получилась более детальной (рис. 4.11), и на ней — по мнению ее авторов — видно лишь два крупных рукава: Персея и Щита—Кентавра. Рукава же в Стрельце и в Наугольнике являются второстепенными структурами.

Помимо этих двух или четырех спиральных рукавов, в Галактике выделяется несколько менее масштабных ветвей и ответвлений. Возле одного из таких ответвлений, которое по традиции называют рукавом Ориона или просто Местным рукавом, расположено и наше Солнце — примерно посередине между рукавами Персея и Стрельца, на расстоянии 1,5–2 кпк от каждого из них. Вместе со всеми окрестными звездами Солнце летит по орбите вокруг центра Галактики, совершая полный оборот примерно за 240 млн лет со скоростью около 220 км/с. На рис. 4.11 диск Галактики вращается по часовой стрелке, а значит, Солнце движется влево. Этому направлению соответствует галактическая долгота 90° . Помимо общего упорядоченного движения вокруг центра Галактики все окрестные звезды, в том числе и Солнце, совершают сравнительно небольшие взаимные перемещения: по отношению к совокупности близких звезд Солнце сейчас движется со скоростью около 20 км/с в направлении созвездия Геркулес.

Знание современной скорости Солнца и существующее у нас представление о гравитационном поле Галактики позволяют рассчитать форму галактической орбиты Солнца. Если бы поле Галактики

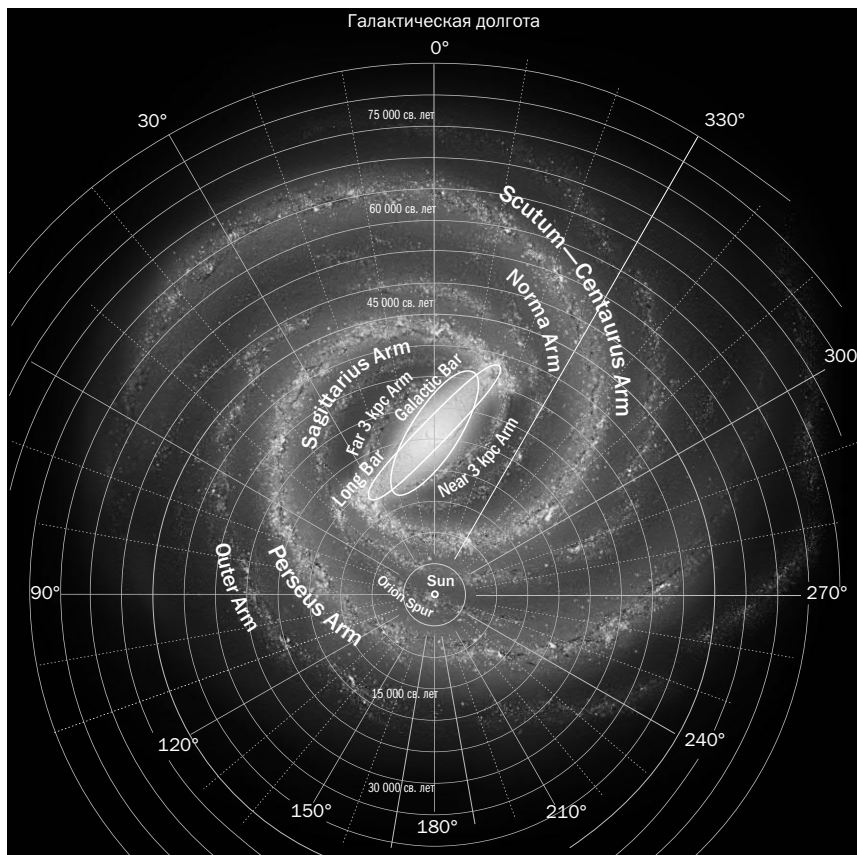


Рис. 4.11. Современная карта спиральных рукавов Галактики, построенная по данным космического телескопа «Спитцер» (NASA). Scutum—Centaurus Arm — рукав Щита—Кентавра; Sagittarius Arm — рукав Стрельца; Perseus Arm — рукав Персея; Norma Arm — рукав Наугольника; Outer Arm — Внешний рукав; Orion Spur — рукав (или отрог) Ориона; Near 3 кpc Arm — ближний 3-килопарсековый рукав; Far 3 кpc Arm — дальний 3-килопарсековый рукав; Galactic Bar — Галактический бар; Long Bar — Длинный бар. Использован рисунок: R. Hurt (Spitzer Science Center), JPL-Caltech, NASA.

было кеплеровым ($F \sim 1/r^2$), то Солнце двигалось бы по слабо вытянутой эллиптической орбите. Но поле Галактики значительно сложнее, поэтому эллипс солнечной орбиты испытывает сильную прецессию в плоскости галактического экватора и небольшие покачивания относительно этой плоскости. В проекции на плоскость Галактики Солнце совершает эпициклическое движение (см. раздел 3.6) с периодом около 170 млн лет. Сейчас мы движемся к центру Галактики и через

20 млн лет окажемся на 0,11 кпк ближе к нему, чем сегодня. А примерно через 100 млн лет удалимся от центра Галактики на 0,57 кпк относительно нынешнего расстояния. Вертикальные колебания Солнце совершает с периодом 70 млн лет. Сейчас оно удалилось от плоскости Галактики всего на 12 пк, но через 15 млн лет достигнет максимальной высоты в 85 пк. Вот тогда центр Галактики станет нам виден значительно лучше. Но получить фотографию нашей звездной системы с такого ракурса, как на рис. 4.11, нам никогда не удастся. Впрочем, кто знает...

4.5. Вокруг Солнца

Ближайшие окрестности Солнца представляют собой довольно скучную картину. (Впрочем, по мнению многих ученых, именно это обстоятельство способствовало появлению жизни на Земле.) Давайте посчитаем, какие объекты находятся в пределах 10 парсеков от Солнца. Например, к началу 2012 г. в пределах расстояния 10 пк от Солнца нам было известно 322 звезды, из которых 248 относятся к красным карликам: это тусклые маломассивные звезды, которые не только вблизи Солнца, но и во всей Вселенной составляют большинство. Так что не верьте утверждениям, будто наше Солнце — рядовое светило: в действительности оно из немногочисленной категории крупных!

Из оставшихся звезд лишь только 20 относятся к тому же, что и у Солнца, спектральному классу G. Кроме того, в радиусе 10 пк были обнаружены 15 коричневых карликов, 20 белых карликов и 11 планетных систем с 19 планетами. Это, разумеется, не все: открытия продолжают и сейчас, судя по тому, что с 2000 по 2012 гг., например, число известных звезд в радиусе 10 пк возросло на 20%. Если так пойдет и дальше, то к 2020 г. в этой области астрономы будут насчитывать около 370 звезд, практически исчерпав этим их поиск. Конечно, это приращение связано исключительно с открытиями красных и коричневых карликов, а уж яркие звезды вблизи Солнца мы пересчитали все. Впрочем, это было не очень сложно: даже умеренно горячих звезд спектрального класса A в рассматриваемой сфере всего 4 светила (среди них и ярчайшая звезда ночного неба — Сириус), а уж более горячих и массивных OB-звезд и вовсе нет. Но так было не всегда. Как мы знаем, в окрестности Солнца хаотические скорости звезд близки к 20 км/с. С такой скоростью звезда проходит расстояние в 20 пк за 1 млн лет. Именно за это время происходит почти полная смена соседей Солнца в этой области. Если перевести это в масштабы привычных для нас отрезков времени, т. е. приравнять срок жизни звезды (10^{10} лет) к продолжитель-

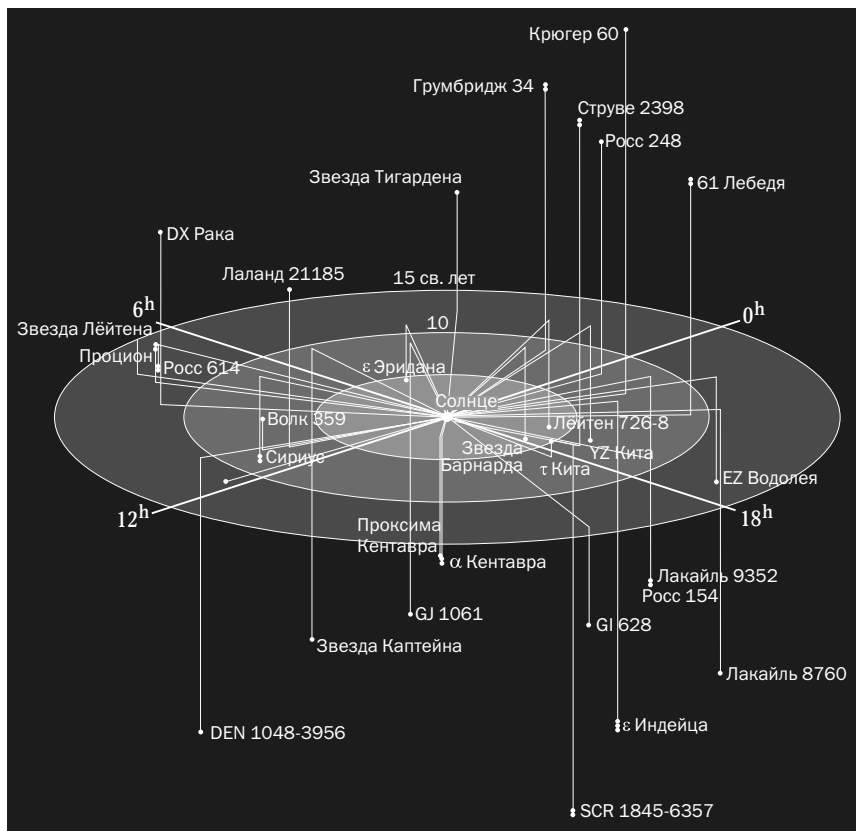


Рис. 4.12. Наиболее близкие к Солнцу звезды, расположенные в пределах 4,3 пк. В этой области всего 32 звезды, включая Солнце, но среди них есть двойные и даже тройные системы; всего как минимум 45 светил, если брать в расчет белые и коричневые карлики. Опорная плоскость — экваториальная; по периметру указаны значения прямого восхождения. Рисунок на основе данных Wikipedia и Hipparcos.

ности жизни человека (80 лет), то смена соседей в этой области происходит за 3 дня: они не роднее для нас, чем соседи в купе поезда Москва—Иркутск. И уж подавно звезды, окружающие нас в нынешнюю эпоху, — не те же самые, что окружали Солнечную систему в эпоху ее формирования. Есть некоторые указания на то, что родилось Солнце в более оживленном месте, но об этом позже.

Несколько слов об объектах, к которым применимо прилагательное «ближайший». Самая близкая к нам звезда — красный карлик Проксима в созвездии Кентавра, удаленная на 1,3 пк. Ближайший коричне-

вый карлик — в системе ϵ Индейца (3,6 пк), ближайший белый карлик — спутник яркого Сириуса А тусклый Сириус В (2,6 пк), ближайшая вне-солнечная планетная система — у звезды ϵ Эридана (3,2 пк).

Звезды, как правило, рождаются группами; некоторые из этих групп существуют сотни миллионов и даже миллиарды лет и наблюдаются нами как звездные скопления. Другие группы недолговечны. На начальном этапе своего существования они выглядят как звездные ассоциации, а затем распадаются и пополняют собой так называемое население звезд поля. Ближайшая к нам ассоциация находится на расстоянии 55 пк и названа по имени одной из входящих в нее звезд — ассоциация TW Гидры. Самое близкое скопление — Гиады, одно из украшений зимнего неба, звездная россыпь, как бы окружающая звезду α Тельца (Альдебаран). Правда, сам Альдебаран к этому скоплению отношения не имеет, так как находится всего в 20 пк от нас, а скопление — в 40 пк.

Впрочем, ситуация с распределением звезд в окрестностях Солнца может оказаться и более сложной. Помимо скоплений и ассоциаций астрономы выделяют еще один вид группировок — движущиеся группы. Они не обладают ярко выраженной скученностью звездных скоплений, занимают большие площади на небе, и убедиться в их существовании удастся, лишь заметив, что некоторые из окружающих нас звезд имеют одинаковые пространственные скорости и напоминают этим эскадрилью самолетов, летящих строем. Поэтому их еще называют «летающие группы» или «движущиеся скопления». Таких групп вблизи Солнца выявлено около десяти; например, в одну из них входят почти все звезды Ковша Большой Медведицы. Случайным сходство скоростей звезд быть не может; очевидно, что члены движущихся групп имеют генетическое родство. Но изучать такие коллективы довольно сложно: необходимо точно измерять расстояния до звезд и все три компонента их скорости. Поэтому относительно членства звезд в этих группах и их границ нередко идут споры. Не исключено, что Солнце находится вплотную к одной из движущихся групп или даже внутри нее, хотя и не является членом этой группы (подробнее см. в главе 5).

4.6. Пояс Гудда

Помимо эфемерных звездных групп, в нашем галактическом «родном краю» есть и более заметная и внушительная структура. Первым обратил на нее внимание сын Вильяма Гершеля Джон (1792–1871), сам известный астроном, продолживший работу отца в Южном полушарии.

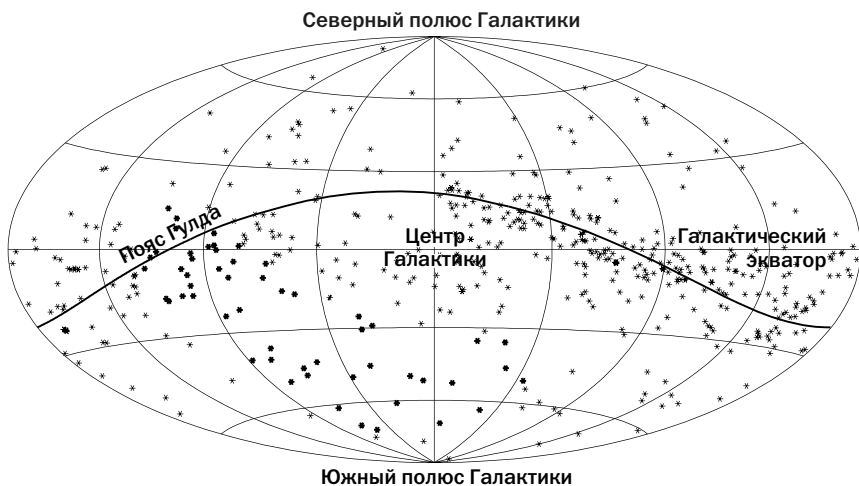


Рис. 4.13. Распределение молодых звезд (спектральный класс В), доступных невооруженному глазу (ярче $5,25^m$) на карте всего неба в галактических координатах. Кривая «Пояс Гулда» — это большой круг небесной сферы, наклоненный на 20° к галактическому экватору.

Именно он в 1847 г. впервые отметил, что яркие звезды южного неба расположены несимметрично относительно Млечного Пути. А в 1879 г. американский астроном Бенджамин Гулд (1824–1896) протянул полукольцо, очерченное Гершелем, через северное небо, показав, что яркие звезды всего небосвода располагаются вблизи большого круга, наклоненного к галактическому экватору под углом около 20° . Это звездное кольцо известно теперь как пояс Гулда. Последующие исследования показали, что Гершель и Гулд не ошиблись — в пояс Гулда действительно входит 90% всех звезд спектральных классов О, В и А в радиусе 1 кпк от Солнца. Кроме того, в этой же области пространства сосредоточено много межзвездного газа. При радионаблюдениях в линии нейтрального водорода на волне 21 см это газовое уплотнение отчетливо проявляется; его принято называть кольцом Линдблада.

По современным данным, пояс Гулда представляет собой эллиптическую структуру размерами примерно 1000×500 пк, наклоненную к плоскости диска Галактики на 20° . Центр этой структуры находится в 100 пк от Солнца, примерно в направлении созвездия Персей. Сама структура расширяется со скоростью несколько километров в секунду, что позволяет оценить ее возраст (поделив размер на скорость) — не более 60 млн лет. Такая оценка подтверждается и тем, что

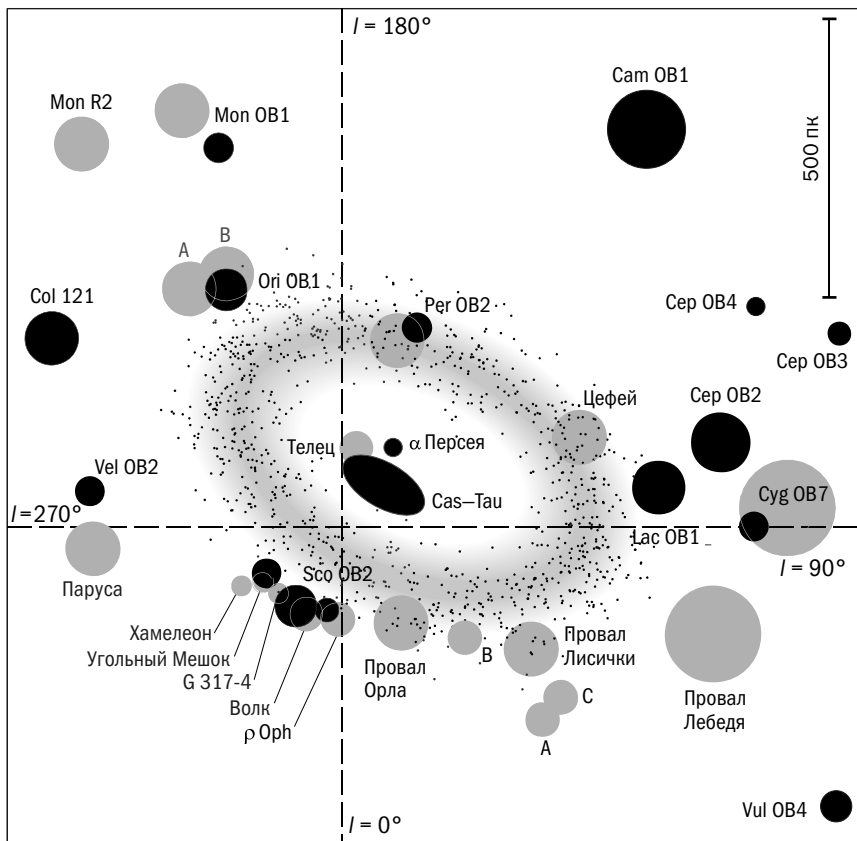


Рис. 4.14. Карта ближайших окрестностей Солнца в проекции на плоскость Галактики. Размер области по диагонали около 2,5 кпк. Солнце расположено в начале галактических координат; направлению на центр Галактики соответствует $l = 0^\circ$.

в состав пояса Гудда входят в основном молодые массивные и мало-массивные звезды, а также молекулярные облака, в которых формирование звезд активно продолжается и в настоящую эпоху. Карта этой области приведена на рис. 4.14. На ней в виде сжатого тора показано газовое кольцо Линдблада, примерно совпадающее с поясом Гудда. Серыми кружками изображены молекулярные облака и погруженные в них молодые скопления, где из газа еще продолжают формироваться звезды, черными кружками — скопления и ассоциации зрелого возраста, уже очистившиеся от газа. Размеры кружков примерно соответствуют размерам этих объектов.

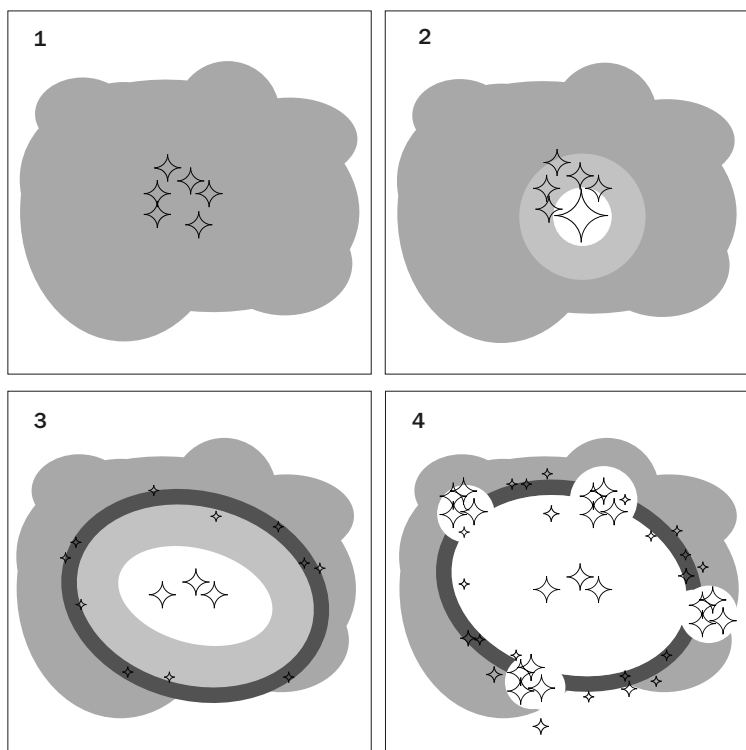


Рис. 4.15. Возможные этапы формирования пояса Гулда. 1 — в гигантском молекулярном облаке 60 млн лет назад родилась звездная ассоциация Кассиопея–Телец (Cas–Tau); 2 и 3 — звездный ветер от массивных звезд и взрывы сверхновых очистили ассоциацию от газа, разрушили облако и создали расширяющуюся оболочку, сгребавшую перед собой межзвездный газ; 4 — в наиболее плотных частях оболочки началось формирование звезд и примерно 15 млн лет назад возникло несколько ОВ-ассоциаций, остатки которых наблюдаются сейчас как пояс Гулда. Po de Zeeuw et al., 2001.

Причины появления пояса Гулда пока неясны. Внешне распределение звезд, газа и областей звездообразования выглядит так, словно несколько десятков миллионов лет назад в этой части Галактики произошел какой-то катаклизм, взрыв, который привел к образованию расширяющейся газовой оболочки. Эта оболочка сгребла окружающий газ, уплотнила его, и в нем началось формирование звезд, которые мы и наблюдаем теперь в виде пояса. В принципе, подобные структуры наблюдаются и в нашей, и в других галактиках. Сейчас считается, что такие сверхоболочки формируются в результате



Рис. 4.16. Скопление Трапеция — часть ближайшей к нам области формирования массивных звезд в комплексе молекулярных облаков Ориона. В центре — четыре яркие звезды, образующие фигуру, давшую название скоплению. Многие его звезды еще окружены плотным газом и пылью и поэтому не видны в оптических лучах. Снимок получен космическим телескопом «Хаббл» в ИК-диапазоне спектра (1,1 и 1,6 мкм).

последовательных вспышек сверхновых в молодых звездных ассоциациях. Нечто подобное могло привести к появлению пояса Гулда, о чем косвенно свидетельствует наличие примерно в его центре остатка крупной в прошлом звездной ассоциации Кассиопеи–Тельца. Однако в рамках этой модели трудно объяснить отмеченное выше свойство пояса — его наклон к галактической плоскости. Другие попытки объяснить происхождение пояса Гулда связаны с гипотезой о столкновении Галактики с межгалактическим газовым облаком,

удар которого по диску Галактики тоже мог произвести эффект взрыва.

Полная масса звезд в поясе Гулда составляет несколько сотен тысяч масс Солнца. Значительная часть звездного населения пояса сосредоточена в одном «коллективе» — в ОВ-ассоциации Скорпиона—Кентавра, ближайшем к нам скоплении горячих массивных звезд. Эта ассоциация включает в себя три подгруппы. Самая молодая из них — Верхний Скорпион с возрастом около 5 млн лет. Две другие — Верхний Кентавр—Волк и Нижний Кентавр—Крест — примерно на 10 млн лет старше. Для звездной ассоциации возраст в несколько миллионов лет можно считать весьма солидным. Он указывает, что эпоха рождения звезд в ассоциации Скорпиона—Кентавра давно уже позади, да и вспышки сверхновых, которыми завершают свой жизненный путь массивные звезды, в этой ассоциации по большей части уже отгремели. Строго говоря, даже название «ОВ-ассоциация» в данном случае не вполне применимо: звезд спектрального класса О в Скорпионе—Кентавре уже практически нет.

Масса газа в поясе Гулда составляет несколько миллионов масс Солнца, причем большая часть этого газа также сосредоточена в одном месте — в комплексе молекулярных облаков в созвездии Орион. В отличие от ассоциации Скорпиона—Кентавра, здесь звездообразование в самом разгаре, и в звездах спектрального класса О недостатка нет. Этот гигантский комплекс массой в несколько сотен тысяч масс Солнца и поперечником в сотню парсеков также состоит из нескольких областей разного возраста: от практически нулевого до нескольких миллионов лет. Причем самые старые области максимально близки к центру пояса Гулда, а самые молодые далеки от него, как и должно быть, если от центра распространяется «волна» звездообразования.

Облака в Орионе — ближайшая к нам область формирования массивных звезд. Там расположены известные всем любителям астрономии объекты — туманность Конская Голова, Большая Туманность Ориона, звездное скопление Трапеция... Именно это скопление возрастом около 0,3 млн лет можно привести как пример разительного контраста между областью активного звездообразования и теперешними окрестностями Солнца. Около 1000 звезд Трапеции сосредоточено в объеме поперечником не более парсека. Это соответствует звездной плотности в тысячи раз большей, чем вблизи Солнца. Да и звезды эти — не чета нашим невзрачным соседям: масса наиболее крупных из них превышает солнечную в десятки раз.

Обилие горячих массивных светил приводит к тому, что Трапедия, да и вся область звездообразования в Орионе, заполнена мощным ультрафиолетовым излучением, что должно делать ее довольно безжизненным местом. Между тем, как считают некоторые ученые, именно на Туманность Ориона походила та область звездообразования, в которой около 5 млрд лет назад возникла протосолнечная туманность. Одним из свидетельств этого является небольшой размер Солнечной системы. В более темных местах (по сравнению с Орионом) протопланетные диски у молодых звезд имеют радиусы до тысячи астрономических единиц, тогда как диск вокруг молодого Солнца вряд ли простирался дальше 50 а. е. Именно такие «усеченные» диски наблюдаются у маломассивных звезд в облаках Ориона — их внешние области нагреваются ультрафиолетовым излучением и рассеиваются в пространстве.

Итак, все звезды очень далеки от нас: даже до ближайшей из них свет идет более четырех лет. Но есть компонент Галактики, с которым мы соприкасаемся непосредственно, — это межзвездная среда. Именно вещество, магнитное поле, космические лучи, заполняющие пространство между звездами, служат тем «интерфейсом», посредством которого Солнце и планеты встраиваются в галактическую экосистему.

4.7. На границе Солнечной системы

Прежде чем говорить о пограничном взаимодействии Солнечной системы с межзвездной средой, полезно задуматься о том, где же именно проходит граница Солнечной системы. До 1990-х гг. подходящим ориентиром казалась орбита Плутона. Но теперь мы знаем, что и за ней присутствует вещество Солнечной системы: за орбитой Плутона лежит пояс Койпера. Точнее, он находится за орбитой Нептуна, поскольку стало ясно, что и Плутон — всего лишь один из крупных объектов пояса Койпера.

Следовательно, нам следует провести границу по внешнему краю пояса Койпера? Но какого именно пояса? Есть классический пояс Койпера, члены которого обращаются вокруг Солнца по почти круговым орбитам между 40 и 50 а. е., как правило, вблизи плоскости эклиптики (хотя встречаются и орбиты с наклонениями до 30°). Именно классический пояс Койпера, по-видимому, очерчивает исходную границу протопланетного диска у молодого Солнца. Однако есть еще и рассеянный пояс Койпера, для объектов которого характерны вытянутые орбиты с перигелием в области орбиты Нептуна и афелийны-

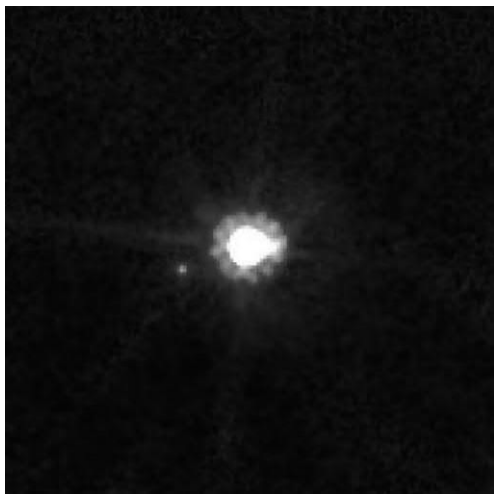


Рис. 4.17. Эрида — один из крупнейших объектов пояса Койпера. Космический телескоп «Хаббл» запечатлел не только эту далекую карликовую планету, но и ее спутник Дисномию. Фото: NASA, ESA, M. Brown (CalTech).

ми расстояниями в сотни астрономических единиц. Именно к рассеянному поясу относится карликовая планета Эрида, названная в честь богини раздора, поскольку именно с ее открытием в среде астрономов начались острые споры о том, следует ли считать Плутон полноценной планетой. Если проводить границу по рассеянному поясу Койпера, то она окажется на расстоянии примерно 150 а. е. Правда, это будет не совсем честно: объекты рассеянного пояса не родились на этих расстояниях, а были выброшены туда тяготением Нептуна. Так что эти пространства нельзя считать «исконными территориями» Солнечной системы; скорее это область ее экспансии.

Наконец, есть планетоид Седна, кандидат в карликовые планеты. Ее афелий удален от Солнца на 937 а. е., а перигелий находится на расстоянии 76 а. е. — это больше предполагаемого радиуса протосолнечного диска и слишком далеко от Нептуна, чтобы переход Седны на столь удаленную орбиту можно было объяснить гравитационными возмущениями со стороны больших планет. О происхождении Седны пока нет единого мнения. Высказываются различные гипотезы, например, что Седна была вырвана из центральной области Солнечной системы тяготением некой звезды, пролетавшей мимо Солнца, или что Седна была захвачена Солнцем из чужой планетной системы в момент тесного сближения с ней — варианты в принципе возможные, но крайне маловероятные.

Седна и еще 8 похожих на нее объектов могут оказаться лишь верхушкой айсберга. В 1950 г. нидерландский астроном Ян Оорт (1900–1992) задался вопросом о происхождении долгопериодических ко-

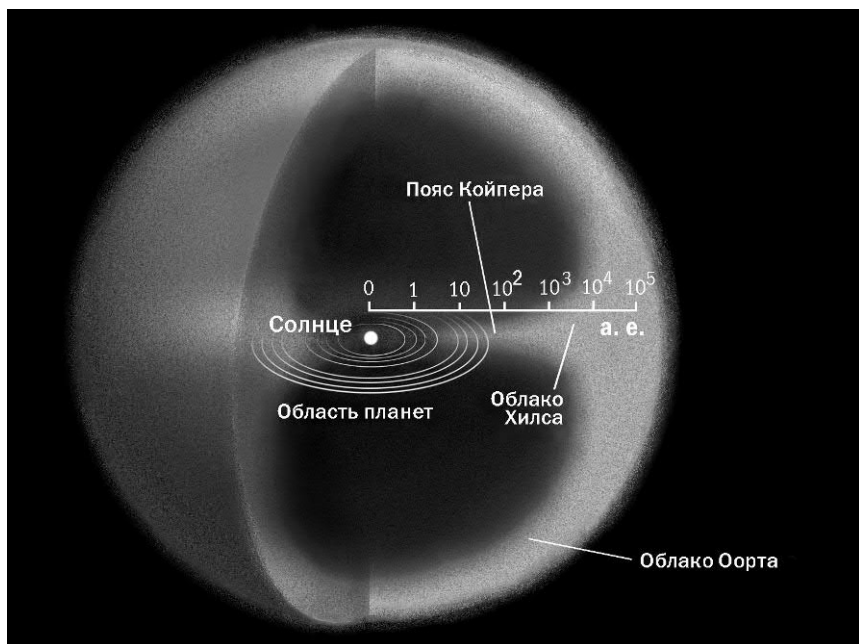


Рис. 4.18. Строение Солнечной системы в логарифмическом масштабе. Кометы в облаке Оорта слабо связаны с Солнцем и подвержены гравитационному влиянию окружающих звезд и других массивных объектов. Поэтому они часто покидают Солнечную систему, но эти потери компенсируются кометами из значительно более населенного облака Хилса, иначе называемого поясом Хилса или внутренним облаком Оорта.

мет. Он обратил внимание на то, что они приходят в центральную область Солнечной системы практически равновероятно со всех направлений. Не означает ли это, что на дальних подступах к Солнцу есть гигантский кометный резервуар, который время от времени под воздействием каких-то факторов поставляет кометы к Солнцу на радость земным наблюдателям? Этот гипотетический резервуар комет называют теперь облаком Оорта. Трллионы холодных кометных ядер должны заполнять эту сферическую область диаметром около парсека. Если бы мы провели границу Солнечной системы по периметру облака Оорта и если бы похожее облако было у α Кентавра, то можно было бы смело сказать, что планетные системы Солнца и α Кентавра почти соприкасаются! Правда, ни планетной системы, ни кометного облака у α Кентавра, по-видимому, нет, да и проводить границу Солнечной системы по облаку Оорта тоже не совсем честно. Его масштабы намного превышают размер любого протопланетного дис-

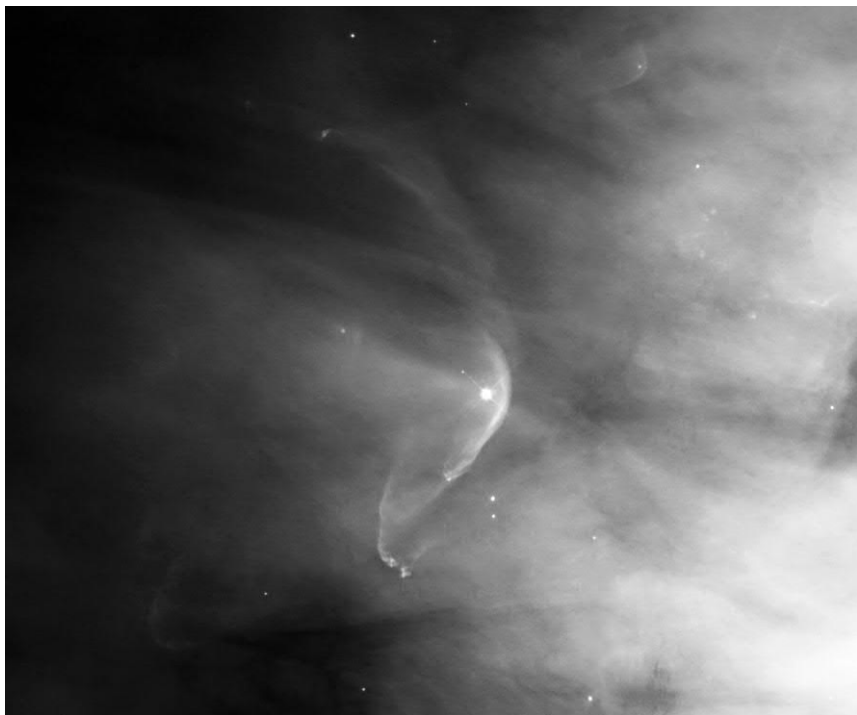


Рис. 4.19. Наблюдать со стороны гелиосферу мы пока не можем, зато можно наблюдать астросферы других звезд. На этом снимке хорошо видна граница «пузыря», выдуваемого в межзвездном газе Туманности Ориона звездой LL Ориона. Фото: «Хаббл» (NASA, ESA).

ка. Так что кометы, вероятно, были вытолкнуты в облако Оорта уже после рождения Солнечной системы, когда в ней сформировались массивные планеты и своим гравитационным влиянием стали расчищать пространство от «мусора».

Вероятно, наиболее естественной границей Солнечной системы следует признать границу гелиосферы — гигантского «пузыря», выдуваемого в межзвездном газе солнечным ветром. С наветренной стороны (примерно в направлении созвездия Змееносец) она простирается примерно на 100 а. е., с подветренной — в два раза дальше. Пограничный слой между межзвездной средой и гелиосферой называется гелиопаузой, и в нем сейчас находятся сразу два функционирующих аппарата, «Вояджер-1» и «Вояджер-2», запущенные NASA в 1977 г. С 2005 г. наблюдались признаки приближения этих аппаратов к гелиопаузе, а в 2012 г. «Вояджер-1» достиг ее на расстоянии 120 а. е. от Солнца. Возмож-

но, к 2014 г. «Вояджеры» выйдут в межзвездную среду. Так что у землян есть два аппарата, которые (с большой натяжкой) уже можно считать межзвездными зондами. К сожалению, функционирующей аппаратурой, которая позволила бы непосредственно изучать физические условия в гелиопаузе и в межзвездной среде, на «Вояджерах» не осталось, и нам приходится довольствоваться только косвенными данными.

Никакие новые экспедиции, которые позволили бы непосредственно изучить дальние подступы к Солнечной системе, пока не планируются. Зонд «New Horizons» (NASA), запущенный в 2006 г., нацелен исключительно на изучение Плутона и пояса Койпера. Исследование межпланетной или межзвездной среды в программе его полета не значатся. Есть два проекта NASA дальних космических зондов — «Innovative Interstellar Explorer» и «Interstellar Probe», — которые позволили бы за пару-тройку десятков лет покрыть расстояние в 200–400 а. е., то есть с гарантией выйти уже не в гелиопаузу, а в межзвездную среду. Но для них пока не названа даже приблизительная дата запуска.

К счастью для исследователей, барьер, выставленный для межзвездной среды солнечным ветром, не идеален и пропускает некоторую часть межзвездных атомов. Так что изучением (конечно, ограниченным) межзвездной среды можно заниматься даже на орбите Земли. Надо сказать, что в эти исследования значительный вклад внесли советские космические аппараты серий «Зонд», «Прогноз» и «Венера». Благодаря им удалось установить параметры газа, через который летит сейчас Солнечная система. Оказалось, что в настоящий момент мы находимся в разреженном космическом облачке, которое астрономы с присущей им изобретательностью назвали Местным межзвездным облаком (МО; Local Interstellar Cloud, LIC). Оно имеет неправильную форму и поперечник около парсека. Солнце вошло в него примерно 100 тыс. лет назад и выйдет, вероятно, через 10–20 тыс. лет.

Это облако очень разрежено: в нем один атом в среднем приходится на объем в $3,5 \text{ см}^3$, т. е. его плотность около $0,3 \text{ атом/см}^3$, или короче — $0,3 \text{ см}^{-3}$, тогда как средняя плотность межзвездной среды в диске Галактики около $0,5 \text{ см}^{-3}$. Возникает вопрос: почему же МО называют облаком, т. е. «уплотнением», а не «разрежением»? Дело в том, что межзвездная среда крайне неоднородна: основной ее объем занят очень разреженным горячим газом с плотностью $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$, а основная доля вещества сосредоточена в компактных холодных облаках с плотностью порядка 10^2 см^{-3} . Чтобы ощутить абсолютный уровень этих цифр, вспомним, что в 1 см^3 комнатного воздуха содержится 10^{19} молекул!



Рис. 4.20. Туманность LHA 120–N 44, окружающая молодое звездное скопление NGC 1929 в Большом Магеллановом Облаке. Массивные звезды этого скопления своим звездным ветром и взрывами сверхновых очистили центральную область от газа, создав горячий пузырь, заключенный в более плотную и холодную оболочку размером 100 77 пк. Возможно, и Местный Пузырь в молодости выглядел так же, но не понятно, куда скрылись породившие его звезды. Фото: VLT ESO.

Температура газа в МО может показаться довольно высокой — около 6000 или даже 7000 К, — однако она не идет ни в какое сравнение с температурой газа, окружающего МО. Исследуя линии поглощения межзвездного газа в спектрах звезд вокруг Солнца, астрономы обнаружили, что на пространственных масштабах порядка 100 пк МО и еще несколько похожих облачков рядом с ним погружены в газ очень высокой температуры (около миллиона кельвинов!) и крайне низкой плотности, менее $0,01 \text{ см}^{-3}$. Этот резервуар горячего газа обычно называют Местным Пузырем (Local Bubble), хотя на самом деле форма этой гигантской каверны довольно сложна. Кроме того, она представляет собой не замкнутое пространство, а скорее туннель или трубу с расширяющимися в обе стороны горловинами, насквозь пронзающую газовый диск Галактики подобно тому, как дымоход камина пронизывает дом.

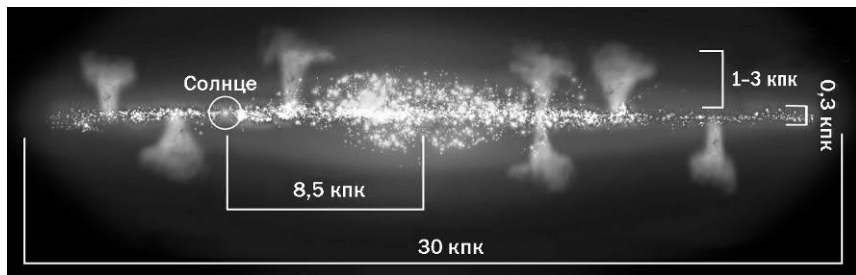


Рис. 4.21. Галактические фонтаны — выбросы горячего разреженного газа из пузырей, возникающих вокруг областей звездообразования.

Причины возникновения Местного Пузыря пока неясны. Поскольку он похож на уже упоминавшиеся сверхоболочки, его происхождение естественно связать со вспышкой сверхновой или нескольких сверхновых. Похожий пузырь могла бы выдуть в межзвездной среде вспышка, случившаяся несколько миллионов лет назад. Интересно, что на возможный близкий взрыв сверхновой, произошедший 1–2 млн лет назад, указывает и значительное количество радиоактивного железа-60, найденное в осадочных породах этого возраста. Но вспышки сверхновых не происходят на пустом месте, а в окрестностях Солнца нет ни одной ассоциации и ни одного скопления, в котором могла бы обитать до вспышки звезда-предшественница. Как уже говорилось, ближайшее к нам место обитания молодых массивных звезд — это ассоциация Скорпиона–Кентавра, но расстояние до нее более 100 пк, к тому же сейчас она находится за пределами Местного Пузыря (подробнее см. в главе 5).

Так или иначе, приходится признать, что в последние десятки миллионов лет вблизи теперешнего положения Солнца происходило немало драматических, если не сказать катастрофических, событий. Не угрожает ли нам столь же беспокойное будущее?

4.8. Галактическая экология

Космос кажется нам бесконечно далеким и бесконечно отстраненным от жизни человечества. И тем не менее было бы глубокой ошибкой рассматривать эволюцию Земли и всей Солнечной системы в отрыве от эволюции Галактики. Да, последние несколько миллионов лет мы спокойно плывем сквозь пустоту Местного Пузыря, не встречая сколько-нибудь значительного сопротивления межзвездного газа, надежно защищенные от космических лучей щитами гелиосферы, гео-сферы и атмосферы, окруженные скучными, но зато совершенно безо-

пасными соседями-звездами. Тем не менее в Галактике имеется несколько факторов, способных серьезно нарушить это благоденствие.

Разумеется, нам не поздоровится, если рядом вспыхнет сверхновая. Однако расчеты показывают: чтобы разлетающаяся оболочка смогла продавить гелиосферу до орбиты Земли, взрыв должен произойти очень близко, не дальше нескольких парсеков от нас. Увеличение потока космических лучей, связанное со вспышкой, окажется небезопасным на значительных расстояниях, порядка 20–30 пк. Влияние космических лучей будет как минимум двояким: они способны разрушить озоновый слой атмосферы, защищающий нас от ультрафиолетового излучения Солнца, и повысить эффективность образования облачного покрова, что приведет к остыванию атмосферы. Но с этой стороны нам беспокоиться не стоит: сближение ни с какой потенциальной сверхновой нам в обозримом будущем не грозит. На примете у астрономов лишь красный сверхгигант Бетельгейзе, которому предстоит взорваться в ближайший миллион лет, но расстояние до него около 200 пк.

Конечно, поток космических лучей может возрасти не только из-за близкой вспышки сверхновой. Есть исследования, авторы которых пытаются найти периодичность в эволюции земной биосферы, в частности периодичность массовых вымираний, и связать их с периодичностью усиления потока космических лучей, падающих на Землю. Такая периодичность может возникать при прохождении Солнечной системы сквозь области с повышенной плотностью космических лучей — спиральных рукавов или плоскости галактического диска. Какие-то корреляции между развитием биосферы и космическими лучами как будто обнаруживаются, но сколько-нибудь широкого распространения эта гипотеза пока не получила.

При пролете Солнечной системы через области с повышенной звездной плотностью нас подстерегает еще одна опасность. Участвовавшие сближения со звездами будут возмущать облако Оорта, что приведет к усилению кометной бомбардировки в центральной области Солнечной системы, в том числе и на Земле.

Наконец, не нужно забывать, что Местный Пузырь не бесконечен, и мы рано или поздно подлетим к его стенке. Вхождение в плотную межзвездную среду вызовет сжатие гелиосферы, что опять же усилит воздействие космических лучей на Землю. Кроме того, непосредственное выпадение межзвездного вещества в атмосферу Земли также приведет к нежелательным последствиям. Межзвездная пыль повысит непрозрачность земной атмосферы, вызвав эффект, схожий с

эффектом «ядерной зимы». Межзвездный водород (а межзвездный газ — это, по сути, водород с небольшой примесью гелия и ничтожно малым количеством других элементов) начнет вступать в реакцию с атмосферным кислородом, превращаясь в воду. Вода будет выпадать на поверхность Земли в виде дождя, а земная атмосфера будет при этом терять кислород... Правда, исследователи утешают: чтобы в результате этого процесса кислород из земной атмосферы исчез полностью, Земля должна попасть в облако, плотность и размер которого существенно превышают соответствующие параметры любых молекулярных облаков в нашей Галактике.

В целом слишком уж опасаться Космоса, наверное, не стоит. В конце концов, Солнце с планетами странствует по Млечному Пути уже без малого пять миллиардов лет, совершив за это время более двадцати оборотов вокруг галактического центра. Наверняка на этом долгом пути Солнечной системе встречалось всякое: взрывались сверхновые, пролетали в опасной близости звезды, темной пеленой вставали на пути газово-пылевые облака... И все это время на Земле медленно, но уверенно развивалась жизнь, которой не помешали ни кометы, ни космические лучи, ни даже катастрофа, приведшая к образованию Пояса Гулда. И если мы убережем наш теперешний дом — Землю — от самих себя, то однажды понятным и уютным домом для нас станет вся Галактика. И тогда ее исследование будет не более чем обычным краеведением, а заниматься им будем мы — местное население, для которого Галактика — край родной.

Литература

- Бочкарев Н. Г. Местная межзвездная среда. М.: Наука, 1990.
- Еремеева А. И. Вселенная Гершеля. М.: Наука, 1966.
- Уитни Ч. Открытие нашей Галактики. М.: Мир, 1975.
- Струве О., Зебергс В. Астрономия XX века. М.: Мир, 1968.
- Лейзер Д. Создавая картину Вселенной. М.: Мир, 1988.
- De Zeeuw P. T., Hoogerwerf R., de Bruijne J. H. J., Brown A. G. A., Blaauw A. Gould Belt // Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. Paul Murdin, ed. London: Institute of Physics Publishing Ltd and Nature Publishing Group, 2001.



ДВИЖУЩИЕСЯ ГРУППЫ ЗВЕЗД: ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА ЗЕМНЫЕ СОЗВЕЗДИЯ

А. И. Дьяченко

Многие века люди видят звезды на небе в одних и тех же, почти не меняющихся конфигурациях. Еще в древности их объединили в созвездия, которые стали настолько привычными, что мысль о родстве звезд в пределах одного созвездия кажется нам вполне разумной. Светила же, находящиеся в противоположных концах небосвода, едва ли кому-нибудь придет в голову назвать «единоутробной родней». Но, оказывается, здесь земная логика нас подводит. Если подняться над Галактикой и измерять время миллионами лет, то выявится истинное родство ночных светил и иллюзия «неизменных» созвездий распадется в пыль. Одним из первых, кто столь непривычно взглянул на звезды, был американский астроном Олин Эгген (Olin Eggen, 1919–1998).

5.1. Звезда-скароход

Существует древнее, проверенное временем средство от долгой разлуки. Для этого расстающиеся должны выбрать на небе звезду и каждый вечер в условленное время обращать к ней свой взор. Знать, что близкий тебе человек смотрит сейчас на ту же звезду, — поверьте, очень сильное чувство, почти прикосновение. Средство это было проверено мною в августе 2002 г., причем в качестве посредника мы с женой выбрали оранжевый Арктур — α Волопаса, который легко найти на небе в это время года над западным горизонтом.

К моменту возвращения домой у меня по вполне понятным причинам сложилось особое отношение к этой звезде. Захотелось узнать о ней чуточку больше, чем сообщает ее древнегреческое имя Арктур — «страж медведя» (по-гречески *арктос* — медведь). Начал читать и... потрясенный, со следующего вечера смотрел на эту звезду

уже совсем другими глазами. А началось все с одного маленького факта: оказалось, что Арктур необычно быстро перемещается по небосводу.

Быстро движущиеся звезды — явление хорошо известное астрономам и даже любителям этой науки. Кто, к примеру, не слышал о знаменитой звезде Барнарда из созвездия Змееносец, которая мчится по небу относительно соседних звезд со скоростью около 10 в год? Ее так и называют — Летящая. Если бы в детстве мы смогли заметить ее положение относительно соседей, то, выйдя на пенсию, без труда отметили бы ее перемещение. Но, к сожалению, без телескопа это сделать невозможно: Летящая звезда Барнарда — красный карлик со светимостью в 2000 раз меньше, чем у Солнца; это маленькое холодное светило, которое, несмотря на свою близость к нам (6 св. лет), все равно недоступно невооруженному глазу. А вот Арктур, хотя он тоже красный, но зато гигант! Свою размеренную жизнь на главной последовательности он уже окончил. Светимостью он более чем в сотню раз превосходит Солнце. Именно поэтому Арктур, расстояние до которого 11,2 пк (36,7 св. лет), — одна из ярчайших звезд нашего неба.

Все это — известные факты, которые ничем особенно не выделяют Арктур на фоне остальных звезд небосвода, где красных гигантов разного калибра даже невооруженным глазом можно увидеть великое множество. Но есть «номинация», в которой Арктур оказался в числе чемпионов: среди ярчайших звезд он занимает второе место после α Кентавра по величине собственного движения по небу, перемещаясь на 2,3 в год! С Альфой Кентавра все понятно: расстояние до нее всего 4 св. года, поэтому ее 3,7 в год обязаны весьма умеренной пространственной скорости этой звезды относительно Солнца, всего 32 км/с. А вот Арктур, который в девять раз дальше, действительно мчится: его скорость относительно Солнца 122 км/с!

Впервые быстрое перемещение Арктура относительно соседних звезд заметил Эдмонд Галлей еще в 1718 г. Получается, что Арктур — мимолетный гость в семье наших созвездий. Сейчас он как раз оказался почти на минимальном расстоянии от Солнца (отсюда его очень маленькая радиальная скорость, всего -5 км/с). Этот гигант появился на нашем небе всего полмиллиона лет назад. Ранние неандертальцы видели его как рядовую звездочку в созвездии Дракон, а через 20 тысяч лет Арктур уже «получит прописку» в Деве. Еще через полмиллиона лет для невооруженного глаза он скроется из виду навсегда.

И все же быстрое движение — не самая жгучая тайна этого стремительно пролетающего через наш уголок Галактики звездного странника. Главная его тайна впереди.

5.2. Летящие группы Эггена

Большинство астрономов XX в. пришло в науку стандартным путем: школа, университет и затем сразу погружение в среду профессиональных ученых. У американца Олина Эггена этот путь оказался гораздо более длинным и эксцентричным. Он родился на ферме в местечке Рок-Каунти (шт. Висконсин) в семье с норвежскими, немецкими и английскими корнями. Трудности, вставшие в 1920–1930-е гг. перед фермерами США, в равной степени легли и на плечи родителей, и на плечи детей, а Олин был старшим из трех. В классе, где он учился, до конца обучения дошло всего 14 человек. «Девизом нашего класса, — вспоминает Олин, — были слова „Настойчивость преодолевает всё“. В условиях Великой депрессии, когда многие дети не могли получить даже среднего образования, этот девиз был очень актуален».

Окончив в 1940 г. Висконсинский университет, Олин начинает свою карьеру как... официант, затем бармен и даже пианист в ночном клубе. Вторая мировая война круто изменила его жизнь. Олин приглашают на работу в Бюро стратегических служб, и он отправляется в качестве тайного агента в Германию, выдавая себя за торговца подшиппниками. После окончания войны по миру стали распространяться научно-фантастические романы никому не известного автора Нило Неггэ... Даже если бы кому-то в ту пору пришло в голову прочитывать это имя справа налево, вряд ли оно показалось бы знакомым.

Прервав карьеру военного в чине капитана и вернувшись в 1948 г. домой в Висконсин, Олин наконец защищает диссертацию, получает ученую степень и находит должность ассистента



Рис. 5.1. Астроном Олин Эгген. Снимок сделан между 1966 и 1977 гг., когда Олин возглавлял обсерваторию Маунт-Стромло (Австралия).



Рис. 5.2. Олин Эгген у 20-дюймового телескопа Гринвичской обсерватории (1950-е гг.).

в Ликской обсерватории (Калифорния). Там он в совершенстве осваивает фотометрию с использованием разработанных еще во время войны фотоумножителей (ФЭУ), которые десятикратно повысили точность измерения блеска звезд и довели ее до 1%. В дальнейшем среди астрономов авторитет Эггена как виртуозного наблюдателя никогда не подвергался сомнению. Но его карьера была отнюдь не гладкой. Вот ее основные этапы: главный ассистент Гринвичской обсерватории в Англии (1956–1961), профессор астрономии Калифорнийского технологического института и астроном-наблюдатель на обсерватории Маунт-Вилсон (1961–1966), директор горячо любимой им об-

серватории Маунт-Стромло в Австралии (1966–1977) и, наконец, астроном-наблюдатель Межамериканской обсерватории Серро-Тололо в Чили (1977–1998).

Однажды Олин признался: «На самом деле я всегда ненавидел наблюдать — провести всю ночь в темной и холодной башне! Бр-р-р...» Но на вопрос, почему он не поручил это кому-нибудь из своих ассистентов, Олин с улыбкой ответил: «Просто я не знаю человека, который мог бы получить данные с достаточной для меня точностью». И это не было бахвальством: мастерство Олина в работе с фотоумножителями и другой астрономической техникой было общепризнанным. В памятной речи, сразу после ухода Олина из жизни, один из его коллег по Межамериканской обсерватории признался: «Когда я впервые прибыл сюда в 1980 г. для проведения фотоэлектрических измерений на 60-дюймовом телескопе и узнал, что меня будет инструктировать сам Эгген, у меня задрожали коленки». Подводя итог своей 50-летней астрономической карьеры, Олин опубликовал мемуары под названием «Life in the Dark».

Наибольшую известность Эггену принесла его совместная статья с английским теоретиком Дональдом Линден-Беллом и американским астрономом Алланом Сэндиджем, посвященная теории формирования Галактики (Eggen et al. 1962). Вклад Эггена в эту работу состоял в получении данных о движении 221 маломассивной звезды, среди которых многие «помнят» эпоху рождения и ранней динамической эволюции Галактики. Вычислив галактические орбиты этих звезд, авторы статьи обнаружили, что чем меньше содержание тяжелых химических элементов в атмосфере звезды (т. е. чем она старше), тем больше эксцентриситет ее орбиты и тем выше над плоскостью Галактики она поднимается. На этом основании авторы сделали вывод, что Галактика формировалась в ходе быстрого ($\sim 10^8$ лет) сжатия протогалактического газового облака. Эта статья включена в список 100 наиболее значимых астрономических работ XX в. и не потеряла актуальности до сих пор. Среди астрономов она известна под аббревиатурой ELS, по первым буквам имен ее авторов — Eggen, Lynden-Bell, Sandage.

Однако наш рассказ посвящен другой заслуге Олина Эггена — введенному им понятию «движущихся звездных групп» (moving groups of stars). Самая известная из них — несомненно, группа Гиад, ядром которой служит звездное скопление Гиады. Главная идея, которую Олин хотел проиллюстрировать прямо на небе, заключается в том, что если звезды рождаются группами (т. е. в компактных скоплениях или более обширных ассоциациях и даже комплексах), они должны

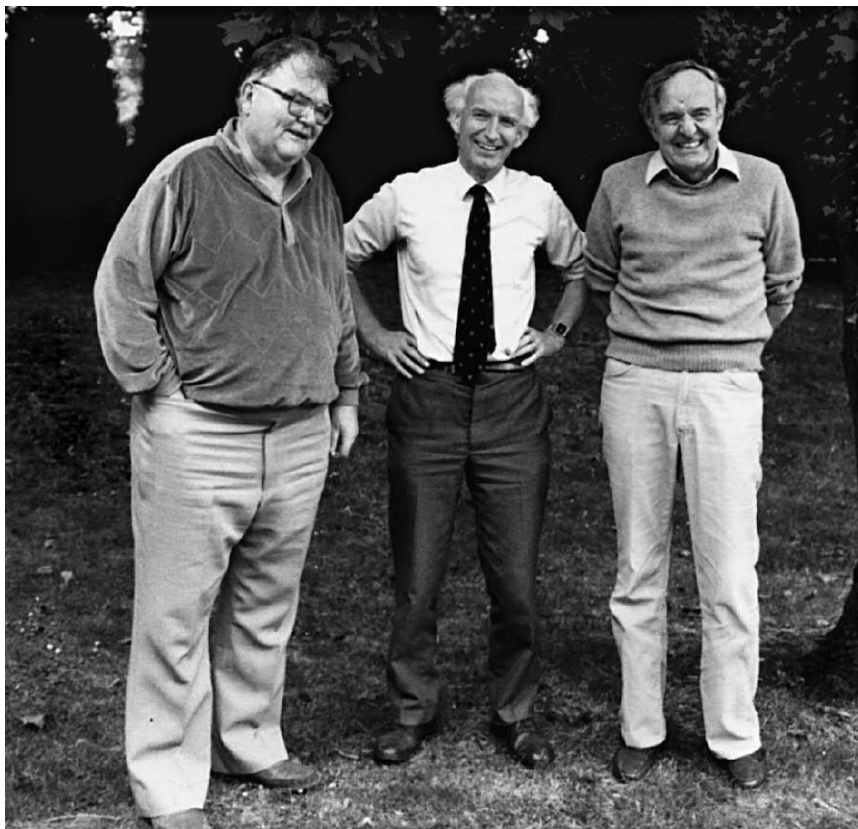


Рис. 5.3. Эгген, Линден-Белл и Сэндидж — авторы бессмертной работы ELS, посвященной формированию Галактики и кинематике ее старейших звезд. Снимок сделан на обсерватории Серро-Тололо в 1995 г.

иметь очень похожие пространственные скорости в Галактике, унаследованные от родительского облака. После рождения, рассуждал Олин, их скорости различаются лишь незначительно из-за медленно хаотического блуждания звезд внутри скопления. Двигаясь по галактической орбите, скопление вследствие своих конечных размеров и приливного эффекта неизбежно должно растянуться вдоль орбиты и принять длинную трубкообразную форму. Гигантский пример этого эффекта можно видеть на снимке галактики NGC 5907 (с. 16 цветной вкладки). Это последний этап коллективной жизни бывших членов скопления, который еще можно заметить с Земли. Если Солнцу случится оказаться внутри такой трубки, то очевидно, что входящие в нее звезды будут разбросаны по всему небу у нас над головой. Как

же их выделить на фоне множества других звезд? Прежде всего — по их схожим пространственным скоростям.

В конце 1950-х гг., когда Олин решил проверить свою идею, определение пространственных скоростей звезд невероятно осложнялось отсутствием надежных параллаксов. Фактически это было главным препятствием, которое, к счастью, не охладило энтузиазм Эггена. В результате многолетней работы по сбору собственных движений и параллаксов звезд, которую он начал еще будучи сотрудником Гринвичской обсерватории и продолжал потом фактически до конца жизни, Олин нашел на небе почти тысячу звезд, которые, с его точки зрения, входили в большие звездные потоки. С тех пор их нередко (и по праву) называют движущимися группами Эггена. Вот некоторые из них: поток Гиад, поток Вольф 630, поток Сириуса, поток 61 Лебеда, поток γ Льва, поток σ Кормы и, наконец, движущаяся группа Арктура (вот мы и вернулись к нему!).

Группировка звезд в потоки отлично видна на рис. 5.4. Как известно, положение объектов в Галактике относительно Солнца принято указывать в прямоугольной системе координат X, Y, Z , оси которой направлены к центру Галактики (X), в сторону вращения диска Галактики (Y) и в направлении северного полюса Галактики (Z). Компоненты пространственной скорости звезд (U, V, W) указывают в этой же системе координат, принимая за ноль скорость движения вокруг центра Галактики по круговой орбите, проходящей через Солнце. Само Солнце движется не совсем по круговой орбите, поэтому компоненты его скорости в этой системе координат ненулевые (см. раздел 3.1): $U_0 = 10,0 \pm 0,4$ км/с, $V_0 = 5,2 \pm 0,6$ км/с, $W_0 = 7,2 \pm 0,4$ км/с. Но в масштабе рис. 5.4 эти значения так малы, что можно считать Солнце расположенным в начале координат. Как видим, в своем движении в галактической плоскости звезды образуют несколько групп, или потоков, что хорошо иллюстрирует идею Эггена. К примеру, звезды потока Гиад почти не отстают от галактического вращения в окрестности Солнца, зато ощутимо удаляются от центра Галактики ($U \sim -40$ км/с). Группа Арктура существенно отстает от остальных. Эллипсами отмечены три компактные (в смысле разброса скоростей) группы: Плеяд, Кастора и IC 2391, для которых не указаны значения скоростей их отдельных звезд.

После завершения работы астрометрического спутника «Гиппаркос» в 1997 г. точность измеренных параллаксов звезд в окрестностях Солнца существенно возросла. На основании новых данных многие исследователи провели тщательную проверку реальности существо-

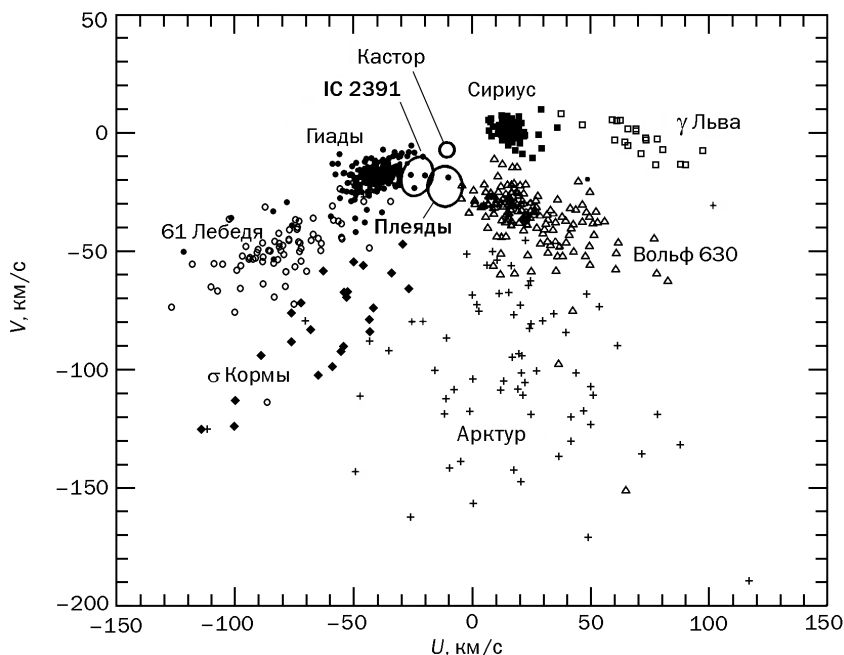


Рис. 5.4. Скорости движения ближайших звезд в плоскости галактики относительно скорости кругового галактоцентрического движения в окрестности Солнца. Компонент скорости U направлен к центру Галактики, компонент V — в направлении вращения диска Галактики. Указаны названия движущихся групп.

вания групп Эггена. Его идея в целом блестяще подтвердилась — потоки выделились еще четче. Правда, грубый критерий отбора звезд, использованный Эггеном, был заменен более точным; некоторые звезды пришлось исключить из потоков, некоторые — добавить. Но в целом картина от этого не изменилась.

Принадлежащие этим потокам светила имеют не только схожие пространственные скорости, но и близкий возраст, а также почти одинаковый химический состав. Главное различие между ними состоит в эволюционном статусе, но это очевидным образом следует из разброса начальных масс: массивные звезды эволюционируют быстрее. Все это тоже свидетельствует в пользу гипотезы Эггена об общем происхождении звезд движущихся групп — бывших скоплений, которые со временем частично или полностью «испарились» и вытянулись в трубки. Теперь они представляют собой «жидкие» потоки, иногда с небольшими плотными ядрами, как, например, Гиады и Ясли. В обширный поток Гиад входит еще множество звезд по всему небосводу, воз-

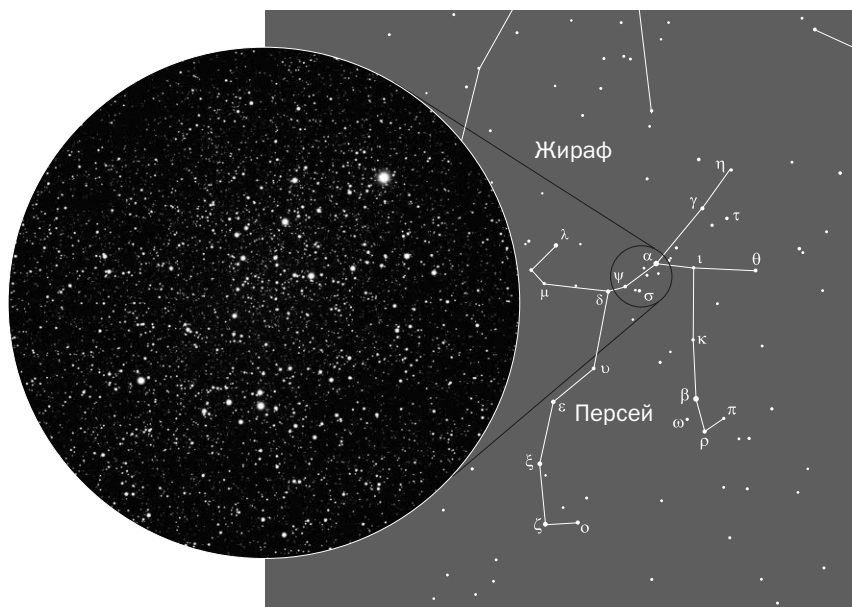


Рис. 5.5. Скопление около Альфы Персея (α Per, на фото — яркая звезда выше и правее центра). Это ядро подгруппы B2 звездного потока Плеяд. Помимо ядра в Персее, подгруппа B2 включает в себя некоторые звезды из других ОВ-ассоциаций пояса Гулда, например из ассоциации Цефей OB6.

растом около 600 млн лет, включая Альдебаран. Но прежде чем мы раскроем тайну Арктура и его группы, давайте познакомимся с некоторыми другими, менее загадочными потоками.

5.3. Поток Плеяд и Местная Труба

Движущаяся группа Плеяд объединяет в себе звезды с пространственными скоростями, близкими к скорости звездного скопления Плеяды. Другое название этого потока — Местная ассоциация. В целом она молодая, но в ней несколько подгрупп, возрасты которых заметно различаются: от 20 до 150 (возможно, до 300) млн лет. Ядра этих подгрупп широко разбросаны вокруг Солнца. Самые молодые из них — это подгруппа B1 с ядром в ассоциации Скорпиона–Кентавра и подгруппа B2 с ядром в скоплении Персей OB3. Любителям астрономии оно известно как скопление около звезды α Per, яркого белого сверхгиганта, также принадлежащего потоку Плеяд.

Интерес к подгруппе B1 у астрономов сегодня особый. Он связан с загадкой, непосредственно касающейся нашей Солнечной системы.

Хорошо известно, что в настоящее время гелиосферу Солнечной системы (т. е. область, заполненную довольно плотной плазмой солнечного ветра) окружает весьма протяженная область очень горячего (~ 1 млн К) и чрезвычайно разреженного ($\sim 0,01$ частицы/см³) газа, который полностью ионизован и пронизан мягким рентгеновским излучением. Фактически гелиосфера плавает в этом разреженном межзвездном веществе, как горошина в океане. Этот океан горячей плазмы еще недавно называли Местным Пузырем. Разумеется, «местный» он по галактическим масштабам: его поперечник достигает нескольких сотен световых лет. Что касается «пузыря», то его форма отличается от сферической. Более того, изучение его строения показало, что «пузырь» имеет плотные стенки лишь в направлении низких галактических широт (т. е. в диске Галактики) и не имеет четких границ в области высоких широт, т. е. он свободно открывается в пространство над диском, заполненное столь же горячим газом галактической короны, что и внутри «пузыря». Поэтому в последнее время его все чаще именуют Местной Трубой (Local Chimney), протыкающей диск насквозь.

Местную Трубу заполняет раскаленный газ массой порядка $1000 M_{\odot}$. Он буквально заливает пространство потоками мягкого рентгена, излучая его с мощностью $5 \cdot 10^{29}$ Вт. Удельная (на единицу массы) светимость этого разреженного остывающего газа такая же, как у Солнца, в котором идут термоядерные реакции! Астрономы очень хотели бы понять, какой процесс «закачал» в газ эту энергию. В основном рассматриваются два механизма образования такой разогретой полости в диске Галактики: мощный звездный ветер горячих массивных звезд в очаге недавнего звездообразования и вспышки сверхновых. Впрочем, первое без второго никак не обходится. Главная проблема в том, что, видя вокруг себя эту огромную область горячего разреженного газа, мы совершенно не находим в ней следов недавнего звездообразования. Скоплений со звездами ранних спектральных классов внутри Местной Трубы попросту нет. Как говорится, картина преступления налицо, а преступников и след простыл!

Выдвигались гипотезы с привлечением «убегающих ОВ-звезд» (OV-runaway star). Можно представить, что из какой-нибудь недалеко от Солнца активной области звездообразования некоторый динамический процесс (например, разрыв тесной двойной системы) выбросил на приличной скорости одну из массивных звезд. Можно вообразить, что она случайно взорвалась, пролетая именно около Солнца. Слабое место этой гипотезы в том, что энергии одной сверхновой

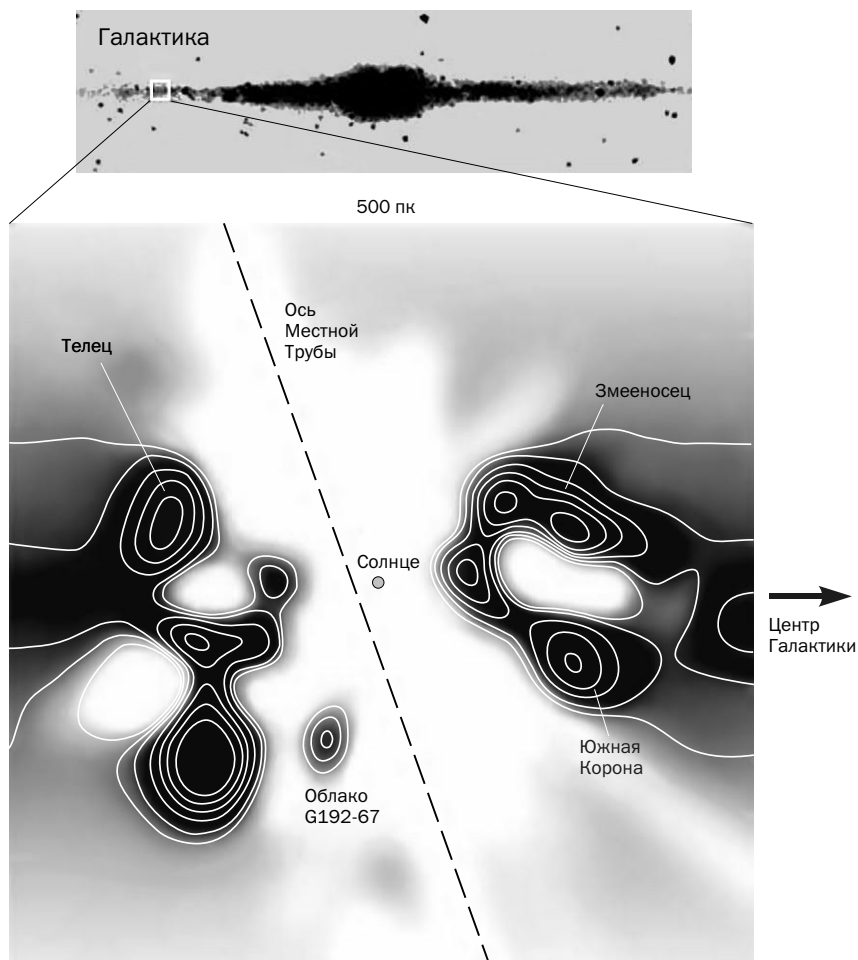


Рис. 5.6. Сечение Местной Трубы плоскостью, проходящей через Солнце, перпендикулярно диску Галактики. Более плотные и холодные области показаны темным цветом.

на создание Местного Пузыря/Трубы едва ли хватит. К тому же, как выяснилось сравнительно недавно, газ в Трубе неоднороден: внутри нее попадаются более плотные области с температурой всего лишь несколько десятков тысяч кельвинов. Это отдельные островки теплой фазы межзвездной среды, и Солнечная система сейчас как раз пробирается через небольшое облачко с температурой около 6000 К. Таких облачков в окрестностях Солнца несколько; их называют Местным Пухом (Local Fluff). Одним взрывом такую картину не

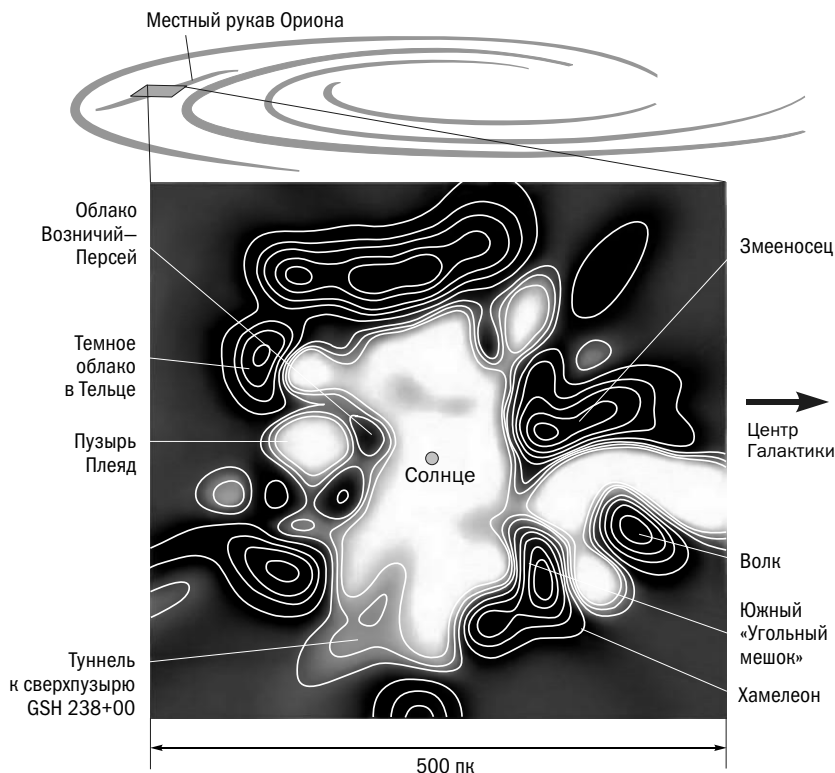


Рис. 5.7. Сечение Местного Пузыря/Трубы плоскостью Галактики.

объяснить. Забросить же сюда одновременно из разных ассоциаций сразу несколько массивных звезд — такая возможность выглядит крайне маловероятной.

И все же косвенные свидетельства былых взрывов поблизости от Солнечной системы есть. Их нашли и в космосе, и... на дне океанов. Первые — это молодые горячие одиночные нейтронные звезды, обнаруженные в окрестностях Местной Трубы в последние годы. Правда, внутри не найдено ни одной, но мы помним, как стремительно они убегают с места рождения. И к тому же молодые, но подостывшие за несколько миллионов лет нейтронные звезды могут излучать энергию в узких конусах мимо Земли, оставаясь невидимыми даже в пределах Трубы. Вторая улика еще красноречивее: в донных железо-марганцевых отложениях Тихого океана (которые растут очень медленно, всего на 2–5 мм за миллион лет, и служат естественной геологической летописью) обнаружены слои с избытком редкого изотопа желе-

за ^{60}Fe . Возраст этих слоев — лишь несколько миллионов лет, а изотоп ^{60}Fe — прекрасный маркер: он выбрасывается сверхновыми в больших количествах и почти не порождается космическими лучами в метеорном или атмосферном веществе, оседающем на Землю, в частности на дно океанов. Как быть? Где искать ту область звездообразования, которой принадлежали эти сверхновые?

Вот тут-то и пригодились звездные потоки Олина Эггена. Идея проста: если сегодня внутри Местной Трубы нет подходящего скопления или ОВ-ассоциации, а взрывы сверхновых гремели «еще вчера», значит, молодое скопление здесь было — но тоже «вчера», а теперь улетело! Надо выбрать на небе самые молодые звездные потоки, возраст которых допускает существование в них несколько миллионов лет назад массивных звезд-прародителей сверхновых, и посмотреть, не пролетали ли их ядра в прошлом через Местную Трубу.

Самым подходящим кандидатом оказался поток Плеяд, а точнее, его наиболее молодая подгруппа В1, в которой доминируют звезды спектральных классов В3–В1,5 с массами до $10 M_{\odot}$ (приблизительный порог массы для предсверхновой). Более массивных звезд в В1 уже не осталось. Но у астрономов есть метод «реставрации» скоплений. Так же, как археолог по сохранившимся черепкам восстанавливает вазу, астроном может «восстановить» старое скопление по аналогии с другими, более молодыми. Для этого делается следующее предположение: в момент рождения любого скопления распределение в нем звезд по массам имеет универсальный вид, который называют начальной функцией масс. Поэтому астрономы сравнили массы нынешнего звездного населения подгруппы с начальной функцией масс самых молодых ОВ-ассоциаций Галактики и таким образом оценили, сколько в ней было более массивных звезд раньше. Оказывается, за последние 10–20 млн лет в подгруппе В1 должны были закончить свою жизнь взрывом сверхновой около 20 массивных звезд.

Остается сделать последний шаг: обратив время вспять, как можно точнее описать движение ядра подгруппы В1 относительно Местной Трубы в прошлом. Посмотрим на сечение окрестностей Солнца плоскостью галактического экватора (рис. 5.8). Серая сфера — идеализированная форма Местного Пузыря по данным спутника EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer, Исследователь далекого ультрафиолетового излучения) на 1998 г. Черная линия — существенно уточненная граница, построенная на основании изучения межзвездного поглощения света в линии Na I по многим направлениям на небе. Разумеется, граница Местной Трубы пока определена не вполне надежно, ибо гео-

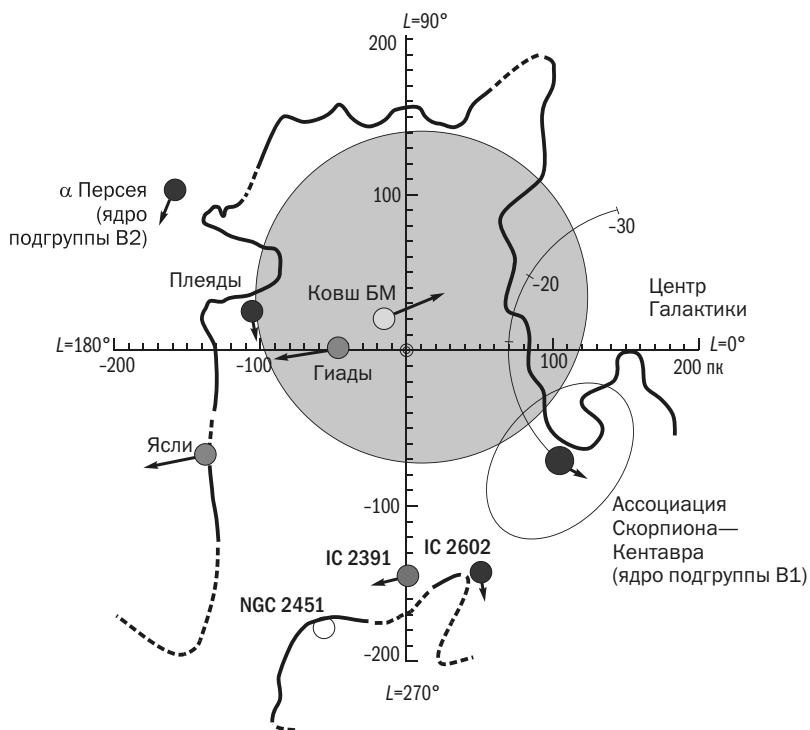


Рис. 5.8. Сечение Местной Трубы экваториальной плоскостью Галактики. Показаны ядра четырех звездных потоков: Сириуса, Гиад, Плеяд и IC 2391, их скорости относительно Трубы и предполагаемый путь ядра подгруппы B1 из потока Плеяд за последние 30 млн лет. В IV квадранте галактических широт к Местной Трубе примыкает другой пузырь, раздуваемый звездной ассоциацией Скорпиона—Кентавра. Солнце находится на пересечении координатных осей и движется относительно ближайших звезд в указанном направлении со скоростью около 14 км/с (в проекции на плоскость Галактики).

графия галактических окрестностей Солнца еще переживает период своего становления. Овалом отмечено ядро подгруппы B1, расположенное в ассоциации Скорпиона—Кентавра (на самом деле звезды этой подгруппы присутствуют во всех трех скоплениях ассоциации, а некоторые из них находятся далеко за ее границами). Траектория движения ядра подгруппы B1 за прошедшие 30 млн лет показывает, что оно находилось в пределах Местной Трубы как раз 10–20 млн лет назад, так что большинство его массивных звезд должно было взорваться именно там!

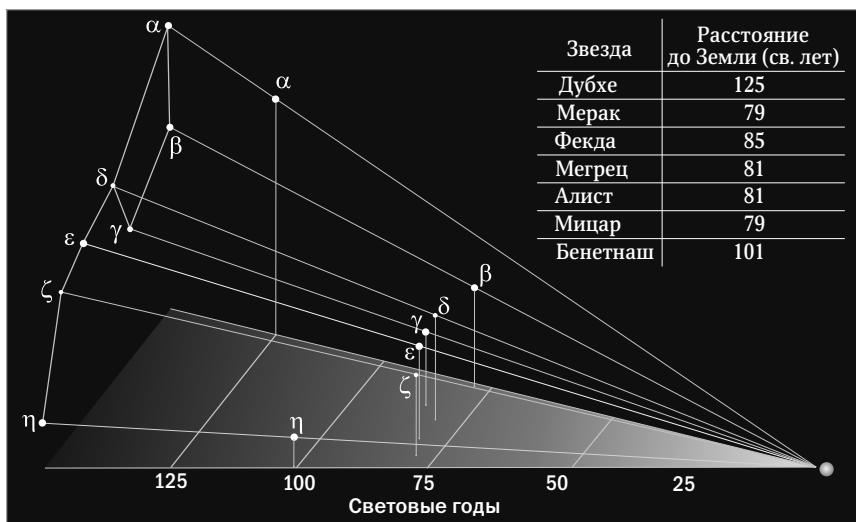


Рис. 5.9. Положение в пространстве звезд Ковша Большой Медведицы. В нем ясно видна группа из 5 звезд, расположенных на почти одинаковом расстоянии от Солнца (около 25 пк — 82 св. года). Многолетние наблюдения показали, что звезды этой группы и в пространстве движутся параллельно. По-видимому, они связаны общим происхождением. На самом деле их существенно больше; в Ковше оказались лишь некоторые члены этого движущегося скопления.

На первый взгляд, странно, что все это происходило не в центре, а у самого края Трубы. Но дело в том, что пузырь в галактическом диске расширяется не равномерно во все стороны, а в основном туда, куда ему позволяют давление и плотность окружающей среды. Огромный выступ на стенке Трубы в направлении галактического центра — не что иное, как плотное облако в Змееносце, которое могло сдерживать расширение Трубы в этом направлении. Сегодня ассоциация Скорпиона–Кентавра покинула область Местной Трубы, зато с успехом раздувает другой пузырь, граничащий с нашим.

Сегодня к описанному сценарию происхождения Местного Пузыря, превратившегося в Трубу, склоняется большинство астрономов. А, между прочим, существование Местного Пузыря одним из первых еще в начале 1960-х гг. заподозрил не кто иной, как Олин Эгген. Предельно точная фотометрия звезд спектральных классов O–A0 в купе с коллекцией звездных параллаксов позволили ему по зависимости показателя цвета от расстояния уже в те годы прийти к выводу о существовании почти пустой области, окружающей Солнце.

5.4. Поток Сириуса

Попробуйте с ходу ответить на вопрос: какое из звездных скоплений ближайшее к нам? Первое, что приходит в голову, — Гиады (47 пк). В действительности есть скопление, расположенное еще ближе; к тому же оно постарше Гиад и оттого гораздо более рассредоточено по небу. Его ядро — пять звезд Ковша Большой Медведицы, исключая Дубхе (α UMa) и Алкаид, или Бенетнаш (η UMa) — крайние в «ручке» и «черпаке». Их собственные движения противоположны движению остальных звезд Ковша. Расстояние до этого скопления вдвое меньше, чем до Плеяд. Мицар, Алиот, Мегрец, Фекда и Мерак (ζ , ϵ , δ , γ и β UMa) — его ярчайшие звезды спектральных классов A0–A3. Любимый наблюдателями Алькор, издавна используемый для проверки зрения, тоже входит в это скопление. В прошлом были сомнения в физической связи между Алькором и Мицаром, но после 2009 г. их практически не осталось: точные измерения расстояния и движения этих звезд показали, что это двойная система. Более того, это система из шести звезд: у Алькора два компонента, а у Мицара четыре (две тесные пары). Вся эта компания принадлежит движущемуся скоплению Ковша. Ему принадлежат и некоторые другие звезды, расположенные в области Ковша: 37 и 78 Большой Медведицы, а также несколько более слабых звезд этого созвездия, не видимых невооруженным глазом.

В реальности скопление Ковша — это лишь ядро большой движущейся группы звезд — обширного потока, представители которого встречаются на небе сколь угодно далеко от Большой Медведицы. Взгляните на звездную карту, а лучше дождитесь ясного вечера и выйдите с картой и маленьким красным фонариком под открытое небо. Итак, начинаем путешествие. Гемма, или Альфекка (α Северной Короны, $2,2^m$), 21 Малого Льва ($4,5^m$), Расальхаг (α Змееносца, 2^m), β Змеи ($3,6^m$), Зосма (δ Льва, $2,5^m$), Менкалинан (β Возничего, $1,9^m$), Каффалидма (γ Кита, $3,5^m$), Курса (β Эридана, $2,8^m$), σ и η Андромеды ($4,5^m$ и $4,4^m$). Этот список можно продолжать долго: в поток Большой Медведицы входит более сотни звезд. Сияющий Сириус, расположенный в противоположной стороне небосвода, тоже

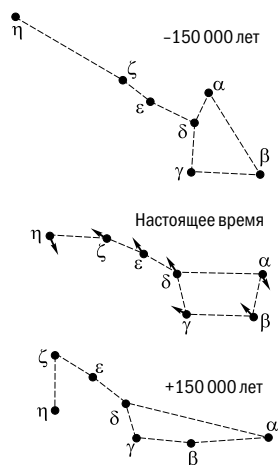


Рис. 5.10. Изменение конфигурации звезд Ковша Большой Медведицы за 300 тыс. лет в результате движения звезд в пространстве.

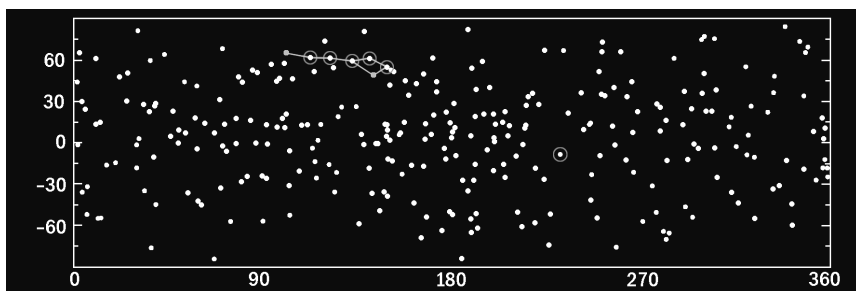


Рис. 5.11. Карта всего неба в галактических координатах, на которую нанесены звезды главной последовательности спектральных классов B5–F5 из потока Сириуса. Кружками обведены принадлежащие ему звезды Ковша Большой Медведицы и сам Сириус.

принадлежит потоку, связанному с Ковшом Большой Медведицы! Именно поэтому Олин Эгген в своей работе назвал этот поток «движущейся группой Сириуса». Приходится крутить головой? Ничего, зато теперь вы познакомились с одним из интереснейших звездных потоков, в гуще которого волей судьбы оказалась Солнечная система.

Выбрав из каталога астрометрического спутника Hipparcos молодые звезды главной последовательности спектральных классов B5–F5, удаленные от Солнца не более чем на 250 пк, астрономы нанесли на карту те из них, которые входят в поток Сириуса (рис. 5.11). На этой карте хорошо видно, что члены потока, вообще говоря, не концентрируются к его ядру — Ковшу Большой Медведицы. Покинув его, они растянулись в «трубку» и оказались разбросаны у нас над головой по всему небу.

5.5. «Звездные реки»

Можно провести аналогию между звездными потоками и реками. Вам когда-нибудь доводилось стоять в середине широкой, но неглубокой реки и наблюдать, как ее вода обегает вас со всех сторон? В данном случае Солнце — это вы. С той лишь разницей, что у нас на Земле вы не можете стоять посередине сразу нескольких рек одновременно, а Солнце с планетами — может: звездные потоки пересекают друг друга, не замечая этого.

Более глубокий взгляд обнаруживает еще одно существенное различие между водным и звездным потоками. Как известно, «нельзя дважды войти в одну и ту же реку» — поток уносится безвозвратно, и каждый раз вас омывают новые воды. Но со звездными потоками все обстоит иначе. Земному наблюдателю кажется, что звезды потоков проно-

сятся мимо Солнца во всех направлениях в неизвестность. Но если вы посмотрите на эти же потоки с галактической точки зрения, поднявшись над Галактикой, вы увидите, что они, как правило, имеют орбиты, близкие к круговым, а их члены обращаются вокруг центра Галактики на сравнимых скоростях — около 200–250 км/с. Пройдя через любой из потоков, орбита Солнца лишь немного отклоняется от орбиты входящих в него звезд. Двигаясь почти на параллельном курсе, Солнце может снова пересечь этот же поток по прошествии, скажем, половины галактического года (чуть более 100 млн лет). С точки зрения земного наблюдателя все это выглядит несколько странно: звезды, с которыми он уже распрощался, спустя сотню миллионов лет вдруг снова появляются на небосводе и бегут в обратную сторону! Взять хотя бы поток Сириуса. Возраст его звезд оценивается в (500 ± 100) млн лет. Таким образом, он сделал уже два оборота вокруг центра Галактики. Вполне возможно, что мы уже неоднократно его пересекали.

А само Солнце: не принадлежит ли и оно какой-нибудь из «звездных рек»? Например, к потоку Сириуса с самым близким к нам скоплением — ядром в Большой Медведице? Вообще, звездные потоки выделяют именно по их собственной скорости относительно Солнца. Понятно, что наш поток, если бы таковой существовал, объединял бы звезды с самым малым собственным движением на небе. Такие звезды есть, но астрономы не считают их потоком. Почему? Вспомним о возрасте Солнца и сравним его с возрастом еще не растворившихся в Галактике движущихся звездных групп. Трудно представить, что в диске Галактики мог бы сохраниться поток, совершивший десятки оборотов вокруг ее центра. В Солнечной системе метеорные потоки сохраняются довольно долго потому, что под действием доминирующего притяжения к Солнцу они движутся по простым почти эллиптическим орбитам. Но в Галактике гравитационное поле неоднородно в широком диапазоне масштабов (звездные скопления, гигантские молекулярные облака, спиральные рукава, бар), поэтому с возрастом звездные потоки быстро «расплываются». И все же пример Арктура показывает, что старость — еще не приговор...

5.6. Поток Арктура

Разговор об Арктуре (Boo) мы прервали на том, что назвали его красным гигантом, летящим с очень большой скоростью относительно Солнца. Также мы упомянули о движущейся группе Арктура. Пришло время раскрыть остальные карты: анализ спектра этого близкого гиганта (K1,5 III) позволил оценить ускорение силы тяжести на его по-

верхности: всего около $0,57 \text{ м/с}^2$. Радиус звезды, расстояние до которой измерено надежным методом тригонометрического параллакса, обычно вычисляют по светимости и температуре поверхности. Но радиус Арктура удалось измерить напрямую с помощью оптического интерферометра Марк III, успешно работавшего на обсерватории Маунт-Вилсон до начала 1990-х гг. Ведь Арктур — не просто гигант, а весьма близкий к нам гигант. Прямые измерения показали, что он примерно в 25 раз больше Солнца. Задача для школьника: определить, во сколько раз Арктур массивнее Солнца, если ускорение силы тяжести на поверхности нашего светила 274 м/с^2 . Прodelав эти нехитрые вычисления, получим, что красный гигант по имени Арктур всего на 20% массивнее Солнца! Аккуратный расчет показывает, что масса Арктура около $1,1 M_{\odot}$. Учитывая погрешность измерения силы тяжести на его поверхности (в данном случае она наибольшая), можно с уверенностью сказать, что он весит не более $1,5 M_{\odot}$.

Эта оценка сразу превращает поток Арктура в экстраординарный: для того, чтобы стать красным гигантом, звезде с массой Арктура требуется около 7 млрд лет! И даже с учетом возможных ошибок в измерении массы — никак не менее 2,5 млрд. Старость потока Арктура бесспорна и подтверждается множеством других фактов. К примеру, все его звезды имеют очень низкую металличность, не превышающую 30% от солнечной. В этом они схожи со старыми звездами (население II), обитающими в галактическом гало. В этом потоке нет звезд спектральных классов более ранних, чем G, и это понятно: в таком старом потоке их уже не осталось. Альфа Лисички ($\alpha \text{ Vul}$), еще один красный гигант из этого же потока, виден на небе как слабая звездочка блеском $4,4^m$. Другие его члены — а их обнаружено уже более полусотни, — особенно звезды главной последовательности, среди которых и древние близнецы Солнца спектрального класса G, как правило, недоступны невооруженному глазу, хотя в небольшой бинокль их можно видеть десятками.

Если сравнить поток Арктура с рекой, это будет широкая, разлившаяся река, если вообще ее можно назвать рекой. Некоторые его светила довольно высоко взбираются над диском Галактики — до 1 кпк, другие почти из него не выходят. Главный признак, по которому астрономы выделяют их на небе, — сильное отставание от основной массы звезд в окрестности Солнца: примерно на 100 км/с. Это означает, что они движутся не по круговым, а по сильно вытянутым галактическим орбитам с перицентрами, лежащими глубоко в центральной области Млечного Пути. (Момент орбитального импульса Арктура со-

ставляет всего половину от момента импульса звезд на круговой орбите в окрестности Солнца.) Отсутствие компонента скорости вдоль линии центр—антицентр Галактики свидетельствует о том, что звезды этого потока, по-видимому, достигают в окрестности Солнца апоцентров своих орбит.

Как мы уже говорили, классические молодые звездные потоки никогда не имеют вытянутых эллиптических орбит. Это и понятно, ибо в целом они наследуют почти круговую скорость своего родительского облака в диске Галактики. Что за странное облако дало жизнь потоку Арктур? Да и было ли оно? Разброс металличности у звезд потока оказался недопустимо высоким: от 30% до всего лишь 1% солнечной! Как могло родиться из одного облака столь разнородное потомство? Как смог этот поток сохраниться на протяжении многих миллиардов лет?

Некоторые астрономы полагают, что все эти свойства потока Арктур наилучшим образом согласуются с гипотезой о том, что эти звезды — пришельцы! По-видимому, мы наблюдаем небольшую часть останков некогда поглощенной и разрушенной Млечным Путем карликовой галактики. Конечно, необходим дальнейший анализ, чтобы подтвердить предположение о том, что Арктур вместе с некоторыми другими яркими звездами небосвода мог родиться далеко за пределами Млечного Пути. Но это предположение не столь уж радикально. Если вы верите в иерархическую модель формирования Галактики посредством слияний и поглощений меньших звездных систем — событий, которые в ранние эпохи случались намного чаще (см. главу 8), то эта гипотеза хорошо в нее вписывается. Именно поглощенные галактики могли привнести в диск Млечного Пути значительную долю старых звезд с низкой металличностью.

Вхождение галактики-спутника в Млечный Путь могло произойти много миллиардов лет назад. Ее разрушение привело к появлению многочисленной группы движущихся звезд, число которых измерялось десятками и сотнями миллионов! Со временем их орбиты могли «размазаться» по диску галактики сколь угодно широко, полностью лишив поток Арктур классической трубкообразной формы его молодых аналогов. Представление о том, как это происходило, дает математическая модель разрушения недавно обнаруженной карликовой галактики в созвездии Большой Пес (рис. 5.12). Собственно говоря, обнаружены лишь остатки этой галактики и расплывающиеся потоки ее звезд. Тем не менее, как показывает моделирование, звезды еще долго сохраняют одинаковый угловой момент и одинаковое апоцентрическое расстоя-



Рис. 5.12. Модель приливного разрушения карликовой галактики «Большой Пес» (Canis Major Dwarf Galaxy). Слева разрушающаяся галактика показана вместе со звездами нашей галактики. Справа показаны только звезды разрушающегося карлика, чтобы яснее были видны его звездные потоки.

ние. Судя по всему, у звезд группы Арктюра апоцентры орбит располагаются как раз вдоль галактической орбиты Солнца, где и «кучкуются» теснее всего члены этой группы, поскольку скорость в апоцентре минимальна. Поэтому при взгляде на Галактику сверху поток Арктюра выглядит как кольцо с почти отсутствующей внутренней границей и очень резкой внешней. К появлению кольца с резкой внешней границей и мягкой внутренней может привести дрейф апоцентров отдельных звездных орбит трубки. При этом апоцентры звездных орбит расходятся, распределяясь вдоль внешней границы кольца. За пределы последней



Рис. 5.13. Эллиптическая галактика NGC 3923 с оболочками. Такие оболочки или кольца находят сегодня во многих галактиках. Они могут существовать гораздо дольше приливных трубок — многие миллиарды лет.

ней они никогда не выходят, если только случайное взаимодействие не сообщит им дополнительной энергии сверх того, что имела их материнская галактика при растворении в Млечном Пути.

Такие кольца, называемые оболочками, астрономы давно уже наблюдают в других галактиках, особенно эллиптических. Например, у NGC 3923 их несколько (рис. 5.13). Их происхождение связывают с поглощенными звездными системами. Другое дело увидеть такую оболочку у себя над головой! Выбрав Арктур в качестве

ве «связного», мы с женой и не предполагали, что обмениваемся посланиями через молчаливого свидетеля бурной эпохи рождения Млечного Пути, через внегалактического пришельца из иной звездной системы.

А что если у него сохранились планеты? Только представьте: планеты, родившиеся в эпоху, когда спирали Млечного Пути на тамошних небесах можно было разглядывать со стороны, а нашей Солнечной системы еще не было и в помине. Может быть, на одной из этих планет тоже есть астрономы? Уж они-то точно знают, сколько спиральных рукавов у нашей галактики и как они выглядят. Скорее всего, они знают не только это, но и многое из того, что нам на Земле еще предстоит узнать. А не поделятся ли они с нами своим знанием? Заманчивая перспектива... Беда лишь в том, что планеты у звезд с малой металличностью встречаются не так часто, да еще в том, что межзвездные послания, а тем более перелеты все еще остаются несбыточной мечтой человечества. Впрочем, расстояние до Арктура будет близко к его нынешнему минимальному значению еще не одну сотню тысяч лет. Это обнадеживает. За такое время люди, конечно, многое придумают, и многое станет возможным. Арктур не торопит.

Литература

- Eggen O. J. Notes from a Life in the Dark // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1993. Vol. 31. P. 1.
- Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R. Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed // Astrophys. J. 1962. Vol. 136. P. 748.
- Local Chimney and Superbubbles. <http://www.solstation.com/x-objects/chimney.htm>
- Холопов П. Н. Звездные скопления. М.: Наука, 1981. Глава 4 «Движущиеся скопления, местные потоки и кинематические звездные группы».





СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

В. С. Аведисова, В. Г. Сурдин

6.1. Млечный Путь — спиральная галактика

Наша звездная система принадлежит к классу спиральных галактик. Солнце с планетами движется почти точно в плоскости галактического диска, состоящего из звезд среднего и юного возраста, пространство между которыми заполнено межзвездным газом и пылью. Именно пыль, поглощая свет звезд, не позволяет изучать в оптическом диапазоне строение диска Галактики на больших расстояниях. Практически все наши знания о звездном населении диска ограничены расстояниями 3–4 кпк от Солнца. Если вспомнить, что радиус галактического диска составляет около 15 кпк, то становится грустно от осознания того, сколь малая его область изучена детально. Разумеется, на помощь оптическим телескопам астрономы привлекают более «дальнобойные» инфракрасные телескопы и радиотелескопы. Для них пыль не представляет непреодолимой преграды. Инфракрасные и особенно радиотелескопы позволяют увидеть самые отдаленные области Млечного Пути, но по четкости изображения эти длинноволновые инструменты пока уступают оптическим. Главное их преимущество — возможность регистрации атомарных и молекулярных спектральных линий от эмиссионных туманностей, холодных молекулярных облаков, источников мазерного излучения и т. п. По этим линиям благодаря эффекту Доплера с высокой точностью определяется лучевая скорость объектов относительно Солнца, т. е. проекция их относительной скорости на линию «Солнце—объект». А поскольку газообразные объекты движутся преимущественно по круговым орбитам в плоскости галактического диска, это существенно облегчает построение динамической модели Галактики.

Одна из важнейших и пока не решенных проблем галактической астрономии — выявление крупномасштабной структуры диска и определение строения его спиральных рукавов. Ближайшие к Солнцу спиральные рукава видны невооруженным глазом на ночном небе в виде Млечного Пути — светлых («молочных») полос и пятен неправильной

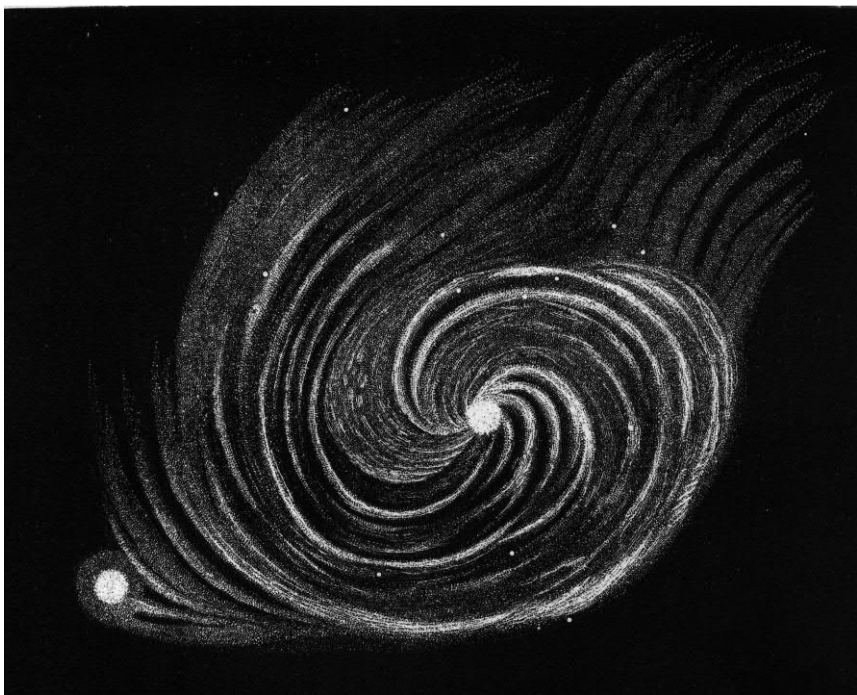


Рис. 6.1. Открытие спиральной структуры галактик началось с этого рисунка туманности M51, сделанного лордом Россом при наблюдении в его гигантский 1,8-метровый телескоп в середине XIX в.

формы, тянущихся через весь небосвод вдоль галактического экватора. На нашем северном небе эти млечные полосы можно отождествить с отрезками трех рукавов. Один из них — Персеев рукав, проходящий через созвездия Персей, Возничий, Близнецы и Большой Пес. Второй рукав — Орионов, или Местный, идущий через созвездия Орион и Лебедь. А самый яркий и выразительный — третий рукав, проходящий через созвездия Скорпион, Стрелец и Орел. Его удобнее всего наблюдать из Южного полушария. Млечный Путь на небе образует почти полный круг. Рукав в Стрельце находится ближе к центру Галактики, чем Солнце, и поэтому называется внутренним рукавом, в отличие от Персеева рукава, расположенного дальше от центра Галактики, чем Солнце, и поэтому называемого внешним.

Рукава в Стрельце и Персее входят в число главных рукавов спирального узора Галактики. Между ними расположен Местный рукав, ближайший к Солнцу; он не принадлежит к основному узору галакти-

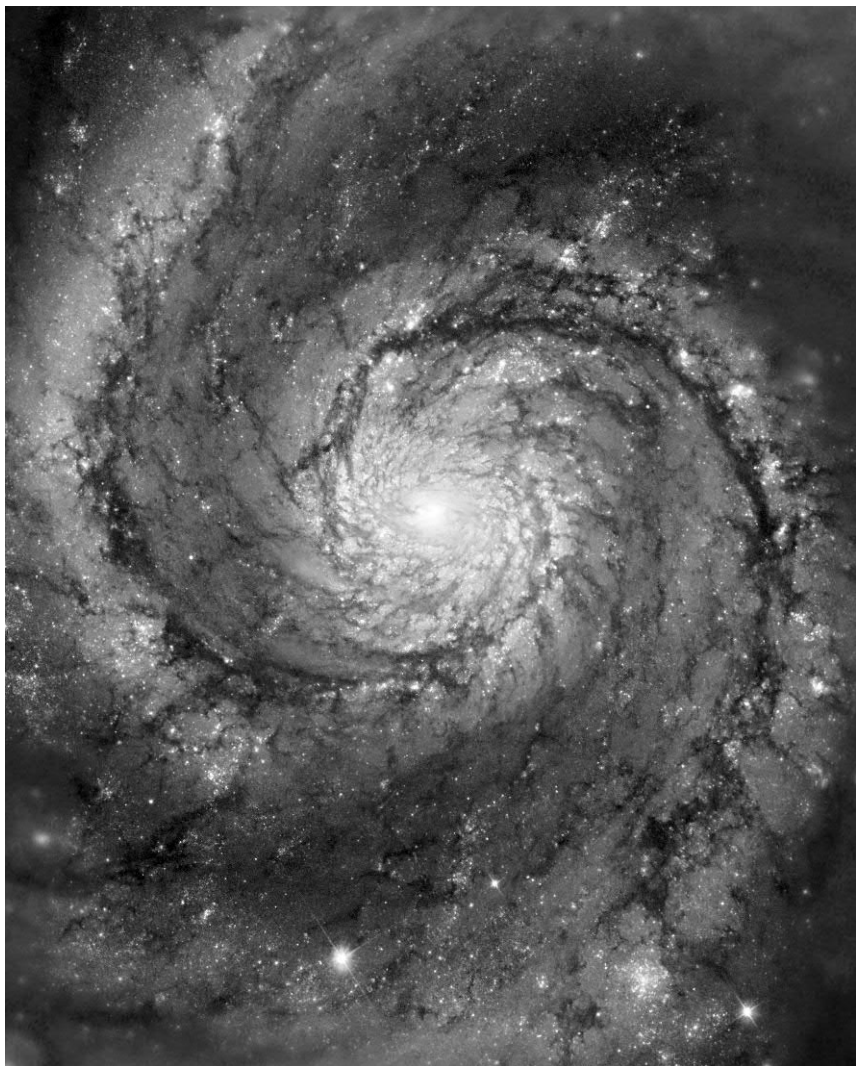


Рис. 6.2. Современное фото центральной части галактики М51 демонстрирует почти идеально симметричную двухрукавную спираль, образованную яркими областями звездообразования и оконтуренную с внутренней стороны рукавов темными прожилками холодных газовой-пылевых облаков.

ческого диска из-за своей сравнительно слабой выраженности, и рассматривается как ответвление от одного из основных рукавов, или же временная структура. В направлении созвездия Лебедь мы смотрим как раз вдоль Местного рукава.

Наблюдая другие спиральные галактики, мы обычно без труда видим на фотографиях их спиральный узор. Особенно четко спирали видны на дисках галактик, ориентированных к нам плашмя. Правда, и в этом случае не всегда можно с уверенностью сказать, где начинается конкретный рукав, где он заканчивается и даже сколько рукавов у галактики. Попробуйте, например, сосчитать, сколько рукавов у галактики NGC 1232 (см. с. 1 цветной вкладки) и проследить каждый из них от центра до края диска.

Совершенно невозможно разглядеть спиральный узор дисковой галактики в том случае, когда она повернута к нам ребром (см. с. 2 цветной вкладки). Невозможно даже догадаться, существует ли вообще на диске спиральный узор. Но ситуация с нашей родной галактикой еще хуже: изучая Млечный Путь с Земли, мы не имеем возможности не только увидеть нашу галактику «в плане», но и окинуть ее взглядом целиком. Даже если бы пыль не мешала оптическим наблюдениям, мы не смогли бы, находясь в диске, увидеть его узор, как невозможно окинуть взглядом сразу весь город, бродя по его улицам. Поэтому требуется определить положение в диске множества звезд и туманностей, построить по этим данным карту Галактики, и лишь затем по этой карте можно будет изучать структуру Галактики в целом. Главное при построении такой карты — определить расстояния до объектов, поскольку направление на них нам известно. Наблюдая Галактику в любом направлении, мы видим в поле зрения своего телескопа множество объектов, расположенных на разных расстояниях от нас. Важнейшая и труднейшая задача для астронома — верно определить расстояние до каждого из объектов.

Самыми надежными реперами для измерения расстояний в Галактике пока служат звезды. Исследование внешних галактик показало, что мы отчетливо видим их спиральные рукава благодаря сконцентрированным в них ярким массивным звездам, звездным ассоциациям, рассеянными скоплениям и светлым туманностям. Иными словами, рукава выделяются потому, что в них имеется большой избыток молодых горячих звезд и светящегося межзвездного газа. В радиодиапазоне спиральные рукава видны благодаря большим ярким пятнам теплового излучения областей интенсивного звездообразования. Такие области есть и в нашей галактике, и в соседних. В них мы видим молодые объекты, сопровождающие процесс формирования звезд в недрах плотных молекулярных облаков. В этих областях чрезвычайно широк диапазон физических условий — температуры и плотности газа, а также его агрегатного состояния: рядом с чрезвычайно холод-

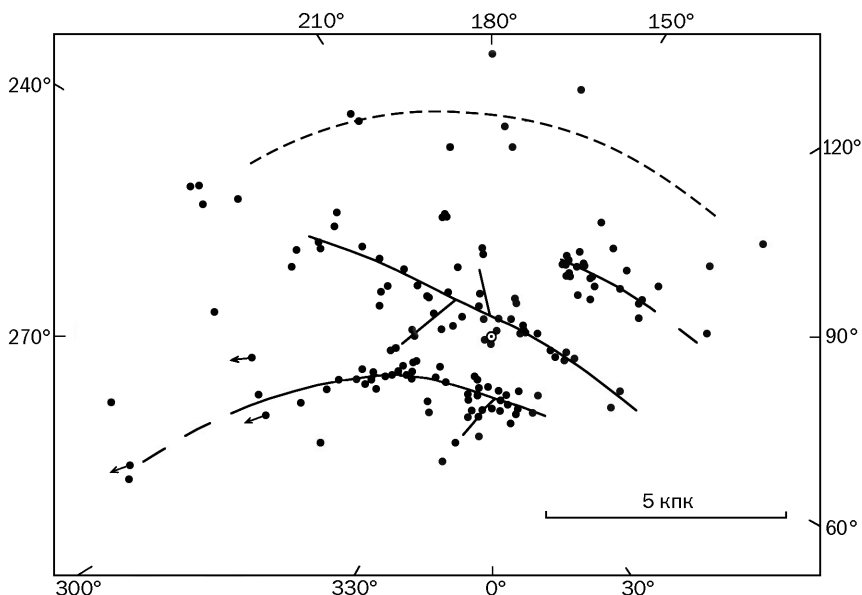


Рис. 6.3. Часть галактической плоскости в окрестности Солнца. По периметру указана галактическая долгота (l). Точками отмечено положение молодых рассеянных скоплений (стрелки указывают, что данное скопление может лежать еще дальше). Концентрация скоплений к Солнцу (кружок с точкой) говорит лишь о том, что на больших расстояниях они не видны. Центр Галактики — за пределами рисунка, в направлении $l = 0^\circ$. Линиями намечены предполагаемые отрезки спиральных рукавов (Vogt, Moffat, 1975).

ным молекулярным газом и твердыми пылинками находится теплый атомарный газ и горячая плазма. Поэтому спиральные рукава видны и в молекулярных линиях (например, молекулы CO), и в линиях частично ионизованных элементов (области HII) вокруг молодых массивных звезд, и в виде концентрации многочисленных инфракрасных источников — молодых звезд, окруженных пылью, и как области, богатые мазерами, т. е. радиоисточниками, в которых интенсивность спектральных линий молекул газа усилена за счет эффекта вынужденного излучения. Они отличаются высокой яркостной температурой и поэтому видны по всей Галактике и в соседних звездных системах. Обычно мазерное излучение возникает при взаимодействии мощного ветра от новорожденных звезд с неоднородностями околозвездного молекулярного облака.

Первые карты спиральных рукавов нашей галактики были получены в 1950–1960-е гг. на основании распределения в галактической плоскости молодых звездных скоплений и отдельных звезд спек-

тральных классов О и В с более или менее точно измеренными фотометрическими расстояниями (рис. 6.3). Тогда же впервые были определены количественные характеристики замеченных отрезков спиральных рукавов. С тех пор они не сильно изменились. Персеев рукав находится на расстоянии около 2 кпк от Солнца в направлении от центра Галактики, а рукав в Стрельце — на расстоянии около 1,5 кпк в направлении к центру. Оба рукава пересекают круговые орбиты звезд галактического диска почти под одинаковым углом, который, по определениям разных авторов, составляет от 10° до 20° . Специалисты называют его «углом наклона» (а также «углом закручивания» или «углом закрутки») спирального рукава. Если бы некий гипотетический рукав выходил прямолинейно из центра Галактики, как спица колеса, то его угол наклона был бы 90° , а если бы он напоминал обод колеса, то 0° . Ширина рукавов в Персее и Стрельце — от 1,0 до 1,5 кпк. Местный рукав имеет больший наклон, чем главные спирали, около 24° , и ширину менее 1,0 кпк.

6.2. Определение расстояний в Галактике

Наиболее прямой метод изучения спиральной структуры Галактики — это построение ее изображения по молодым звездам и звездным скоплениям с известными расстояниями, разумеется, если расстояния определены с ошибками, меньшими ширины рукавов. Но такую высокую точность удастся получить только при измерении расстояний до сравнительно близких объектов.

6.2.1. Тригонометрический метод

Самый точный метод определения расстояний до звезд, как известно, основан на измерении их годового параллакса. Но он применим лишь к сравнительно близким звездам. Наземные наблюдения позволяют с хорошей точностью определять параллаксы звезд, удаленных на 30–40 пк. Использование космических аппаратов заметно улучшило ситуацию. В настоящее время наиболее точное и массовое определение звездных параллаксов проделано в ходе обзора неба с помощью спутника *Hipparcos*. Достоверные параллаксы получены для звезд с расстояниями не более 200 пк. А спиральные рукава удалены от Солнца на 500 пк и более.

Для определения параллаксов на расстояниях более 1 кпк точность измерения положений объектов должна быть выше 0,001, что пока недостижимо в оптике. Такую точность может обеспечить только радиоинтерферометрия с большой базой (VLBI). Для точного изме-

рения расстояний также необходима однородная глобальная система координат. В программу спутника Hipparcos был включен астрометрический обзор далеких активных ядер галактик для построения глобальной квазиинерциальной системы координат, International Celestial Reference Frame (ICRF), связавшей координаты галактических и внегалактических объектов. Эта система служит теперь основой для всей астрометрии.

Долгое время точность глобальной астрометрии, работающей на основе VLBI, была ограничена ошибками, среди которых наиболее заметными являлись стохастические флуктуации, вызванные атмосферным водяным паром. Для учета этих флуктуаций был разработан радиометр водяного пара. Межконтинентальные наблюдения VLBI, калиброванные таким радиометром, дали в несколько раз лучшие результаты. Это позволило с 2000 г. начать радиоастрометрические наблюдения небесных объектов с VLBI.

Наилучшими объектами для измерения годовых параллаксов оказались мазерные источники в близких областях звездообразования. Это самые яркие объекты, без особого труда заметные почти в любом уголке Галактики. К тому же они связаны с областями формирования массивных звезд, располагающихся в спиральных рукавах.

Для выявления спиральной структуры Галактики лучше всего подошли мощные мазеры, излучающие в линиях молекул H_2O на волне 1,35 см; используют также и мазеры на молекулах OH и метанола. Но определение годовых параллаксов по мазерам — штучная работа: измерение каждого параллакса требует не менее полугода наблюдений. Положение объектов определяется много раз относительно одного или нескольких реперных источников, в качестве которых, как правило, используют внегалактические компактные источники. Этим методом определены расстояния до нескольких десятков мазеров в диапазоне расстояний от 0,5 до 10 кпк от Солнца, точность результатов около 10%.

6.2.2. Фотометрический метод

Поскольку точные параллаксы измеряются медленно, для локализации спиральных рукавов в окрестности Солнца, т. е. для измерения расстояний до больших групп звезд, обычно используют фотометрические методы. Их общий принцип таков: если в пространстве свет не испытывает поглощения, то его поток вблизи наблюдателя обратно пропорционален квадрату расстояния до источника (фотометрический закон, или закон обратных квадратов). Поэтому, если нам из ка-

ких-либо соображений известна мощность излучения (светимость) объекта, то, измерив поток его излучения вблизи Земли, легко определить расстояние до объекта. К сожалению, эти два «если» существенно осложняют применение фотометрического закона. Во-первых, космическое пространство не может быть абсолютно прозрачным, в нем всегда происходит поглощение света, меру которого нелегко бывает определить. Во-вторых, разнообразие свойств космических объектов затрудняет выявление среди них «стандартных свечей», в светимости которых мы можем быть заранее уверены.

Оптическую светимость астрономических источников традиционно выражают в терминах абсолютной звездной величины (M), которую определяют из уравнения

$$M = m - A - 5 \lg (r/10 \text{ пк}),$$

где m — видимая звездная величина, A — поглощение света межзвездной пылью, выраженное в звездных величинах, r — расстояние до источника. В соответствии с этим определением абсолютная звездная величина равна видимой звездной величине источника, наблюдаемого с расстояния 10 пк при отсутствии межзвездного поглощения света.

Видимая величина измеряется непосредственно, а значения M и A обычно определяют по спектру звезды. Делается это так. Наличие в спектре линий определенных химических элементов позволяет узнать температуру поверхности звезды. По ширине спектральных линий оценивают плотность звездной атмосферы, а значит, и тип звезды: у звезд-гигантов атмосфера разреженная, а у карликов плотная. Зная температуру и тип звезды, несложно отнести ее к определенной группе звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, а значит, узнать истинную светимость звезды (M). Наконец, определить степень межзвездного поглощения света помогает тот факт, что это поглощение носит селективный характер: пылинки поглощают и рассеивают голубые лучи в большей степени, чем красные. Поэтому чем больше межзвездного вещества между нами и звездой, тем краснее ее изображение (по этой же причине диски Луны и Солнца у горизонта выглядят покрасневшими). Астрономы знают, какой истинный, «нормальный» цвет имеют звезды разного типа при отсутствии поглощения: именно такой цвет имеют близкие звезды, для которых межзвездное поглощение света ничтожно мало. Сравнивая наблюдаемый цвет звезды с ее нормальным цветом, удастся определить степень поглощения (A). После этого в приведенном выше фотометрическом уравнении остается только од-

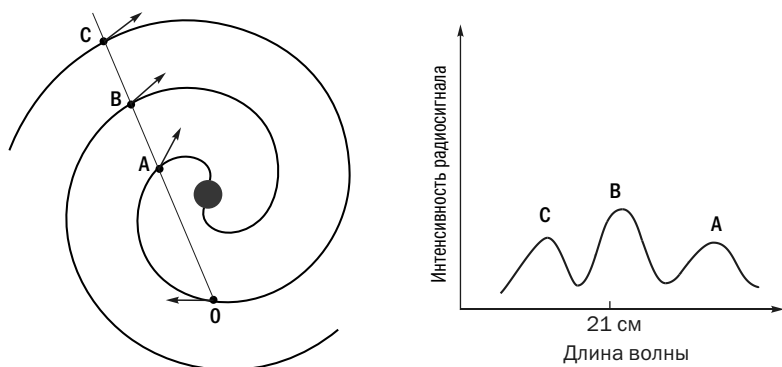


Рис. 6.4. Кинематический метод исследования структуры диска Галактики по профилю линии 21 см, отражающему распределение и движение нейтрального водорода. Слева — схема спиральной структуры диска; О — наблюдатель. В поле зрения его радиотелескопа находятся три участка спиральных ветвей, в которых сосредоточен газ. Из-за разного значения их лучевых скоростей относительно Солнца профиль линии 21 см (справа) получается «треугольным».

но неизвестное — расстояние (r). Для звезд главной последовательности спектральных классов О и В ошибка величины ($m - M - A$), называемой модулем расстояния, обычно не превышает $0,5^m$, что дает ошибку в определении расстояния около 30%.

Поскольку расстояние входит в уравнение под логарифмом, точность его определения пропорциональна самому расстоянию, т. е. $r \propto \lg r$. Это значит, что чем дальше от нас находится звезда, тем менее точно мы определяем ее расстояние. В случае, если звезды О и В проэволюционировали к гигантам или сверхгигантам, то даже для близких звезд расстояния очень неточны из-за невозможности уверенно определить их класс светимости, и ошибка в модуле расстояния может достигать 1–2 звездных величин. Концентрация пыли в плоскости Галактики и погруженность молодых звезд в туманности, оставшиеся от процесса звездообразования, сильно ограничивают видимость этих звезд и, следовательно, возможность определить расстояние до них. Поэтому достаточно точные расстояния до молодых звезд можно получить только в окрестности Солнца радиусом около 3 кпк. Впрочем, для некоторых звезд даже в этом случае ошибка измерения может достигать 0,5–1,0 кпк, в зависимости от спектрального класса и светимости звезды. Немногим точнее получаются расстояния до звездных скоплений, но и эти расстояния по определениям разных авторов иногда различаются на килопарсеки.

6.2.3. Кинематический метод

Еще одна возможность определить расстояние до объекта галактического диска связана с особенностью вращения Галактики. Если бы диск Галактики вращался твердотельно, как граммофонная пластинка или CD, то у отдельных его частей не было бы взаимного перемещения. Обращаясь по круговым орбитам вокруг центра Галактики, звезды и облака газа не изменяли бы взаимного расстояния. Их лучевые скорости для земного наблюдателя были бы нулевыми, а собственное движение (угловое перемещение) относительно далеких галактик у всех было бы одинаковым независимо от расстояния. К счастью, это не так. Диск Галактики вращается дифференциально, т. е. с разной угловой скоростью на разных расстояниях от центра. Поэтому объекты, находящиеся на разном удалении от центра диска, взаимно перемещаются. Измеряя их скорости по доплеровскому смещению линий в спектре, мы можем узнать, где находятся объекты. Этот метод определения расстояний называют кинематическим.

Разумеется, и у него есть свои проблемы. Важнейшая из них состоит в том, что применить его можно, только если нам известно, как зависит скорость вращения диска от расстояния до его центра. Как говорят астрономы, нужно знать «кривую вращения Галактики». Кроме того, надо знать расстояние Солнца от центра Галактики (R_0) и скорость вращения вещества в диске на расстоянии R_0 от центра, то есть скорость местного стандарта покоя в окрестности Солнца (см. раздел 3.1). В главе 3 мы обозначали эту скорость как V_c , имея в виду, что это скорость движения по круговой (circular) орбите радиусом R_0 . Однако в работах по изучению структуры галактического диска для этой скорости принято обозначение Θ_0 , которого далее будем придерживаться и мы. Для простоты будем называть величину Θ_0 просто «скоростью Солнца». К сожалению, до сих пор параметры R_0 и Θ_0 определены не очень точно, хотя прогресс налицо.

Наконец, у кинематического метода есть и принципиальный недостаток: у всех объектов, лежащих вблизи линии «Солнце — центр Галактики», лучевая скорость относительно Солнца одинаковая — нулевая. Поэтому определить расстояние до них этим методом невозможно. В частности, невозможно определить значение R_0 . С этим приходится мириться и применять дополнительные методы. Для измерения R_0 их предложено более дюжины.

Если известна кривая вращения Галактики (R) и определены константы Θ_0 и R_0 , то по лучевой скорости любого объекта легко опреде-

лить его расстояние от центра Галактики (R). Расстояние же от Солнца (r) определяется по элементарной формуле

$$R^2 = R_0^2 + r^2 - 2rR_0 \cos l,$$

из которой видно, что расстояние r для объектов внутренней Галактики (то есть внутри солнечного круга) имеет два значения, которые назовем «ближним» и «дальним» расстояниями от Солнца. Выбор одного из этих расстояний делается на основании разных изоэдренных методов, но эти методы работают далеко не всегда. Поэтому для большинства источников с известной лучевой скоростью обычно приводят два значения расстояния до Солнца — ближнее и дальнее.

Помимо неоднозначности, кинематические расстояния имеют и другие недостатки. Ошибки их определения оказываются довольно большими из-за влияния нескольких факторов. Например, реальные скорости объектов диска отклоняются от круговых. Происходит это по многим причинам, но основных две. Во-первых, при прохождении через некоторую область диска спирального рукава, то есть волны плотности, все объекты испытывают гравитационное возмущение и дружно меняют свою скорость, не очень сильно, но вполне заметно. Во-вторых, на фоне общего вращения вокруг центра Галактики все объекты имеют свои хаотические скорости, которые называют дисперсией скоростей. У молодых объектов диска — облаков и звезд — она не очень велика, порядка 10 км/с. Но, складываясь, ошибки кинематических расстояний достигают примерно 1 кпк, что во внутренней Галактике превышает расстояние между рукавами.

6.3. Кривая вращения Галактики

6.3.1. Профили линии 21 см

Кривой вращения называют зависимость линейной скорости кругового движения объектов галактического диска от их расстояния до центра Галактики, то есть функцию $V(R)$. Этим же термином называют и соответствующую зависимость угловой скорости объектов галактического диска: $\omega(R) = V(R)/R$. Кривая вращения — ключевая характеристика Галактики. Точное знание скоростей движения вещества по круговым орбитам на разном расстоянии от центра позволяет вычислять распределение массы в Галактике: в первом приближении $M(R) = V(R)^2 R/G$. Как же определяют из наблюдений эти зависимости?

Как уже было сказано, по наблюдаемой лучевой скорости звезды, газового облака или другого объекта галактического диска можно най-

ти его расстояние от Солнца (кинематический метод). Для внутренней части Галактики наиболее полная кривая вращения строится по наблюдениям линии излучения межзвездного атомарного водорода (HI), имеющей длину волны 21 см (частота 1420 МГц). Важно, что для этого излучения диск Галактики практически прозрачен. Кривые вращения строят и по линиям излучения межзвездных молекул, например, молекулы CO. В общих чертах они повторяют кривую вращения, полученную по HI.

На рис. 6.5. показано, как формируется профиль линии излучения нейтрального водорода на волне 21 см. Наблюдение внутренней части Галактики ведется от Солнца в направлении ВQC. Если линейная скорость кругового движения слабо зависит от расстояния до центра, то максимальное доплеровское смещение наблюдается в точке Q, где вектор скорости направлен по лучу зрения. В точках В и С лучевые скорости (V_r) одинаковы, поэтому линии излучения этих областей накладываются друг на друга, затрудняя расшифровку спектра. Справа на этом рисунке показаны немного сглаженные, но все же реальные профили линии 21 см, наблюдаемые на разных галактических долготах вдоль Млечного Пути. Хорошо видно, что неискаженные гауссовы профили без доплеровского сдвига приходятся на долготы $l = 0^\circ$ (центр Галактики) и $l = 180^\circ$ (антицентр).

На луче зрения, пронизывающем Млечный Путь в направлении долготы l , наблюдается излучение водорода во всем диапазоне скоростей, соответствующем данному сечению Галактики. В силу отмеченного выше эффекта проекции максимальная наблюдаемая лучевая скорость в данном направлении ($V_r^{\max}$) должна соответствовать облакам, находящимся в так называемой тангенциальной точке (Q), в которой направление вектора скорости вращения совпадает с лучом зрения. Это самая близкая к центру Галактики точка на луче зрения. Ее относительное расстояние от галактического центра равно

$$\frac{R}{R_0} \sin l.$$

Из простых геометрических соображений мы видим, что

$$V_r^{\max} = R_0 \left[\left(\frac{R}{R_0} \right)^2 - 1 \right] \sin l,$$

где $\omega = \omega_0/R_0$ — угловая скорость вращения Солнца. Таким образом, для каждого значения l мы знаем относительное расстояние тангенциальной точки (R/R_0), а по измеренному в этом направлении значению $V_r^{\max}$ можем вычислить значение $R_0 \left[\left(\frac{R}{R_0} \right)^2 - 1 \right]$. Чего же нам не

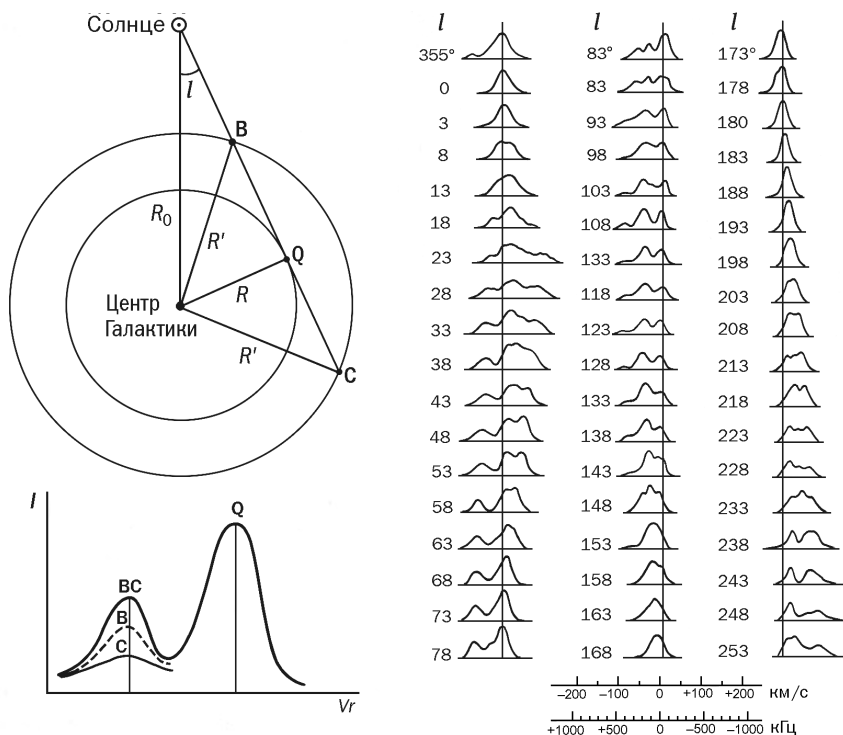


Рис. 6.5. Слева — схема, поясняющая формирование профиля линии 21 см; I — интенсивность радиосигнала. Справа — наблюдаемые профили линии 21 см на разных галактических долготах. Внизу показана шкала отклонения частоты принятого излучения от испущенного (вертикальная линия на частоте 1420 МГц) и соответствующая ей шкала доплеровских скоростей.

хватает, чтобы найти кривую вращения Галактики, то есть функцию (R) ? Значений двух констант: R_0 — расстояния Солнца от центра Галактики и v_0 — скорости движения Солнца вокруг этого центра. Их определением астрономы занимаются давно и упорно, ведь это именно те масштабные величины, которые позволяют «превратить» схему Галактики в реальный объект — узнать ее истинный размер и массу. Более того: от их значения в немалой степени зависит построение всей лестницы космических расстояний, включая расстояния до далеких галактик, и даже значение возраста самой Вселенной.

6.3.2. Определение R_0 и v_0

Методы определения расстояния до центра Галактики весьма разнообразны (Surdin, 1999). Многие из них основываются на предполагае-

мых свойствах симметрии Галактики: если мы умеем определять расстояния до объектов определенного типа (цефеид, шаровых скоплений, красных гигантов в балдже) и полагаем, что они распределены симметрично вокруг галактического центра, то расстояние до «центра масс» совокупности этих объектов как раз и будет расстоянием до центра Галактики. Идея хорошая, но для ее реализации необходимо обнаружить все объекты указанного типа, а сделать это практически невозможно. Особенно трудно находить звезды и даже их скопления по ту сторону галактического центра.

Первую оценку R_0 сделал в 1918 г. Харлоу Шепли: по распределению шаровых скоплений в Галактике он получил $R_0 = 13$ кпк. А в 1947 г. по распределению звезд Борис Васильевич Кукаркин получил $R_0 = 7,2$ кпк. Все остальные определения вплоть до наших дней практически не выходят из этого диапазона. Во избежание разнобоя Международный астрономический союз в 1964 г. рекомендовал использовать значение $R_0 = 10$ кпк и соответствующее ему значение скорости Солнца $v_0 = 250$ км/с. Но под нажимом новых определений в 1985 г. рекомендация МАС изменилась: $R_0 = 8,5$ кпк и $v_0 = 220$ км/с. Такой она остается до сих пор, поскольку ошибка определения R_0 еще недавно составляла около 1 кпк. Правда, в последние годы в этом деле наблюдается прогресс. Например, недавно была предпринята попытка определить R_0 по наблюдению звезд в самом центре Галактики. В результате 16-летнего мониторинга звездных орбит вокруг находящейся там массивной черной дыры с использованием техники высокого разрешения в ближнем инфракрасном диапазоне получено $R_0 = 8,33 \pm 0,35$ кпк. Сегодня это одна из наиболее точных оценок расстояния до центра Галактики.

Есть успехи и в измерении величины v_0 . Наблюдения со спутника Hipparcos позволили найти собственные движения 1352 молодых звезд спектральных классов O–B5 и оценить по ним скорость галактического вращения на расстоянии Солнца (полагая $R_0 = 8,5$ кпк): $v_0 = 269 \pm 12$ км/с. Однако по цефеидам эта скорость получилась иной: $v_0 = 243 \pm 12$ км/с. Позже на основании собственных движений и радиальных скоростей 240 звезд спектрального класса O–B5 было получено значение $v_0 = 256 \pm 8$ км/с.

Недавно появилась еще одна возможность определения параметров Галактики. Глубокий обзор неба SDSS позволил обнаружить длинный (около 63°) и узкий (менее 1°) поток звезд в северной полярной области Галактики, названный GD-1 и предположительно оставшийся от шарового скопления, разрушенного приливными силами Галак-

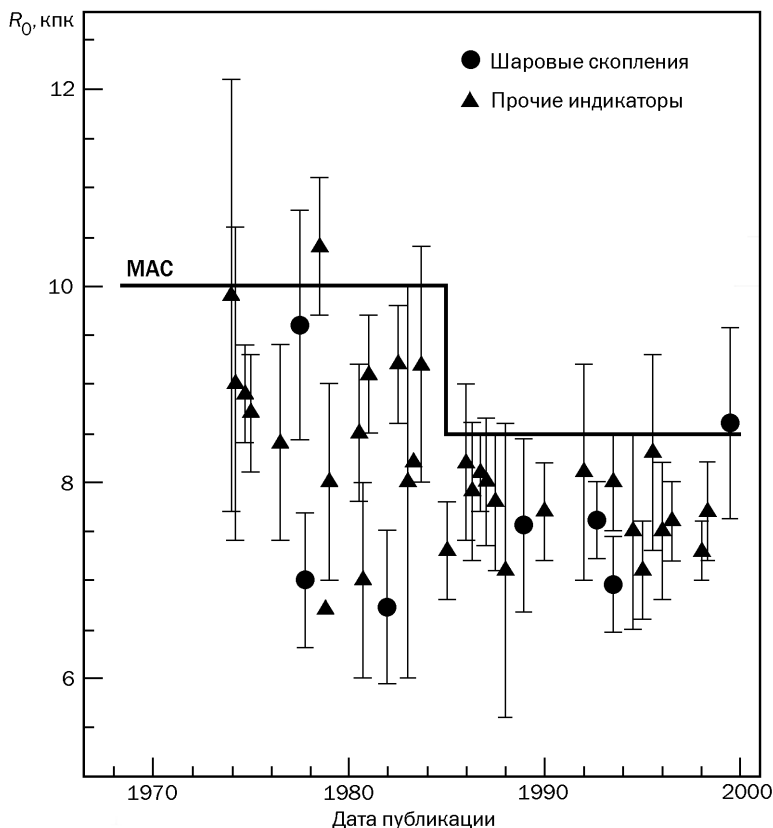


Рис. 6.6. Расстояние до центра Галактики (R_0), измеренное различными методами в последней четверти XX в., привело Международный астрономический союз (МАС) к необходимости снизить в 1985 г. рекомендованное значение R_0 с 10 кпк до 8,5 кпк. Но и это значение выглядит немного завышенным.

тики (представление об этом явлении дает с. 16 цветной вкладки). Используя каталоги SDSS и USNO B1.0, удалось определить параметры звезд этого потока, включая их расстояние, собственное движение и радиальные скорости. Построив по этим данным динамическую модель Галактики, авторы среди прочего получили и значение круговой скорости Солнца $v_0 = 221 \pm 18$ км/с.

Не утруждая читателя перечислением всех новых методов и результатов в этой области, отметим, что комбинация нескольких последних работ дает сейчас (2012 г.) следующие наилучшие значения для простой симметричной модели Галактики: $R_0 = 8,3 \pm 0,23$ кпк и

$v_0 = 236 \pm 11$ км/с. Однако исследования последнего времени, основанные на данных новых глубоких обзоров неба (SDSS, 2MASS, DENIS, UKIDSS и др.), показали, что прежняя упрощенная модель Галактики не соответствует наблюдениям. Галактика не осесимметрична, поэтому для некоторых ее параметров требуется более сложная модель. Пока мы можем говорить лишь о границах, в которых заключены искомые величины, а именно $6,5 \text{ кпк} < R_0 < 9,5 \text{ кпк}$ и $185 \text{ км/с} < v_0 < 260 \text{ км/с}$. Но при этом отношение v_0/R_0 для большинства моделей Галактики заключено в довольно узком интервале: от 25 до 30 км/(с · кпк).

Как видим, в отношении важнейших параметров Галактики (R_0 , v_0) сейчас сложилась ситуация, подобная той, что была в отношении параметра Хаббла (H_0) лет 20 назад. Тогда среди специалистов было несколько групп, каждая из которых предпочитала пользоваться своим значением H_0 : две группы наблюдателей использовали полученные ими значения, соответственно 50 и 100 км/(с · Мпк), а теоретики предпочитали значение $H_0 = 75$ км/(с · Мпк). Разумеется, неопределенность с параметрами Галактики сегодня не настолько велика. Тем не менее авторы некоторых публикаций «на всякий случай» приводят свои выводы сразу для нескольких вариантов констант. Например, в работе Hou et al. (2009) модель спиральной структуры Галактики построена для значений (R_0 , v_0), равных (8,5 кпк, 220 км/с), (8,0 кпк, 220 км/с) и (8,4 кпк, 254 км/с). При этом выясняется, что все три пары констант приводят к почти одинаковому согласию с наблюдениями. Следовательно, работа в этой области еще предстоит.

6.3.4. Вращение Галактики

Для построения моделей Галактики важно определить ход кривой вращения не только внутри солнечного круга, но и на больших расстояниях от центра. Знание кривой вращения во внешней области Галактики дает в руки астронома очень полезный инструмент: за пределами солнечного круга луч зрения телескопа лишь единожды пересекает каждую галактоцентрическую окружность, поэтому кинематические расстояния до звезд и других объектов получаются вполне определенные, без «ближнего» и «дального» вариантов. Но сама кривая вращения во внешней Галактике определяется по фотометрическим расстояниям до звезд, естественно, с гораздо меньшей точностью (особенно на удалении более 3 кпк от Солнца), чем определяется расстояние до облаков газа внутри солнечного круга.

Для определения скорости измеряется доплеровский сдвиг комбинационных линий водорода в диффузных туманностях, возбуж-

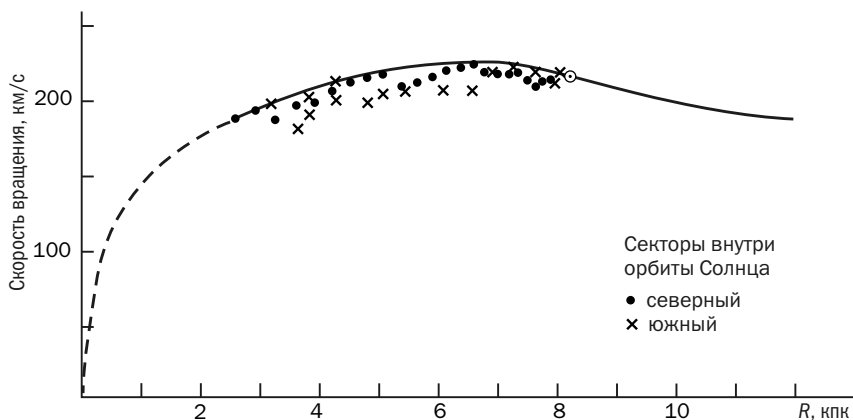


Рис. 6.7. Кривая вращения Галактики, полученная Мартином Шмидтом в 1956 г. на основе всех имевшихся тогда наблюдений Млечного Пути в линии 21 см. Сплошная линия — модельная кривая; пунктир — ненадежная область.

даемых ОВ-звездами, или сдвиг молекулярных линий, рождающихся в холодных облаках, обычно сопровождающих молодые звезды. Лучевые скорости, измеренные по молекулярным линиям, намного точнее скоростей, определенных по спектрам звезд или рекомбинационным линиям водорода, так как ширины линий холодного газа много меньше ширин линий горячего газа звездных атмосфер и областей HII. Но все же основным источником ошибок являются не лучевые скорости, а неточность определения расстояний.

Впервые кривые вращения Галактики и соответствующие им модели распределения массы в ней появились в конце 1950-х гг., сразу после первых обзоров Млечного Пути в линии 21 см. Автором первой основанной на этих наблюдениях модели в 1956 г. стал голландский астроном Мартин Шмидт (позже он переехал в США и открыл квазары). В первой модели Шмидта круговая скорость на орбите Солнца (было принято $R_0 = 8,2$ кпк) составляла $v_0 = 216$ км/с и с ростом R понижалась. Особенно резко скорость уменьшалась за рукавом Персея, принимая практически кеплерову форму ($v \propto R^{-1/2}$), характерную для пустого пространства вокруг массивного тела, как в Солнечной системе. Это указывало на близость границы Галактики, полная масса которой в такой модели составила около $0,8 \cdot 10^{11} M_\odot$. В 1965 г. Шмидт уточнил свою модель, используя новые рекомендации МАС: $R_0 = 10$ кпк, $v_0 = 250$ км/с. Модель стала немного массивнее, но и в ней кривая вращения за солнечным кругом все равно резко уходила вниз, обозначая край Галактики.

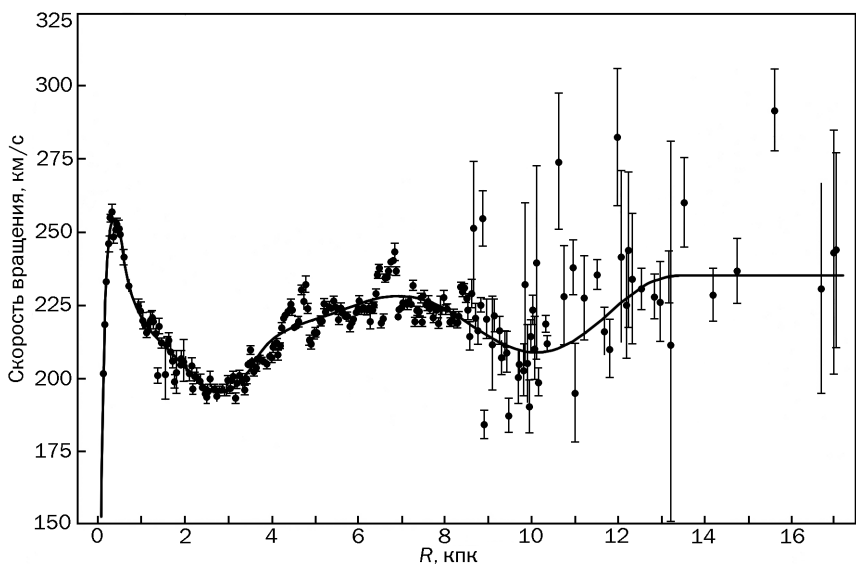


Рис. 6.8. Кривая вращения Галактики, полученная Д. Клеменсом в 1985 г. на основе наблюдения молекулярных облаков.

Кривая вращения, построенная Шмидтом, долго считалась достоверной и служила основанием для моделирования Галактики. Но в начале 1980-х гг. стали публиковаться первые обзоры молекулярных облаков, расположенных дальше от центра, чем Персеев рукав. Они изменили представление о границе Галактики: оказалось, что кривая вращения после небольшого минимума на Персеевом рукаве снова идет вверх, а затем становится плоской. Например, в 1985 г. Дэн Клеменс по наблюдениям молекулы CO построил кривую вращения, которая при $R > 13$ кпк выходит на постоянное значение около 263 км/с для ($R_0 = 10$ кпк, $v_0 = 250$ км/с) или около 235 км/с для ($R_0 = 8,5$ кпк, $v_0 = 220$ км/с). Кривая оставалась плоской по крайней мере до $R = 17$ кпк. На это же указывали и новые модели, построенные по наблюдениям атомарного водорода и областей HII (рис. 6.9).

Тогда же появились данные о кинематике галактик Местной группы. Они свидетельствовали о том, что кривая вращения Галактики не падает до расстояний в десятки килопарсеков от центра. А поскольку видимого вещества, то есть звезд и газа, на этих расстояниях от центра практически не видно, стало ясно, что у Галактики есть очень массивное невидимое гало.

В последние годы «стандартной кривой вращения» часто называют ту, которую получили Brand и Blitz (1993). Они воспользовались

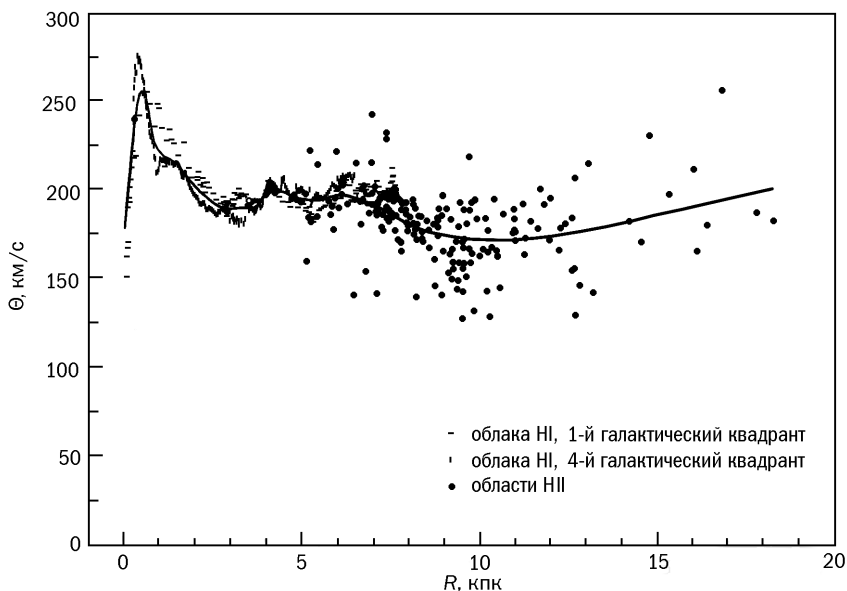


Рис. 6.9. Кривая вращения Галактики, которую в 1987 г. получили Кристен Рольфс и Иоганн Крейчман по линии атомарного водорода (HI) и областям HII в предположении $R_0 = 7,9$ кпк и $\Theta_0 = 184$ км/с.

тем, что на поверхности массивных холодных молекулярных облаков часто наблюдаются области звездообразования в виде светлых отражательных туманностей и горячих эмиссионных туманностей (HII) с внедренными в них молодыми яркими звездами. Знакомый пример — Туманность Ориона, лежащая на обращенной к нам стороне огромного молекулярного облака, занимающего немалую часть созвездия Орион. Эти звезды служат неплохими индикаторами расстояния. А лучевая скорость такого звездно-газового комплекса точно измеряется по доплеровскому смещению линии нейтрального водорода (21 см) и молекулярных линий (например, линии 2,6 мм молекулы CO). Взяв общепринятые значения констант: $R_0 = 8,5$ кпк и $\Theta_0 = 220$ км/с, Бранд и Блитц получили кривую вращения Галактики (рис. 6.10) и в диапазоне расстояний $0,2 < (R/R_0) < 2$ аппроксимировали ее простой формулой:

$$\frac{\Theta}{\Theta_0} = 1,00767 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{0,0394} + 0,00712.$$

Как видим, круговая скорость немного возрастает к краю галактического диска. Угловая скорость вращения, естественно, монотонно

уменьшается с расстоянием (рис. 6.10). Для нее аппроксимация вытекает из предыдущей формулы:

$$v_0 = 1,00767 \frac{R_0}{R}^{0,961} + 0,00712 \frac{R_0}{R}.$$

Обратите внимание: на больших расстояниях от центра ($R > 10$ кпк) быстро растут ошибки определения как расстояния, так и линейной скорости объектов. В то же время ошибки определения угловой скорости на всех расстояниях остаются очень маленькими. Предлагаю читателю самостоятельно доказать, что неопределенность значения v_0 зависит только от точности измерения лучевой скорости объекта и не зависит от ошибки в определении расстояния.

Основываясь на полученной ими скорости вращения диска, Бранд и Блитц вычислили полную массу Галактики в пределах $R = 17$ кпк: она получилась равной $4,1 \cdot 10^{11} M_\odot$. Распределение в пространстве газовых облаков и молодых звезд позволило определить центральную плоскость галактического диска в околосолнечной области радиусом около 2 кпк: оказалось, что Солнце относительно этой плоскости смещено к северу на 13 ± 7 пк. Любопытно, что признаков спиральной структуры в распределении молодых звезд по диску Галактики Бранд и Блитц не нашли.

Тот факт, что кривую вращения Бранда и Блитца называют стандартной, вовсе не означает, что нет альтернативных вариантов или что поиски в этом направлении закончились. Японские астрономы Мареки Хонма и Ёшиаки Софуе на основе обзоров HI получили заметно иную кривую вращения (рис. 6.11), которую они представили в трех вариантах: для $v_0 = 220, 200$ и 180 км/с. Как видим, при $v_0 < 200$ км/с за пределом $R = 2R_0$ кривая идет вниз. Авторы этой работы заключили, что на больших расстояниях кривая становится почти кеплеровой, следовательно, плотность массы там уже ничтожно мала. Обсудив различные методы определения параметров Галактики, Хонма и Софуе пришли к выводу, что $R_0 = 7,6$ кпк, $v_0 = 200$ км/с, радиус Галактики $R_G = 15$ кпк, а ее полная масса $M_G = (2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{11} M_\odot$. При этом авторы считают, что массивного темного гало протяженностью десятки килопарсеков у Галактики вообще нет. Весьма революционный вывод, на который астрономическая общественность прореагировала не очень активно.

Кривые вращения строят и по звездам более поздним, чем звезды спектрального класса O и B, например по классическим цефеидам, центральным звездам планетарных туманностей, углеродным звезд

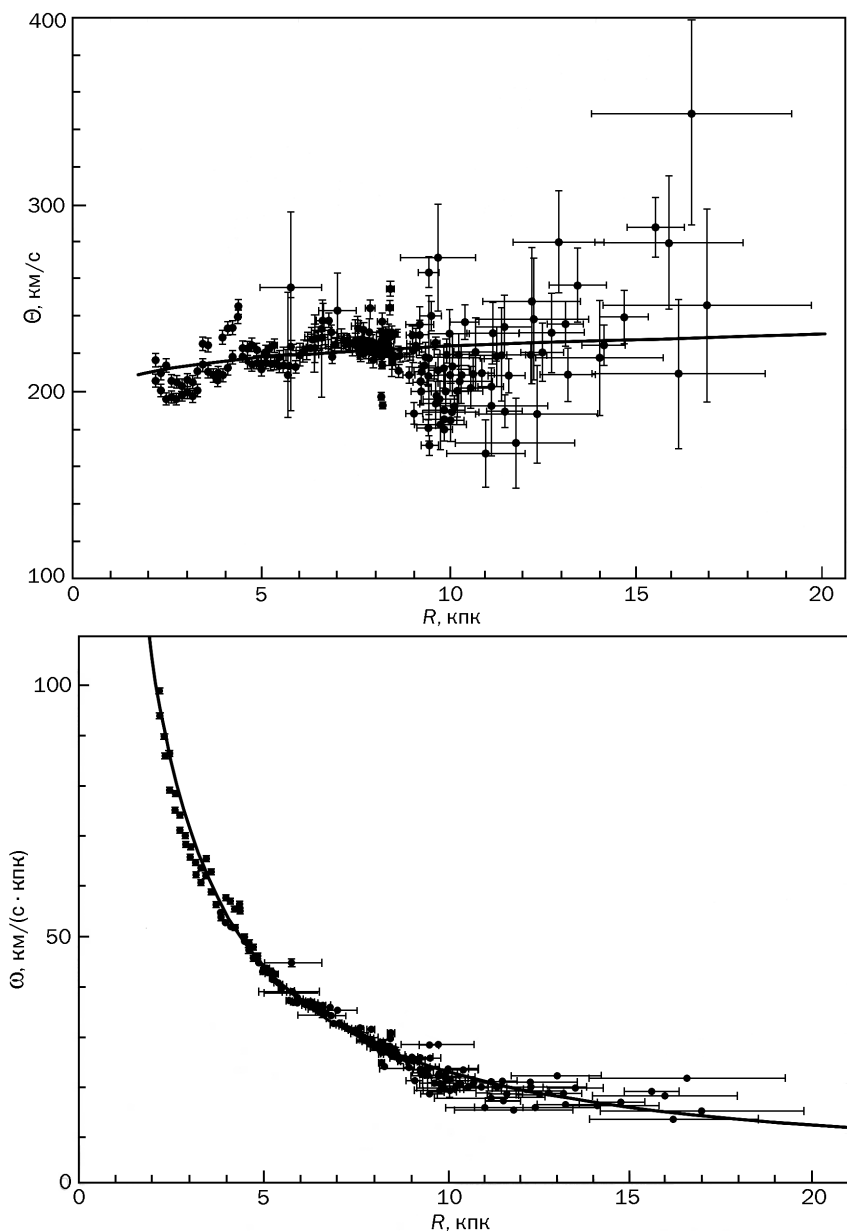


Рис. 6.10. Вверху: скорости кругового движения отдельных облаков (точки с «усами» ошибок) и выведенная на их основе кривая вращения Галактики (почти горизонтальная линия на уровне ≈ 220 км/с); внизу: угловая скорость вращения диска Галактики (Бранд, Блитц, 1993).

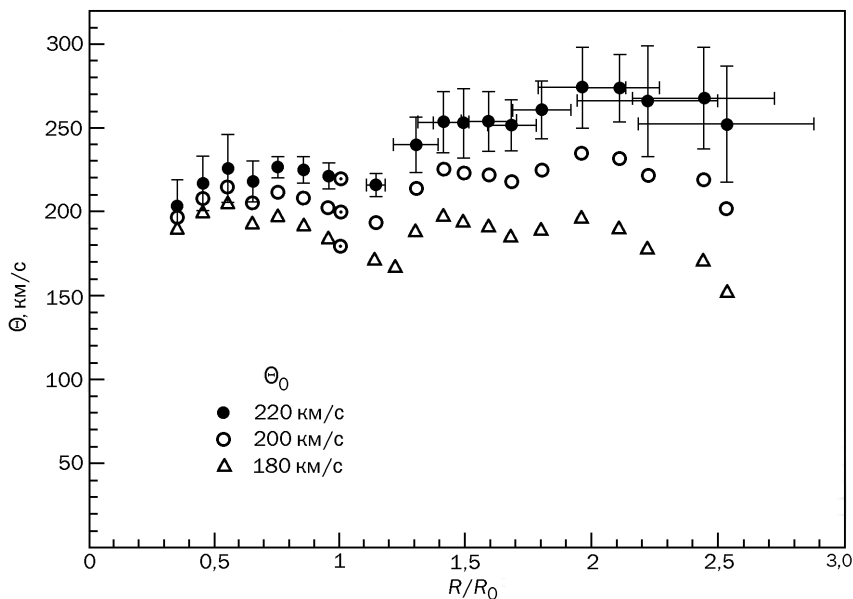


Рис. 6.11. Кривая вращения Галактики, полученная Honma и Sofue (1997) по обзорам в линии 21 см для трех разных значений Θ_0 . «Усы» ошибок нанесены только на верхней кривой; у двух других кривых они почти такие же.

дам, красным сверхгигантам типа OH/IR. В деталях эти кривые вращения отличаются от кривой вращения по газу. Из-за большей дисперсии скоростей звезд эти кривые вращения почти не имеют такой же четко выраженной тонкой структуры, связанной с прохождением спиральных рукавов, какую имеет вращение газового диска. Но основной ход всех кривых сходен.

Как уже было сказано, сравнительно недавно началось использование нового метода определения расстояний с помощью тригонометрических параллаксов мазерных источников. Это произвело переворот в построении кривой вращения, особенно для далеких областей, расположенных во внешней части Галактике. Правда, пока из-за немногочисленности измеренных этим методом источников трудно говорить о полной кривой. Но уже первые полученные данные показали, что кривая вращения во внешней Галактике почти плоская. Поэтому сегодня в существовании темного гало у Галактики абсолютное большинство исследователей уже не сомневается. Однако его точные масса и размер пока не установлены, а распределение вещества в диске Галактики и его спиральная структура находятся в стадии активного изучения.

6.4. Спиральные ветви Галактики

Как мы видели (рис. 6.3), достаточно надежный фотометрический метод измерения расстояний до ярких звезд и скоплений не удастся распространить на значительную часть Галактики из-за межзвездного поглощения света. С другой стороны, кинематический метод, основанный на доплеровском смещении линии 21 см, для которой Галактика прозрачна, не дает однозначных расстояний внутри солнечного круга. Правда, в конце 1950-х гг. были попытки получить портрет галактического диска только на основании обзоров в линии 21 см. При этом отдельные участки спиральных рукавов наметились, но четкий глобальный спиральный узор Галактики — так называемый гранд-дизайн (Grand design) — выявить не удалось (рис. 6.12). Осталось даже неясным, закручиваются или раскручиваются рукава Галактики, т. е. вращается Галактика в направлении от концов рукавов к ядру или наоборот. Отметим, что на рис. 6.12 и всех последующих, демонстрирующих Галактику в плане, мы наблюдаем ее со стороны северного галактического полюса, а вращение диска происходит по часовой стрелке.

В первой половине 1970-х гг. супруги Жоржелен из обсерватории Верхнего Прованса и Марсельской обсерватории применили комбинированный метод определения расстояний до ярких эмиссионных туманностей, связанных с крупными областями звездообразования в основном во внутренней части Галактики (Georgelin & Georgelin, 1976). Они использовали как оптические, так и радио-индикаторы расстояний: яркие звезды, возбуждающие свечение газа в областях HII; скорости самого газа, измеренные по линии H ; скорости газа, измеренные по радиорекомбинационной линии H 109 . В результате они построили первую глобальную карту спиральных рукавов в области $R \geq 4$ кпк (рис. 6.13). На первый взгляд на ней трудно заметить какой-либо «grand design», особенно в окрестности Солнца. Но астрономы Жоржелен довольно уверенно прослеживают на своей карте спиральные рукава Киль—Стрелец (1), Крест—Щит (2), Наугольник (1) и Персей (2). Солнце расположено между рукавами Персея и Киль—Стрельца. В целом, считают авторы, эти две пары симметричных рукавов можно представить моделью четырехрукавной спиральной структуры с углом наклона 12° . Как и у подавляющего большинства других спиральных галактик, в этой модели рукава закручиваются.

Работа Жоржеленов оказалась очень популярна. Их модель спиральной структуры до сих пор часто используется в качестве основы

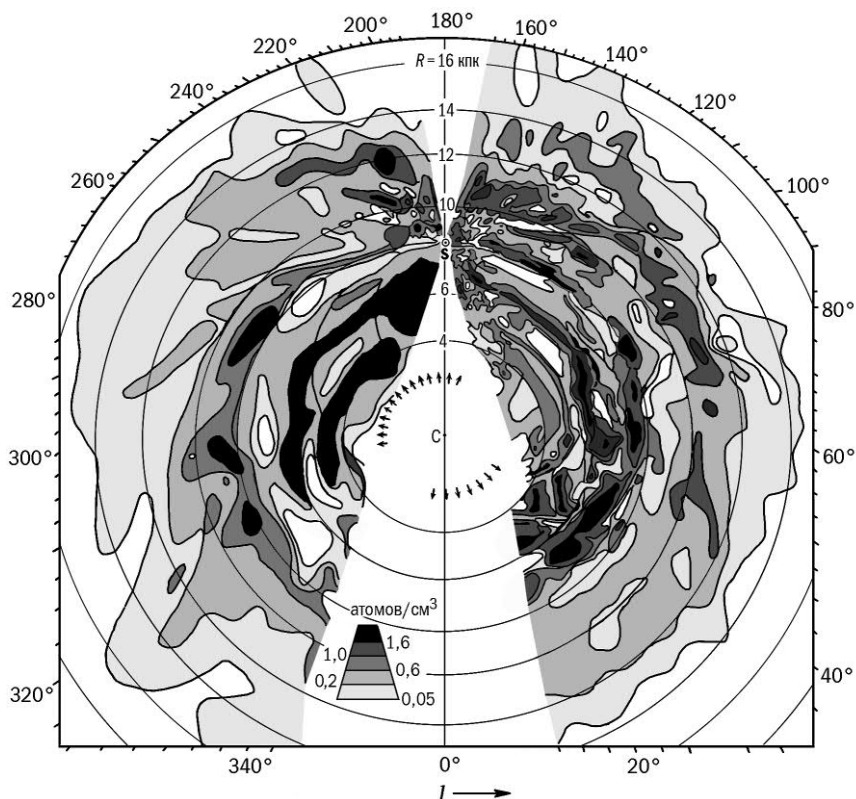


Рис. 6.12. Карта распределения плотности нейтрального водорода по наблюдениям в линии 21 см, построенная Оортом, Керром и Вестерхаутом (Oort et al., 1958) на основе модели Шмидта 1956 г. (см. рис. 6.7). В направлении на центр и антицентр Галактики кинематический метод не работает.

для более детальных работ. Ее сравнивают с другими моделями, основанными на иных индикаторах спиральных рукавов, и обычно находят хорошее соответствие. Так, модель Жоржеленов оказалась почти пригодна для описания распределения молекулярного газа (Nakanishi, Sofue, 2006), хотя при ее создании данных об этом газе еще не было. И даже самые последние модели, основанные на распределении молекулярного, атомарного и ионизованного водорода, тоже дают четырехрукавную спираль с углом наклона около 12° (Efremov, 2011).

Вы уже заметили на рис. 6.13 пять серых полосок, касательных к спиральному узору и названных «тангенциальными направлениями». Необходимо пояснить их смысл. Трудности определения расстояний до объектов в галактической плоскости и низкая точность этих рас-

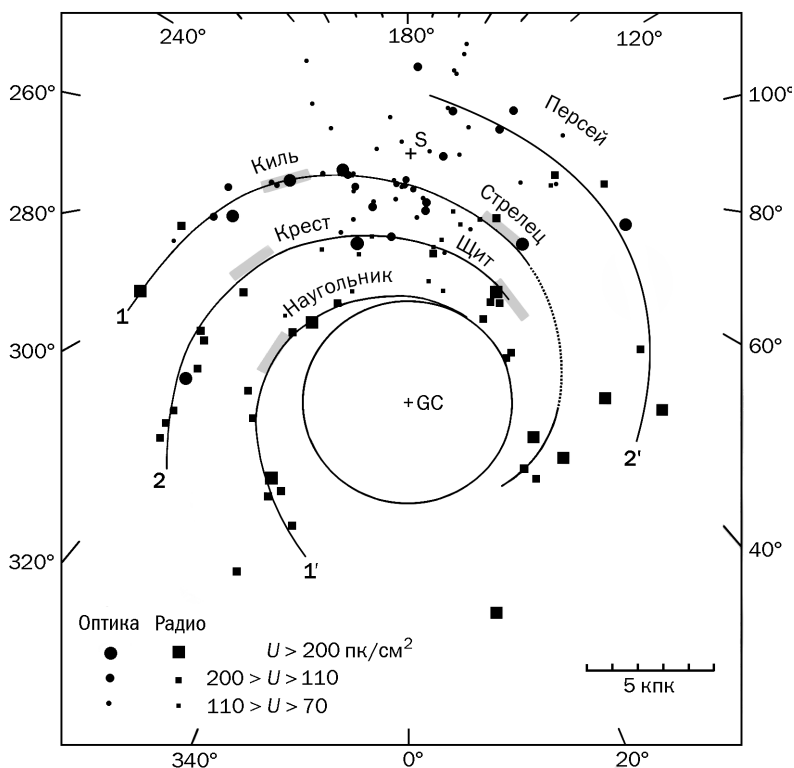


Рис. 6.13. Распределение областей НII в диске Галактики по данным Жоржеленов (1976). Параметр возбуждения (U) пропорционален мощности излучения области НII. Принято $R_0 = 10$ кпк. Серые полосы — тангенциальные направления. Кривыми показана четырехрукавная модель спиральной струк-

стояний вынудили астрономов искать иные маркеры спиральной структуры. Очевидная идея состоит в том, что если спиральные рукава населены объектами определенного типа, то, рассматривая галактический диск в проекции на разных долготах, мы увидим повышенную плотность этих объектов в тех направлениях, где луч зрения скользит вдоль рукава. Эти направления и называют «тангенциальными», т. е. касательными к спиральным рукавам. Разумеется, подобная идея может реализоваться лишь в том случае, если рассматривать Млечный Путь на тех длинах волн, для которых он прозрачен или хотя бы полупрозрачен. Это прежде всего радио- и инфракрасные лучи, а кроме того, жесткие рентгеновские и гамма-лучи.

Поскольку Солнце находится на периферии галактического диска, излучение Млечного Пути имеет широкий максимум в направле-

Таблица 6.1

Тангенциальные направления на спиральные рукава Галактики

Источник	Галактическая долгота, °						Автор, год
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
ИК, 2,4 мкм	29				332	339	Hayakawa et al., 1981
ИК, 60 мкм	26		285	313	329	340	Bloemen et al., 1990
Радио, 5 ГГц		47		305	332		Lockman, 1979
Радио, 408 МГц	32	48		310, 302	328	339	Beuermann et al., 1985
Водород HI	29	50	284	310	328		Henderson, 1977
Облака CO	25, 32	51					Dame et al., 1986
²⁶ Al	32	46		310	325		Chen et al., 1996
Области III	24, 30	47		305	332		Downes et al., 1980

нии центра Галактики, занимающий примерно треть большого круга на небе. Как и ожидалось, распределение интенсивности излучения по долготам не гладкое, а демонстрирует пики, или, как говорят, лестничную структуру, которая в целом повторяется при наблюдении в разных участках спектра или же на гистограммах распределений молодых объектов, характерных для областей звездообразования. Именно эти пики и связывают с теми направлениями, где луч зрения проходит вдоль кольцевидных или спиралевидных уплотнений — рукавов. В табл. 6.1 приведены галактические долготы наблюдаемых тангенциальных направлений: T1, T2, T3, T4, T5 и T6, соответствующих пикам распределения областей III, яркости инфракрасного излучения на длинах волн 2,4 и 60 микрон, радиоизлучения на частотах 5 ГГц и 408 МГц, излучения нейтрального водорода на волне 21 см, молекулы CO, а также излучения радиоактивного алюминия (²⁶Al), образующегося при взрывах массивных звезд, которые в силу краткости своей жизни взрываются недалеко от тех мест, где родились. Все эти различные типы излучений характерны для областей звездообразования, которые, как мы видим при наблюдении других галактик, концентрируются в спиральных рукавах. И все эти маркеры в нашей галактике, как видим, лежат практически на одних и тех же долготах. Очевидно, это и есть тангенциальные направления.

Поскольку тангенциальные направления не симметричны относительно направления на центр Галактики, понятно, что мы имеем дело не с кольцевым, а со спиральным узором. Чтобы выявить его рисунок, обычно поступают так: в рамках простой модели, например ло-

гарифмической спирали, варьируют число рукавов и угол их наклона так, чтобы добиться наилучшего совпадения с наблюдаемыми тангенциальными направлениями. К сожалению, однозначной картины этот метод не гарантирует. Так, для инфракрасных источников на волне 2,4 мкм и синхротронного излучения на волне 408 МГц этот метод дает хорошую двухспиральную структуру. Но профили излучения, соответствующего молодым объектам, дают 3- или 4-спиральную структуру.

В 2000 г. по данным инфракрасного обзора Млечного Пути, проведенного с борта спутника COBE (NASA) с помощью радиометра DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment), были получены эмиссионные профили галактической плоскости в спектральной полосе К (2 мкм) и в полосе 240 мкм. Профиль излучения в полосе К ясно показал два широких пика на отрицательных долготах, что соответствует двухрукавной модели, а профиль в полосе 240 мкм значительно лучше согласовался с четырехрукавной моделью. Известно, что излучение в области 2 мкм принадлежит в основном старым звездам спектральных классов К и М, а в области 240 мкм — газовым облакам. Поэтому авторы исследования заключили, что старое население диска демонстрирует двухрукавную спираль, а молодое звездное население и газ — четырехрукавную. Весьма неожиданный вывод! Но, разумеется, не окончательный. Работа по изучению спирального узора Галактики продолжается непрерывно. В первые годы XXI в. стал быстро возрастать объем данных о лучевых скоростях и расстояниях областей звездообразования. Кроме того, были сделаны подробные обзоры, фактически картографирование молекулярных облаков в галактической плоскости. В результате Д. Руссель с коллегами получили обновленную картину спирального узора, опираясь, с одной стороны, на фотометрические расстояния до областей звездообразования, а с другой — на кинематические расстояния более далеких областей (рис. 6.14).

Немного позже Хоу с коллегами построили спиральный узор на основе всех известных данных об основном населении рукавов — крупных областях III и гигантских молекулярных облаках (рис. 6.15). Они попробовали аппроксимировать его 2-, 3- и 4-рукавными спиралями, но остановилось на варианте полиномиальной (кусочной) логарифмической спирали, отдельные отрезки которой не связаны друг с другом. Из общей картины выпал лишь один крупный комплекс облаков с координатами $(x, y) = (12 \text{ кпк}, 4 \text{ кпк})$. Возможно, он принадлежит иному рукаву, а может быть, просто переоценено расстояние до него.

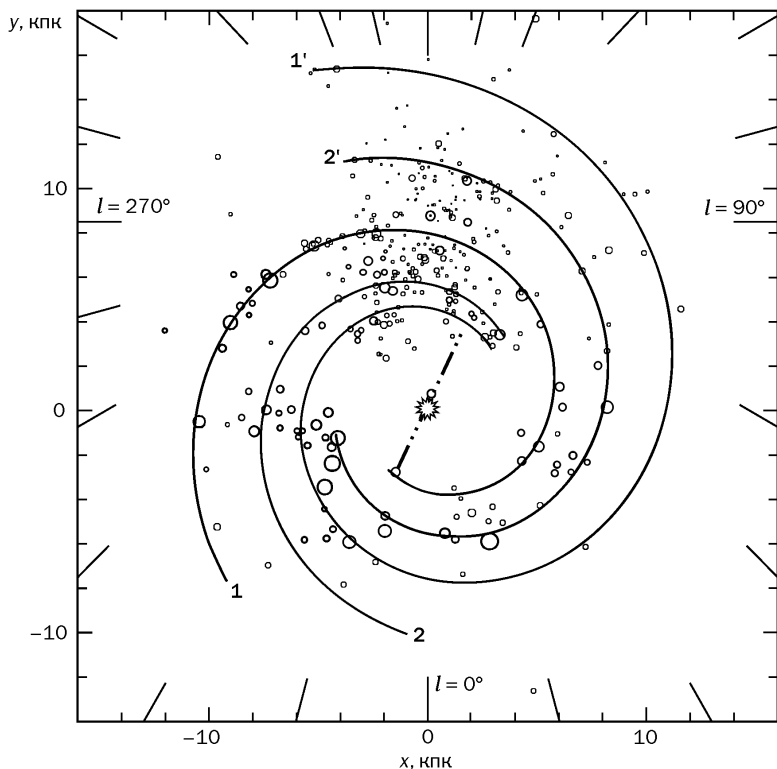


Рис. 6.14. Четырехрукавная спираль, построенная на основе распределения областей HII (Russeil et al., 2007). Размер символов пропорционален параметру возбуждения. Рукава: 1 — Sagittarius—Carina, 2 — Scutum—Crux, 1' — Norma—Cygnus, 2' — Perseus. Штрих-пунктиром показана большая ось бара.

Как видим, работы в этой области еще много: картина спирально-го узора Галактики пока не прояснилась. Взять, к примеру, публикации последних лет. У авторов, выделявших рукава Галактики по распределению газа и областей HII, угол наклона спиралей получается около 12° , а у тех исследователей, кто в качестве индикаторов спиралей использовал положения рассеянных звездных скоплений и цефеид, — около 21° . С другой стороны, анализ движения тех же рассеянных скоплений и цефеид указывает на угол около 5° . При этом каждому из результатов приписывается ошибка не более 1° .

Нет единства и в определении угловой скорости вращения спирального узора (Ω): у разных авторов она получается от 11 до 35 км/(с · кпк). В последние годы теоретики и наблюдатели постепен-

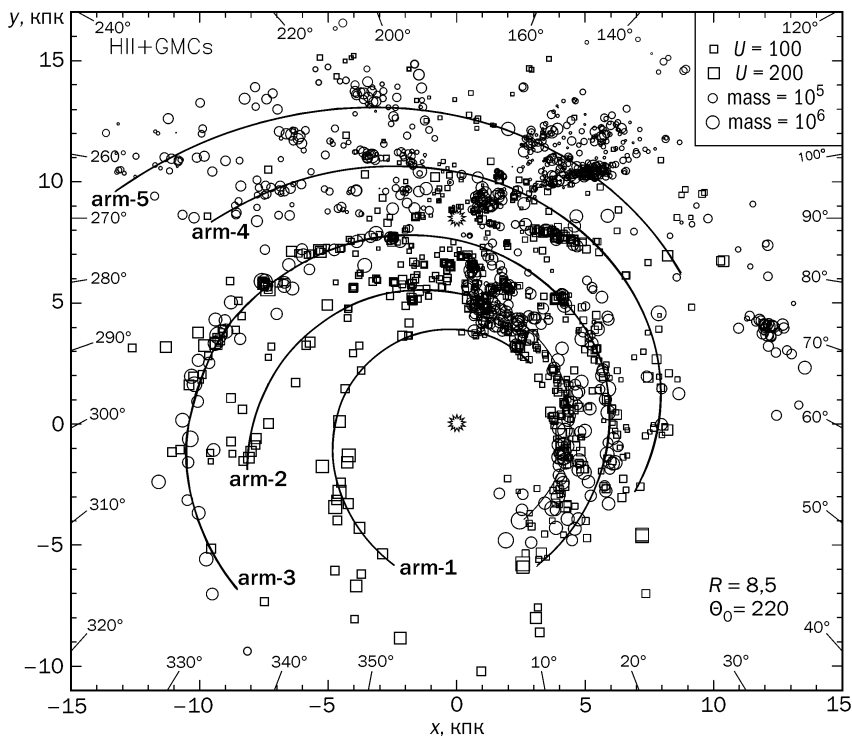


Рис. 6.15. Фрагменты спирального узора, найденные по распределению областей HII и гигантских молекулярных облаков (GMCs) с массами 10^5 – $10^6 M_\odot$. (Нои и др., 2009). На рисунке хорошо видны коридоры прозрачности, протянувшиеся от Солнца и густо наполненные объектами.

но осознают, что новые более точные и обширные данные приходят во все большее противоречие с теми простыми моделями Галактики, в рамках которых они интерпретировались лет 30–40 назад. В действительности галактический диск не плоский, а движение вещества в нем не чисто круговое (Nakanishi, Sofue, 2006). Более того: картина спирального узора не стационарна: спиральные рукава и центральный бар могут возникать и исчезать, демонстрируя сильные некруговые движения и сложные переходные формы узора (Baba et al., 2009).

Поучительный численный эксперимент проделала группа японских теоретиков (Baba et al., 2009). Они создали изошренную компьютерную модель галактического диска, учитывающую взаимодействие звезд друг с другом и с газом, влияние гравитационного поля гало, нагрев газа звездами и его охлаждение, рождение звезд из газа с реалистической функцией масс... Одним словом, они создали высокоточ-

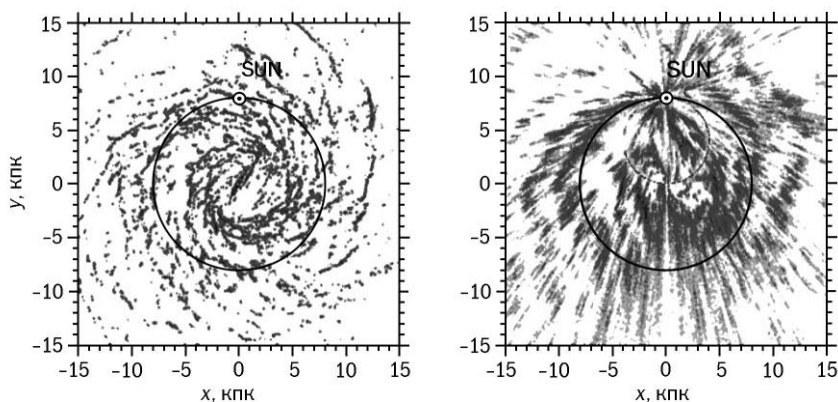


Рис. 6.16. Численная модель галактики Ваба и др. (2009) при ее условном возрасте 2 млрд лет. SUN — положение Солнца; $R_0 = 8$ кпк; $v_0 = 162$ км/с. Большая ось бара ориентирована под углом 25° к направлению на Солнце. Слева: истинное распределение холодного ($T \sim 100$ K) газа в диске. Справа: такой результат для распределения холодного газа получит наблюдатель, применив кинематический метод оценки расстояний и предполагая, что газ обращается вокруг центра галактики по круговым орбитам.

ную модель галактики, очень похожую на нашу родную, и запустили ее, чтобы посмотреть, что будет. Их целью было проверить, почему наблюдаемые скорости областей звездообразования, точно измеренные по движению присутствующих в них мазерных источников, сильно, порой на 30 км/с, отклоняются от прогноза классической теории стационарных спиральных рукавов. По мере эволюции компьютерной галактики в ее диске появился центральный бар и спиральный узор, но не глобальный, а флоккулентный, фрагментарный (рис. 6.16, слева). Возможно, он и в самом деле похож на спиральный узор нашей Галактики, но вот вопрос: можем ли мы его обнаружить?

Японские авторы смоделировали процесс изучения модельного диска галактики наблюдателем, находящимся в Солнечной системе, как если бы он сделал обзор своего «Млечного Пути» в линии излучения CO, определил лучевые скорости газовых облаков и, применив кинематический метод, вычислил их расстояния. Картина, которую он при этом получил бы (рис. 6.16, справа), разительно отличается от реальной. Дело в том, что традиционный кинематический метод, основанный на предположении о строго круговых движениях в диске, дает для расстояний объектов от Солнца ошибку в 2–3 кпк. Из-за этого картина получается «гелиоцентрическая» — ошибки расстояний «раскачивают» положение облаков вдоль направлений на Солнце, соз-

давая «finger-of-God structure». Вывести из полученной картины реальный вид диска довольно сложно. Частично подобные модели могут в этом помочь, показав, как следует компенсировать эффект гравитационных возмущений, вызванных баром. Начало этому уже положено в работе Pohl и др. (2008): см. с. 6 цветной вкладки. Но хаотическое гравитационное взаимодействие звездно-газовых комплексов друг с другом и с фрагментами спирального узора учесть практически невозможно. Поэтому авторы работы полагают, что только прямое измерение расстояний методом тригонометрических параллаксов позволит окончательно выяснить структуру диска Галактики. Они надеются, что это произойдет благодаря астрометрическому спутнику GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics), запуск которого запланирован на 2013 г. Ждать осталось недолго.

6.5. Теория спиральной структуры

Спиральная структура неизбежно возникает в самогравитирующем звездном, или газовом, или звездно-газовом диске, вращающемся так, что угловая скорость уменьшается с удалением от центра. Возникающий при этом спиральный узор вращается как твердое тело и поэтому не размывается, несмотря на дифференциальное вращение. Вещество же диска, вращаясь иначе, пересекает спирали, немного изменяя при попадании в них скорость и направление своего движения. При вхождении в спиральный рукав звездный «газ» и межзвездное вещество уплотняются и поэтому проводят внутри рукавов больше времени, чем вне их. Сам спиральный узор — это спиральная волна плотности, т. е. дополнительное гравитационное спиральное поле, наложенное на осесимметричное гравитационное поле Галактики. Такая картина подтверждается наблюдениями спиральных структур внешних галактик и нашей звездной системы.

При вхождении в спиральный рукав в уплотненном газе возникают условия для стимуляции процесса звездообразования. Звезды, родившиеся на внутреннем крае спирального рукава, движутся поперек рукава и одновременно эволюционируют. Поэтому поперек рукава должен существовать градиент возраста молодых звезд. Такой градиент действительно обнаружен многими наблюдателями. Он позволяет оценить скорость перемещения спирального узора относительно вещества. Эта оценка показывает, что Солнечная система находится вблизи той области, где скорости вращения вещества в диске и спирального узора на нем совпадают. Галактоцентрический радиус, на котором это происходит, называют радиусом коротации.

Исследования внешних галактик показали, что спиральные рукава достаточно хорошо описываются логарифмической спиралью. Основные характеристики спирального узора — это количество спиральных рукавов, их наклон к круговым орбитам и амплитуды дополнительных скоростей, приобретаемых звездами и газом при прохождении спирального гравитационного поля.

До сих пор окончательно не установлено количество спиральных рукавов у Галактики. После создания теории волн плотности довольно долго господствовало мнение, что у Галактики два спиральных рукава. Поэтому при моделировании спиральной структуры с использованием тангенциальных направлений обычно предполагали двухрукавную спираль. Однако существовали модели с четырехрукавной спиралью. Единственно достоверная картина спиральной структуры Жоржеленов хотя и прослеживала большие куски отдельных рукавов, но не укладывалась в двухспиральную модель. В дальнейшем четырехрукавный узор Галактики был обнаружен по наблюдениям молекулярных облаков, сначала во внешнем диске Галактики, а затем и во внутреннем. Жак Валле в 1995 г. подвел итог пятнадцатилетним определениям параметров спиральной структуры и получил следующие значения: у Галактики 4 спиральных рукава, форма которых лучше всего представляется логарифмической спиралью, закрученной под углом $12 \pm 1^\circ$. Однако до сих пор все эти построения не подтверждены детальной картиной спиральной структуры и расположением молодых звезд в диске.

Наблюдения нашей и других спиральных галактик показали, что плотность газа в спиральных рукавах в несколько раз превышает его плотность в межрукавном пространстве. Газовые спиральные рукава прослеживаются гораздо дальше видимых по звездам границ Галактики. К центру содержание газа растет экспоненциально, и начиная с некоторого расстояния его уже достаточно, чтобы включился процесс звездообразования. Межзвездная среда крайне неоднородна и представляет собой иерархию облаков, массы которых различаются по крайней мере на 5 порядков. Спиральные рукава населены самыми крупными облаками массой до $10^6 M_\odot$; их называют гигантскими молекулярными облаками (ГМО). Наблюдая Млечный Путь в линиях молекулы CO, удастся проследить такие облака вдоль спирального рукава в Стрельце более чем на полоборота вокруг центра Галактики.

Именно в ГМО находятся самые мощные области звездообразования и формируются большие — размером 100 пк и более — конгломераты молодых массивных звезд. Помимо оптически ярких молодых

горячих звезд, звездных скоплений и ассоциаций, в этих областях присутствуют еще более молодые звезды и протозвезды, видимые в основном в радио- и инфракрасном диапазонах спектра. Это компактные и ультракомпактные области ионизованного водорода, которые окружают крайне молодые и плотные скопления горячих звезд, еще не освободившиеся от окружающего их плотного газово-пылевого кокона, переизлучающего в инфракрасном диапазоне ультрафиолетовое излучение звезд. Такие области наблюдаются как сильные ИК-источники с температурой излучения около 100 К. Кроме того, в областях звездообразования видны яркие мазерные источники излучения в радиолиниях гидроксила, воды и метанола. Эти мазеры сопровождают самые ранние стадии образования массивных звезд и служат маяками тех мест, где они образуются.

Спиральная структура диска, несомненно, связана с глобальной структурой Галактики, в частности со строением ее центральных областей. Обзорные наблюдения молекулярного газа во внутренней Галактике принесли два важных результата. Во-первых, газ в диске образует широкое плотное молекулярное кольцо с внутренним и внешним радиусами 4 и 6 кпк соответственно. Во-вторых, в центральной области, в пределах 3–4 кпк от центра Галактики, наблюдаются большие отклонения от круговых движений. На кривой вращения Галактики в области $R = 1$ кпк наблюдается пик скорости вращения, а на 3 кпк — минимум. Нейтральный водород показывает некруговые скорости, достигающие до 270 км/с. Газ в области $-10^\circ < l < 10^\circ$, что примерно соответствует диаметру 3 кпк, показывает полукольцевую структуру с аномальными скоростями, которую можно представить как расширяющееся кольцо. Для объяснения основных аномальных скоростей газа в области 3 кпк были предложены две гипотезы. Первая предполагает расширение трехкилопарсекового рукава со скоростью 50 км/с, другая — существование эллиптических орбит, обусловленных присутствием линейной структуры (бара) с неосесимметричным гравитационным потенциалом.

Еще в 1964 г. Ж. де Вокулёр предположил, что у нашей Галактики в центре есть бар. В своей системе классификации он приписал ей тип SB(rs), т. е. спиральная система с баром, центральным кольцом вокруг бара и спиральными рукавами, отходящими от этого кольца. С тех пор аргументов в пользу существования вращающегося бара становится все больше. Они включают распределение поверхностной яркости в инфракрасных лучах, подсчет инфракрасных источников в направлении центральных областей Галактики, распределение пере-

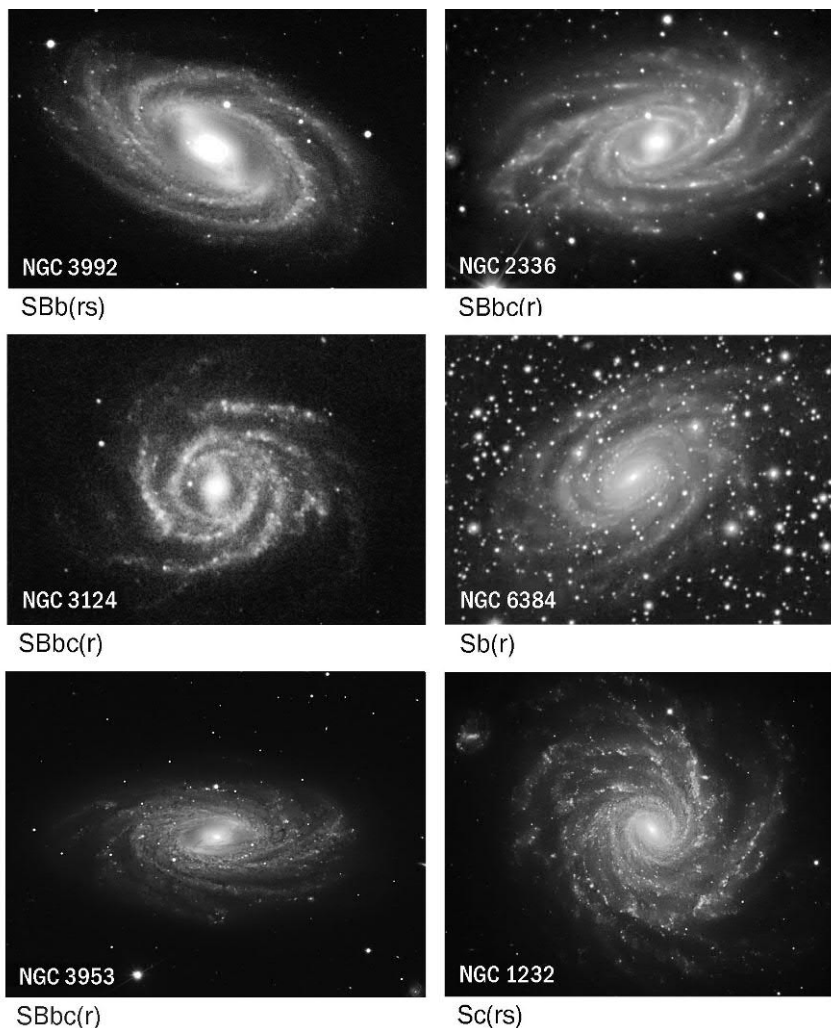


Рис. 6.17. Предполагаемые «близнецы» Галактики.

менных звезд типа Миры Кита, OH/IR-звезд на положительных и отрицательных долготах, кинематику звезд в области центральной звездной концентрации (балджа), а также движение газа вблизи центра Галактики. В начале 1990-х гг. наблюдения центральной области Галактики со спутника СОБЕ в инфракрасном диапазоне неопровержимо подтвердили существование бара и его влияние не только на центральные области Галактики, но и на кинематику объектов в окрестностях Солнца.



Рис. 6.18. Так видит Галактику художник R. Hurt (NASA) по данным астрономов. Сейчас этот рисунок наиболее точно представляет наш звездный дом.

Динамическое моделирование центральной области Галактики позволило уточнить параметры бара: отношение осей $3:1$, длина большой оси 3 ± 1 кпк, ближний к Солнцу конец бара находится в первом квадранте галактической долготы, угловая скорость бара — около $60 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпк})$. При этом явное преимущество имеет четырехрукавная модель Галактики.

Возможно, мы никогда не увидим изображения нашей Галактики извне. Но уже сегодня мы в целом представляем себе ее внешний вид и можем довольно уверенно указать похожие галактики среди соседних (см. с. 1 и 3 цветной вкладки). Известный московский исследователь переменных звезд и галактик Юрий Николаевич Ефремов считает, что однозначно определить тип нашей звездной системы пока невозможно. В своей недавней работе (Efremov, 2011) он приводит список из нескольких окружающих галактик, сходных по основным мор-

фологическим параметрам с нашей. При этом некоторые из них лишены бара, другие содержат небольшой бар. Часть из них показана на рис. 6.17. Будет ли когда-нибудь в этом ряду настоящее фото нашей Галактики? Вся надежда на коллег из соседних звездных систем!

Литература

- Baba J., Asaki Y., Makino J., Miyoshi M., Saitoh T., Wada K. The origin of large peculiar motions of star-forming regions and spiral structures of our galaxy // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 706. P. 471–481.
- Brand, J., Blitz, L. The velocity field of the outer Galaxy // *Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 275. P. 67–90.
- Efremov Yu. N. On the spiral structure of the Milky Way Galaxy // *Astronomy Reports.* 2011. Vol. 55. P. 108–122.
- Georgelin Y. M., Georgelin Y. P. The spiral structure of our galaxy determined from HII regions // *Astron. Astrophys.* 1976. Vol. 49. P. 57–79.
- Honma M., Sofue Y. Rotation curve of the Galaxy // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1997. Vol. 49. P. 453–460.
- Hou L. G., Han J. L., Shi W. B. The spiral structure of our Milky Way Galaxy // *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 499. P. 473–482.
- Nakanishi H., Sofue Y. Three-dimensional distribution of the ISM in the Milky Way galaxy: II. The molecular gas disk // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 2006. Vol. 58. P. 847–860.
- Oort J. H., Kerr F. J., Westerhout G. The galactic system as a spiral nebula. *Month. Notic. RAS.* 1958. Vol. 118. P. 379–389.
- Pohl M., Englmaier P., Bissantz N. Three-dimensional distribution of molecular gas in the barred Milky Way // *Astrophys. J.* 2008. Vol. 677. P. 283–291.
- Rohlfs K., Kreitschmann J. Kinematics and physical parameters of neutral hydrogen in the inner Galaxy // *Astron. Astrophys.* 1987. Vol. 178. P. 95–105.
- Russeil D., Adami C., Georgelin Y. M. Revised distances of northern HII regions // *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 470. P. 161–171.
- Surdin V. G. Distance to the galactic centre // *Astron. Astrophys. Trans.* 1999. Vol. 18. № 2. P. 367–372.
- Vogt N., Moffat A. F. J. Galactic structure based on young southern open clusters // *Astron. & Astrophys.* 1975. Vol. 39. P. 477–479.





ГАЛАКТИКИ: КЛАССИФИКАЦИЯ, СТРУКТУРА, НАСЕЛЕНИЕ

В. Г. Сурдин, А. В. Засов

Изучение галактик — молодая область астрономии с неустоявшейся терминологией и расплывчатыми определениями. Даже в самом названии дисциплины наблюдается разноречивость: специалисты в этой области именуют свои учебники то «Galactic astronomy» (Binney, Merrifield, 1998), то «Внегалактическая астрономия» (Воронцов-Вельяминов, 1978). Но как бы мы ее ни называли, изучаемые ею объекты не могут не восхищать.

Кстати, а что такое «галактика»? Типичное определение звучит так: «Галактика — это массивная гравитационно связанная система, состоящая из звезд, звездных остатков, межзвездного вещества и большого количества неизвестной субстанции, условно называемой темной материей». В этом определении смысл некоторых слов совершенно ясен, и их можно лишь дополнять и уточнять. Говоря о звездах, имеют в виду также и околозвездное вещество: планеты, астероиды, кометы, газово-пылевые диски, планетарные туманности. Звездные остатки — это плотные объекты, которые остаются от звезд после завершения термоядерных реакций: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Под межзвездным веществом подразумевается разреженный газ (молекулы, атомы, ионы), мелкие макроскопические частицы межзвездной пыли, быстрые частицы космических лучей; иногда к этой же категории относят и невещественные субстанции — магнитное поле и электромагнитное излучение.

Но что такое «темная материя»? И насколько массивной должна быть звездная система, чтобы называться галактикой? Четкого ответа пока нет. Загадка темной материи — актуальная проблема астрономии и физики. К ней мы вернемся в конце этой главы. А диапазон физических характеристик галактик — их размеров, масс и состава — до сих пор не определен, поскольку многообразие галактик явно шире того, что до сих пор удалось изучить. В качестве типичных масс галактик нередко указывают диапазон 10^9 – 10^{12} $M_{\odot}$. Но в каталогах галак-

тик можно встретить объекты со светимостью менее $10^3 L_{\odot}$, масса которых, возможно, не превышает $10^4 M_{\odot}$, а ведь это масса обычного звездного скопления, которые тысячами населяют любую крупную галактику. Если кто-то выражает недоумение по этому поводу, специалисты по галактикам обычно отвечают: да, бывают галактики-карлики очень малой массы, но они крупнее и поэтому разреженнее звездных скоплений сходной массы. Однако в каталогах карликовых галактик мы найдем объекты размером менее 100 пк, а в каталогах звездных скоплений — более 500 пк. Как видим, и по массе, и по размеру четкой границы между галактиками и внутrigалактическими звездными скоплениями провести не удастся. Впрочем, подобная неоднозначность характерна не только для астрономии: где граница между озером и морем, островом и материком? Поэтому не станем пока требовать от исследователей точного определения термина «галактики», а просто будем считать, что это звездные острова во Вселенной.

7.1. Морфологическая классификация

Первый шаг к изучению любых объектов — их классификация, а первым критерием для любой классификации обычно служит внешность объекта. Морфологическая классификация — это упорядочивание объектов исследования по их внешнему виду. Впервые астрономы отделили галактики от звезд еще в начале XVII в., сразу после изобретения телескопа. Разумеется, об истинной природе галактик они не догадывались, а лишь замечали разницу между обычными звездами и странными «туманными звездами», или «туманностями». Еще в 1612 г. немецкий астроном Симон Мариус первым в Европе дал описание Туманности Андромеды, а француз Николя-Клод Пейреск тогда же впервые упомянул о Большой туманности Ориона. Шли годы, совершенствовались телескопы, и астрономы обнаруживали все новые и новые туманности. Их первый список в 1714 г. составил Эдмунд Галлей; в нем всего 6 объектов. В списке Вильяма Дерхэма (1733 г.) их было уже 16, а Никола Лакайль (1755 г.) отметил 42 туманных объекта. Охотники за кометами Шарль Мессье и Пьер Мешен (1783 г.) описали 103 туманности, мешавшие им обнаруживать «хвостатые светила»; этот список и стал основой знаменитого «Каталога туманностей и скоплений звезд» Шарля Мессье (Messier Ch., Catalogue des nebuleuses et les amas d'etoiles). Вместе с другими туманными объектами в него попали и десятки тех, что мы сегодня называем галактиками (см. Приложение 1).

В течение XIX в. это число стремительно возрастало: более 2500 объектов содержал «Каталог туманностей и звездных скопле-

ний» великого наблюдателя Вильяма Гершеля (1802 г.). Его сын Джон Гершель в 1864 г. издал «Общий каталог туманностей и звездных скоплений» с данными о 5000 туманностей не только северного, но и южного неба. Когда Гершель-сын заканчивал свой «Общий каталог», состоялось замечательное изобретение XIX века — фотография. Именно астрономы раньше и больше других ученых извлекли пользу из изобретения фотопластинки. Но не сразу. В первые годы фотография не могла соперничать с визуальными наблюдениями по чувствительности к свету. В 1840–1960-е гг. астрономы фотографировали Солнце и Луну, затем — яркие звезды и планеты, и лишь в 1880-е гг. приступили к систематическому фотографированию звездного неба.

Как раз тогда (1888 г.) появился «Новый общий каталог туманностей и звездных скоплений» Джона Дрейера, знаменитый NGC (New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars). В него было занесено 7840 незвездных объектов; большего результата трудно было ожидать от человеческого глаза, даже вооруженного телескопом. К счастью, как раз тогда фотография прочно вошла в астрономию, на фотоснимках кроме звезд стало обнаруживаться множество новых туманностей. Это позволило опубликовать два дополнения к NGC, известные как «Индекс-каталоги»: IC I в 1895 г. и IC II в 1908 г. При этом общее число объектов возросло до 13 226. Среди них лишь немногие оказались скоплениями звезд, а большинство имело совершенно диффузный, размытый вид. Сомнений не оставалось: в пространстве между звездами видно «еще нечто».

Каталоги тех лет по-прежнему объединяли объекты разной физической природы и указывали лишь некоторые их внешние признаки. В середине XIX в. у некоторых туманностей впервые была замечена внутренняя структура, в частности наличие спиральных ветвей (лорд Росс, Великобритания). Фотография дала возможность документально запечатлеть изображения туманностей и их отдельных деталей, которые нельзя увидеть, наблюдая в телескоп глазом. Но звездная природа туманностей долгое время оставалась неочевидной, а расстояния до них — неизвестными.

Разумеется, определенные догадки о природе туманностей выдвигались уже давно. Еще в середине XVIII в. некоторые широко образованные ученые (Эммануил Сведенборг в Швеции, Иммануил Кант и Иоганн Ламберт в Германии, Томас Райт в Англии) высказывали идею о том, что Галактика, включающая в себя все видимые невооруженным глазом или в небольшой телескоп звезды, имеет конечные размеры и что во Вселенной существуют другие сходные с ней звездные

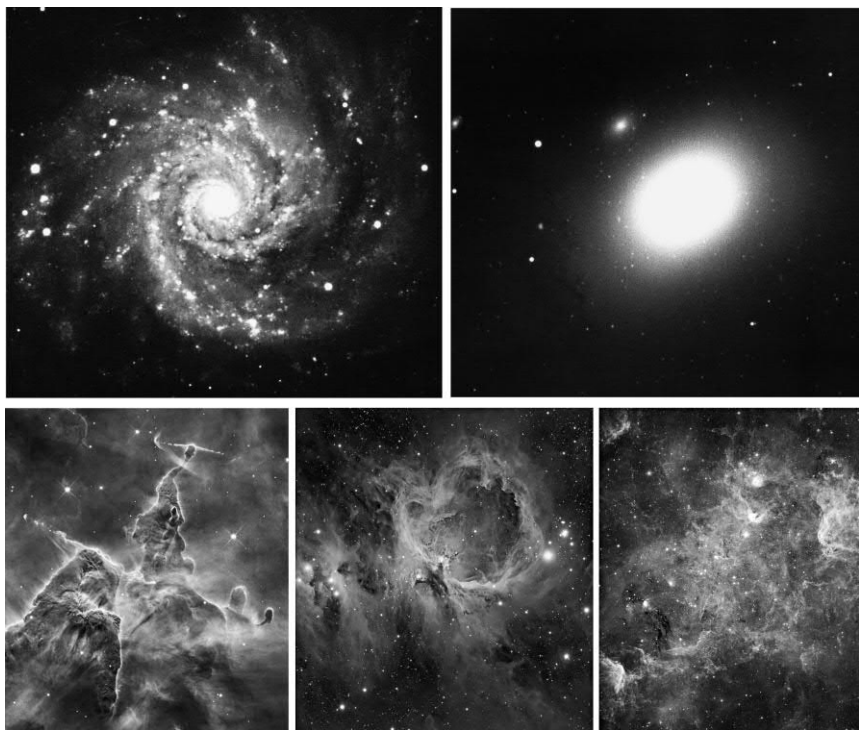


Рис. 7.1. Во внешнем виде галактик поражает их правильная форма, независимо от того, спиральная она (вверху слева) или эллиптическая (вверху справа). Этим они резко отличаются от эмиссионных галактических туманностей — горячих облаков газа, наблюдаемых в Млечном Пути (нижний ряд).

острова. Естественно было предположить, что такими «внешними» галактиками являются и светлые туманные пятна, уже занесенные в каталоги.

Отчасти продвинуться в решении загадки туманностей помогло другое великое изобретение XIX века — спектроскоп, показавший, что некоторые туманности являются облаками горячего газа. Но вместе с тем обнаруживались и туманности со звездным спектром; теперь-то мы знаем, что это отражательные туманности — холодные облака с пылью, освещенные не слишком горячими звездами. Это спутало карты: оказалось, что по спектру нельзя отличить газовое облако от далекой «звездной кучи» (именно так русские астрономы той эпохи называли звездные скопления). Поэтому об истинном масштабе туманных объектов астрономы начала XX в. не имели надежных данных. Хотя уже в конце XIX в. было понятно, что природа туманностей

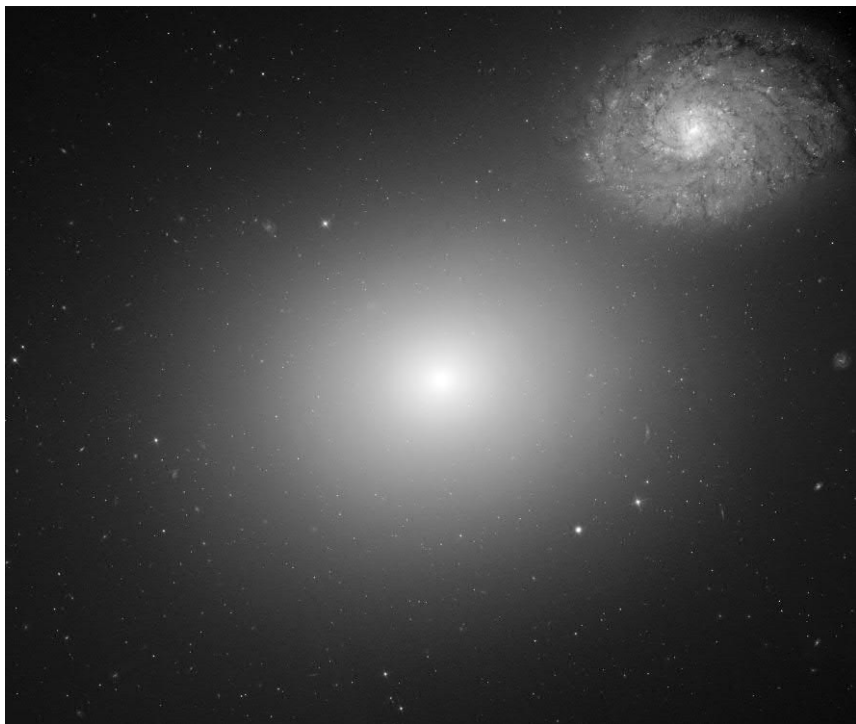


Рис. 7.2. Пара Arp 116 содержит два компонента — гигантскую эллиптическую галактику M60 и спиральную NGC 4647. Обе располагаются в скоплении в Деве (Virgo), содержащем более 1300 галактик, но прямого контакта между ними сейчас нет: расстояние до M60 — около 17 Мпк, а до NGC 4647 — чуть более 19 Мпк. Ясно видно различие между бесструктурными эллиптическими галактиками и спиральными, обладающими тонкой внутренней организацией. Система NGC 4647 своим размером (около 28 кпк) и суммарной массой звезд (около $10^{11} M_{\odot}$) очень похожа на нашу галактику, а эллиптический гигант M60 заметно крупнее, на порядок массивнее и скрывает в своем ядре черную дыру массой $4,5 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Фото: NASA, ESA, and the Hubble Heritage (STScI/AURA) ESA/Hubble Collaboration.

неодинакова: одни из них являются газовыми облаками, а другие — далекими звездными системами, но оставалось неясным, на каких расстояниях от нас они находятся и действительно ли это гигантские звездные острова, подобные Млечному Пути.

Еще в начале XX в. с помощью новых больших телескопов обсерватории Маунт-Вилсон (США) астрономам впервые удалось обнаружить изображения очень тусклых звезд на фотографиях нескольких туманностей. В 1923–1924 гг. американский астроном Э. Хаббл на

2,5-метровом телескопе этой обсерватории нашел в нескольких туманностях звезды знакомого типа — цефеиды, регулярно меняющие свой блеск. Расстояние до цефеид астрономы уже умели определять по зависимости периода изменения их блеска от средней светимости звезды. Полученные оценки расстояний до туманностей, в которых различались отдельные звезды, убедительно показали, что они действительно представляют собой звездные системы гигантских размеров, находящиеся далеко за пределами нашей галактики. Так родилась новая наука — внегалактическая астрономия.

С этого времени астрономы поняли, что галактики — это нечто особенное, далекое и гигантское. Их перестали путать с облаками газа и целенаправленно начали изучать, публикуя собранные данные в виде отдельных каталогов. Одним из первых в 1932 г. появился каталог Харлоу Шепли и Аделаиды Эймз (Shapley H., Ames A. A Survey of the External Galaxies Brighter than the Thirteenth Magnitude), содержащий 1249 галактик ярче 13-й звездной величины с указанием их видимых параметров: координат, блеска, углового размера, формы — причем в качестве характеристики формы уже был указан морфологический класс по Хабблу, введенный лишь несколькими годами ранее (см. ниже). Расстояния до большинства галактик еще не были известны, тем не менее авторы смогли прийти к выводу об однородной плотности Вселенной (методом, описанным на с. 121) и даже найти эту плотность: их оценка 10^{-30} г/см³ незначительно отличается от современной! Последнее отчасти вышло случайно: они недооценили как массу типичной галактики, взяв $10^9 M_{\odot}$, так и характерное расстояние между галактиками, приняв его равным 400 кпк.

По-настоящему массовое изучение галактик началось после создания в 1948 г. первого обзорного телескопа — 48-дюймовой камеры Шмидта Паломарской обсерватории. С его помощью был осуществлен первый глубокий фотографический обзор неба, вначале охвативший все северное и часть южного неба. Его осуществили астрономы обсерватории Маунт-Паломар, принадлежащей Калифорнийскому технологическому институту, на средства, полученные по гранту Национального географического общества США. Поэтому официальное название этого обзора такое: National Geographic Society — Palomar Observatory Sky Survey (NGS—POSS). Но в научной литературе он обычно фигурирует как Palomar Observatory Sky Survey (POSS), а в нашей литературе — как «Паломарский обзор».

Инициаторами этого обзора были Эдвин Хаббл, Милтон Хьюмсон, Вальтер Бааде, Айра Боуен и Рудольф Минковский. Первый сни-

мок был получен 11 ноября 1949 г., к 20 июня 1956 г. было закончено 99% обзора, а последний снимок был сделан 10 декабря 1958 г. Фотографирование велось на стеклянные квадратные 14-дюймовые (36 см) пластинки фирмы «Кодак». Каждый снимок покрывал область неба размером $6^\circ \times 6^\circ$, площадью около 36 квадратных градусов. Каждая область неба фотографировалась дважды: на фотопластинку, чувствительную к красным лучам, и на пластинку, чувствительную к голубым лучам. Разница блеска на этих двух изображениях позволяет грубо определять цвет небесного объекта.

Вначале обзор был проведен от северного полюса мира до склонения -24° (координата центра пластинки), то есть покрыл всю северную полусферу неба и приэкваториальную часть южной до склонения примерно -27° . Для этого понадобилось 879 пар пластинок. Позже обзор был продолжен до склонения -30° , покрыв в итоге небо до южного склонения около -34° на 936 парах пластинок. Предельная звездная величина снимков немного варьируется от области к области, в среднем имея значение 22^m . В полном виде Паломарский обзор был опубликован как 1872 негативных фотоотпечатков, каждый размером 14 $\times$ 14 дюймов. Позже обзор был продолжен на южное небо, а в 1986 г. началось цифровое сканирование фотопластинок Паломарского обзора, и в результате этой работы в 1994 г. был опубликован «Оцифрованный обзор неба» (Digitized Sky Survey), по частям доступный в Интернете.

Большинство крупных обсерваторий активно использовало и использует Паломарский обзор. Он стал основой для многих каталогов и позволил открыть много новых интересных объектов. Особенно полезен он оказался для исследования галактик и их скоплений. На его основе были созданы знаменитые каталоги: «Морфологический каталог галактик» (1962–1968) Б. А. Воронцова-Вельяминова, содержащий детальное описание внешности 29 тыс. галактик; «Каталог галактик и скоплений галактик» (1961–1965) Фрица Цвикки (Zwicky F. et al. Catalogue of Galaxies and Clusters of Galaxies) и др. Этот богатейший материал продемонстрировал чрезвычайное разнообразие форм галактик и стал основой для их морфологической классификации. Путем объединения галактик в группы по одной или нескольким характеристикам, таким как форма, спектр и светимость, были разработаны различные схемы классификации для наведения порядка в этом галактическом «зверинце». Познакомимся с несколькими из этих схем, хотя их гораздо больше, включая схемы классификации радиогалактик или других редких звездных систем (Sandage, 1975).

7.1.1. Классификация по Хабблу

Это наиболее известная и часто используемая схема, развитая Эдвином Хабблом в 1923 г. и опубликованная в 1925–1926 гг. Мы уже не раз использовали ее в предыдущих главах. Эта схема основана только на наблюдаемой форме галактики. Согласно классификации Хаббла, выделяется три основных типа галактик: спиральные (S, SB) и эллиптические (E) галактики, которые весьма симметричны, и неправильные, или иррегулярные (Ir или Irr), имеющие несимметричный, клочковатый вид. Буквенные обозначения этих типов происходят от английских слов *spiral*, *elliptical* и *irregular*.

Эллиптические галактики почти никогда не демонстрируют какой-либо внутренней структуры, а лишь монотонное возрастание яркости к центру, хотя в пределах 1–2 кпк от центра в редких случаях у них все же наблюдаются небольшие звездные или газовые диски. Спиральные галактики оправдывают свое название, демонстрируя спиралевидный узор на диске. Их подразделяют на два подтипа — нормальные спирали (S) и спирали с перемычкой, или баром (bar), которые иногда называют пересеченными спиралями (SB). У нормальных спиралей рукава начинаются практически от самого центра, а у пересеченных отходят от концов прямолинейной структуры (бара, перекладины), симметрично пересекающей центр галактики.

Группу эллиптических галактик представляет ряд, начинающийся с галактик круглой формы (E0) и заканчивающийся очень вытянутыми галактиками (E6 и E7). Цифра в этих обозначениях указывает степень наблюдаемой вытянутости эллипсоида и вычисляется по формуле $10(a - b)/a$, где a и b — длина большой и малой осей эллипса, аппроксимирующего видимую форму галактики.

Кроме этого, нормальные и пересеченные спирали подразделяются по степени закрученности рукавов, которая указывается в виде строчной латинской буквы «a», «b» или «c» в порядке уменьшения плотности закрутки рукавов и роста их клочковатости. Нормальные спирали охватывают диапазон от Sa с туго закрученными рукавами до Sc с большим расстоянием между рукавами, быстро удаляющимися от центра по мере продвижения от начала рукава в центре галактики к его окончанию на краю диска. Такую же последовательность образуют и пересеченные спирали: SBa, SBb и SBc. Подгруппы спиральных галактик Хаббл называл «ранними» (Sa и SBa), «промежуточными» (Sb и SBb) и «поздними» (Sc и SBc).

Различие между близкими по хаббловскому типу спиральными системами можно продемонстрировать на примере ближайших

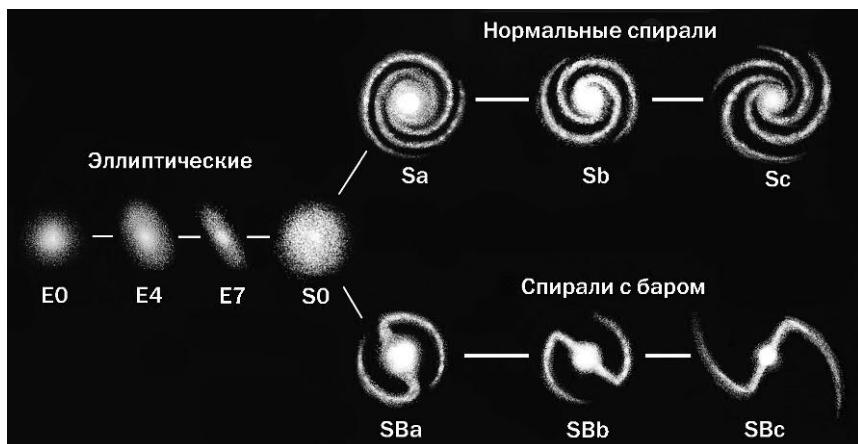


Рис. 7.3. Схема классификации галактик по Хабблу (классический вариант «камертонной» диаграммы).

крупных спиралей — Туманности Андромеды (M31) и нашей галактики Млечный Путь. По Хабблу они различаются не очень сильно, но физические различия между ними вполне заметны (табл. 7.1). Хотя их диски более или менее сходны (за исключением предполагаемого бара у нашей галактики), сферические подсистемы у них существенно разные: у Андромеды светимость балджа втрое больше нашего, он значительно богаче населен шаровыми скоплениями, а на его периферии располагаются два могучих эллиптических спутника — M32 и NGC 205. В то же время на периферии Млечного Пути мы имеем два крупных неправильных спутника — Магеллановы Облака, и содержание газа в нашем диске немного выше, чем в Андромеде; возможно, эти различия как-то связаны между собой. Кроме того, при сходном содержании газа в дисках темп звездообразования в нашей галактике заметно выше, чем в Андромеде, поэтому считать эти галактики копиями друг друга было бы неоправданным упрощением.

К своей исходной схеме классификации галактик Хаббл позже добавил категорию S0 («эс-ноль») для описания, как он считал, переходного типа между эллиптическими и спиральными системами. Он определил тип S0 как линзообразные (англ. *lenticulars*) системы с ядрами, окруженными дискообразной структурой, лишенной газового диска и спиральных рукавов. Еще позже Аллан Сэндидж разделил эту категорию на нормальные линзовидные галактики (S0) и линзовидные галактики с баром (SB0). А позже и эти типы распались на

Таблица 7.1
Сравнение нашей галактики и М31

Характеристики	М31 (Андромеда)	Галактика (Млечный Путь)
Морфологический тип по Хабблу	Sb	S(B)bc
Балдж		
Светимость ($L_{\odot}$)	$7,7 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Светимость (доля от полной)	0,25	0,12
Эффективный радиус R_e (кпк)	2,2	2,7
Отношение осей	0,57	0,85
Дисперсия скоростей (км/с)	155	130
Количество шаровых скоплений	400–500	160–200
Диск		
Светимость ($L_{\odot}$)	$2,4 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$
Экспоненциальный масштаб диска h (кпк)	6,4	3–5
Показатель цвета $B-V$ (точность $\pm 0,1$)	0,76	0,85
Содержание газа HI ($M_{\odot}$)	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$
Скорость вращения (км/с)	260	220–240
Инфракрасная светимость ($L_{\odot}$)	$2,6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{10}$
Градиент металличности газа (dex/кпк)	–0,04	–0,08

группы S0₁, S0₂ и S0₃ в соответствии со степенью выраженности пылевой полосы вдоль их большой оси: наиболее заметна она у галактик типа S0₃.

Происходили и другие дополнения схемы Хаббла. Например, Жерар де Вокулёр ввел между классами Sc (SBc) и Irr переходные типы Sd (SBd) и Sm (SBm), где буква «m» указывает на сходство с Магеллановыми Облаками. Для облегчения статистических исследований галактик Вокулёр ввел шкалу числовых ступеней T , которые он поставил в соответствие расширенной им последовательности хаббловских типов. Эллиптические галактики он разделил на три ступени: компактные (cE), нормальные (E) и позднего типа (E⁺). Так же разделил и линзовидные системы: ранние (S0[–]), промежуточные (S0) и поздние (S0⁺). Неправильные галактики могут быть магелланового типа ($T = 10$) и «компактные» ($T = 11$).

Классификацию Хаббла часто изображают графически в виде «камертонной» диаграммы (рис. 7.3, 7.4 и 8.1). Ножкой камертона служит последовательность эллиптических галактик от E0 до E7. У типа S0 она раздваивается, превращаясь в «вилку» — в две последовательно-

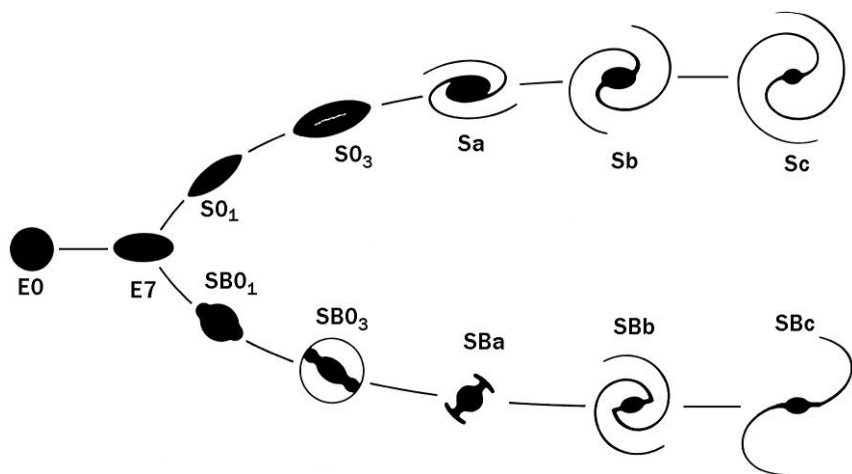


Рис. 7.4. Развитие классификации по Хабблу происходило в основном за счет детализации класса линзовидных галактик S0, который разделили на S0₁, S0₂ и S0₃, а также соответствующие системы с баром.

сти спиральных галактик. Вдоль одной из них идут нормальные спирали (от Sa до Sc), а вдоль другой – пересеченные (от SBa до SBc). Неправильные системы обычно в этот «камертон» не вписывают либо располагают за галактиками Sc и SBc (см. рис. 7.11), поскольку неправильные галактики имеют предельно клочковатый вид. В наши дни иногда говорят, что галактики относятся к «ранним» (E и S0) или

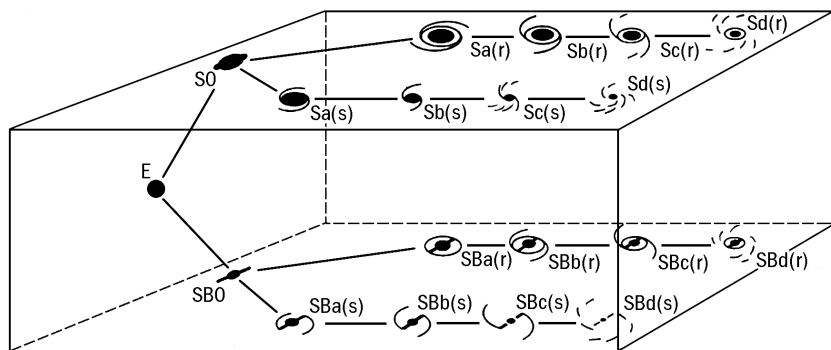


Рис. 7.5. Объемная версия диаграммы Хаббла, предложенная Полом Ходжем (Hodge, 1966). Здесь нормальные спирали и спирали с баром разнесены по разным плоскостям, а «вилке камертона» соответствует деление на спирали с кольцом (r) и без кольца (s).

Таблица 7.2

Расширенная хаббловская классификация (по Вокулёру)
и соответствующая последовательность числовых ступеней

Ступень <i>T</i>	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Тип Вокулёра	cE	E	E ⁺	S0 [−]	S0 ⁰	S0 ⁺	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im	

«поздним» (Sb, Sc, Irr) типам. Это отголосок устаревших представлений о том, что галактики эволюционируют вдоль последовательности E S Irr, как, по-видимому, полагал сам Хаббл.

Следует иметь в виду, что внешний вид галактики, а значит, и ее морфологический тип в некоторых случаях может сильно зависеть от того, как именно получено изображение звездной системы. Особенно это проявляется у галактик с мощной сферической составляющей, яркость которой значительно возрастает к центру и может маскировать внутренние структурные элементы галактики. Например, галактика IC 3328 в скоплении Virgo обычно классифицировалась как карликовая эллиптическая система. Действительно, именно так она выглядит на стандартных снимках неба, где ее внутренняя часть не демонстрирует деталей, поскольку изображение этой области существенно передержано (рис. 7.6, слева).

Намереваясь измерить расстояние до этой галактики методом флуктуаций поверхностной яркости (раздел 7.2), астрономы Европейской южной обсерватории сгладили цифровым методом мягкой мас-

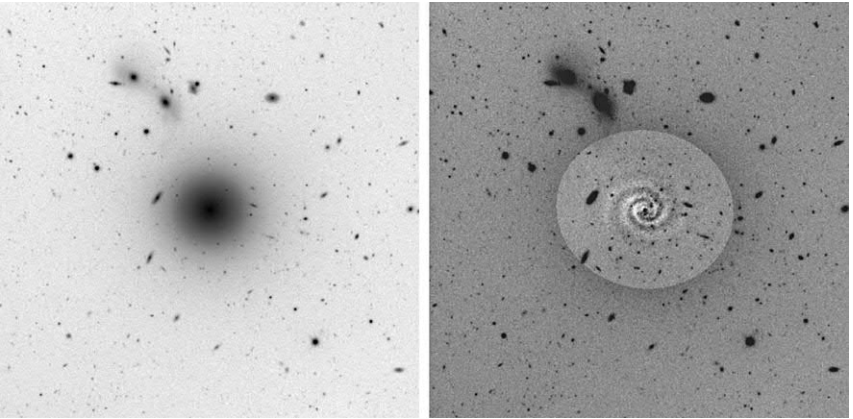


Рис. 7.6. Галактика IC 3328 (негатив). Слева — обычный снимок, а справа на изображении галактики выровнен градиент яркости и усилен контраст. Фото: VLT ESO.

ки градиент яркости изображения и усилили его контраст. К удивлению ученых, на изображении проступила спиральная структура. Ее контраст очень мал — всего 3% от фона, поэтому на исходном снимке она не была заметна. В результате галактика, которая прежде классифицировалась как карликовая эллиптическая с ядром (dE1, N), «превратилась» в карликовую линзовидную систему (dS0) с очень слабым спиральным узором. Диаметр ее спирального узора всего 4,5 кпк, так что это самая маленькая из галактик со спиральными рукавами. Но поскольку они слабо выраженные и чисто звездные (в них не заметно ни пыли, ни газа в виде эмиссионных туманностей), ее все же отнесли к линзовидным системам.

7.1.2. Классификация по Моргану (Йерксская система)

Схема, разработанная Уильямом Морганом (W. W. Morgan), опирается на форму галактики, интегральный оптический спектр ее центральной конденсации (балджа, от англ. *bulge* — вздутие) и степень концентрации звёзд к центру системы. В этой схеме спектральные типы галактик обозначаются как a, af, f, fg, g, gk и k в соответствии со спектральной последовательностью звезд (A, F, G, K). Отдельно степень концентрации не указывается, поскольку она сильно коррелирует со спектром: звезды спектрального класса K показывают сильную концентрацию к ядру галактики, а звезды класса A — слабую. Поэтому галактики типа «a» — это поздние спирали и неправильные системы вроде Магеллановых Облаков, а галактики типа «k» — гигантские эллиптические системы и спирали вроде M31, у которой значительную долю светимости в визуальном диапазоне обеспечивает аморфная центральная конденсация.

Формы галактик обозначаются как S (спиральная), B (пересеченная спираль), E (эллиптическая), I (неправильная), E_p (эллиптическая с поглощением света пылью), R (круговая симметрия без явных признаков спиральной структуры или эллиптической формы), D (эллиптическое ядро с протяженной оболочкой), L (низкая поверхностная яркость) и N (маленькое яркое ядро). Наклон к лучу зрения может изменяться от 1 (плашмя, круглая) до 7 (с ребра, $a/b = 10$). Например, галактика Андромеда по этой классификации обозначается как kS5. Гигантские эллиптические галактики с очень протяженными и массивными оболочками обозначаются как cD (такие часто обнаруживаются в центрах скоплений). Эту схему Морган разработал в Йерксской обсерватории, отсюда и ее второе название — Yerkes system. Учитывая спектр/цвет галактики, система Моргана сообщает нам кое-что

об ее эволюционном статусе — об интенсивности звездообразования в недавнем прошлом, тогда как другие схемы классификации концентрируются лишь на внешнем виде галактики.

7.1.3. Классификация по Вокулёру

Эту схему для классификации спиральных галактик предложил известный французский астроном, в основном работавший в США, Жерар де Вокулёр (Gérard Henri de Vaucouleurs). Учитывая, что толчком для ее создания стали дискуссии Вокулёра с Алланом Сэндиджем в 1955 г. по поводу возможного развития классификации Хаббла, предложенную Вокулёром в 1959 г. схему классификации иногда называют «классификацией Вокулёра—Сэндиджа» (de Vaucouleurs—Sandage classification), но чаще просто «классификацией Вокулёра». Ее схема имеет трехмерную фигуру веретена (рис. 7.7), хотя возможна и двумерная ее проекция (de Vaucouleurs, 1959). Основным недостатком классификации Хаббла Вокулёр считал то, что разделение спиральных галактик только на системы с баром и без бара недостаточно полно отражает реальный диапазон морфологических особенностей спиралей. В частности, он указывал на такие их структурные особенности, как кольца и балджи. В основе своей системы Вокулёр сохранил хаббловское разделение галактик на эллиптические, линзовидные, спиральные и неправильные. Классификация эллиптических галактик тоже сохранилась. Изменения затронули классификацию спиральных и в меньшей степени линзовидных и неправильных галактик.

Подсчеты показали, что галактик с баром примерно столько же, сколько и галактик без бара. Поэтому называть именно галактики без бара нормальными (normal spirals) по меньшей мере странно. Вокулёр предложил называть их простыми (ordinary spirals) и обозначать как SA, тогда как спирали с баром (barred spirals) сохранили свое обозначение SB. При этом простые спирали стали не более нормальными, чем спирали с баром. Галактики, обладающие свойствами как SA, так и SB, отнесены к переходному классу SAB. Те спиральные галактики, которые невозможно точно классифицировать (в силу низкого качества изображения, сильного наклона к лучу зрения и т. п.) обозначены просто как S. Такие же изменения коснулись линзовидных галактик: системы без бара получили обозначение SA0, с баром — SB0, переходный тип — SAB0. Обозначение S0 осталось за галактиками, которые не удалось классифицировать более детально.

Указанные семейства спиральных и линзовидных галактик обладают в той или иной форме структурой, которая по Вокулёру имеет

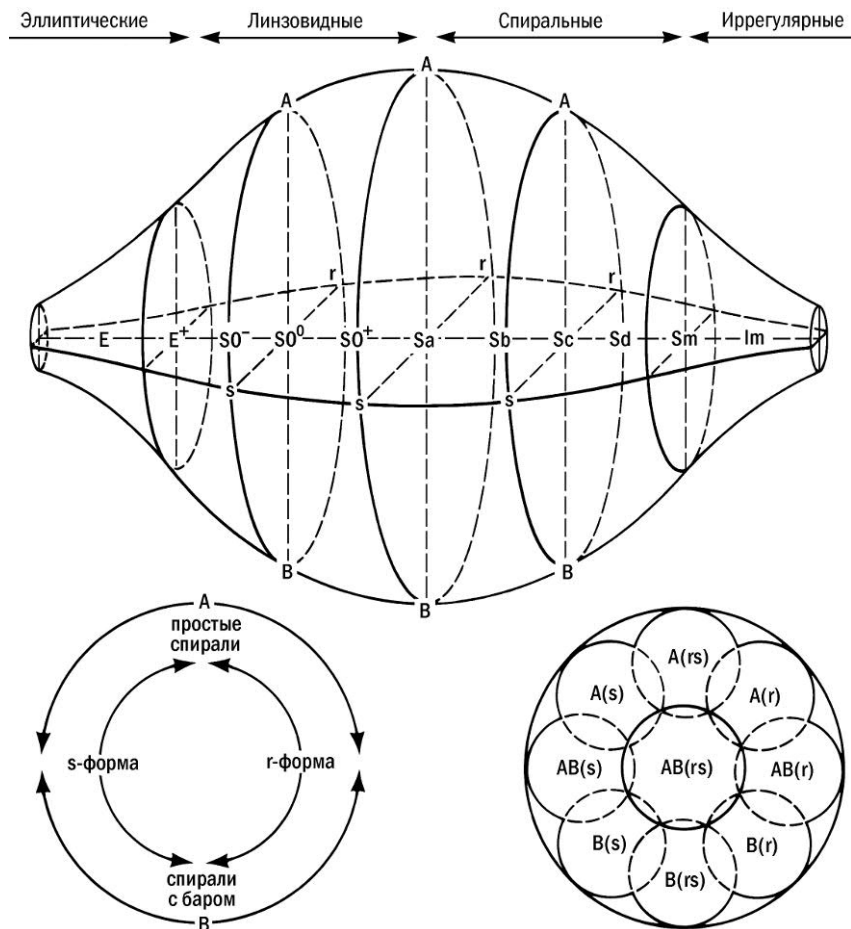


Рис. 7.7. Схема классификации по Вокулёру (1959). Это расширенная схема Хаббла, в которую добавлено еще одно, третье, измерение, позволяющее различать s-образные ветви и кольца (r — от *ring*).

спиральный или кольцообразный вид — это кольцо вокруг центра галактики, от которого отходят спиральные ветви. Кольцеобразные разновидности галактик получили индекс r , а спиральные — s в виде строчной буквы в скобках после основного индекса. Для переходных разновидностей было введено обозначение rs . Например: $SA(s)$ — простая S-образная спиральная галактика; $SB(r)$ — спиральная галактика с баром и внутренним кольцом. Наличие слабого большого внешнего кольца Вокулёр отмечал буквой R , помещенной перед символами,

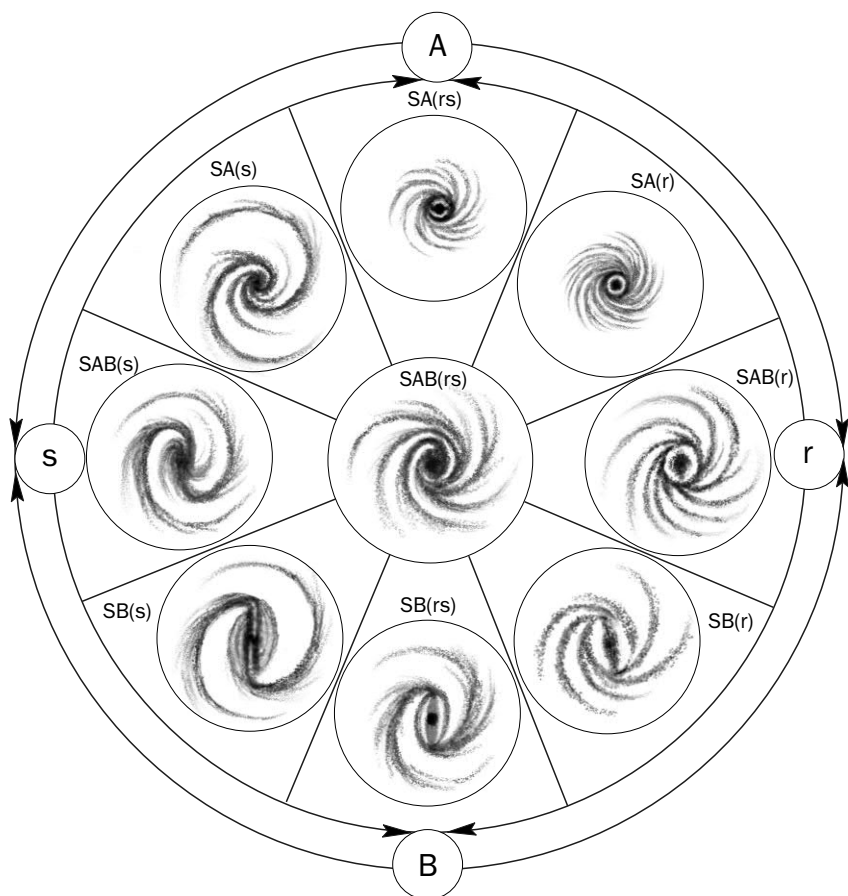


Рис. 7.8. Сечение трехмерной диаграммы Вокулёра на уровне спиральных галактик с примерами их внешнего вида (изображения негативные).

обозначающими тип галактики. Чаще всего такие структуры встречаются у галактик типа S0/a — это переходный тип от линзовидных к спиральным.

Степень развитости спиральной структуры, как и у Хаббла, обозначалась справа маленькими буквами a, b и c по мере уменьшения плотности закрутки рукавов, т. е. в сторону «поздних» классов. Был добавлен и очень поздний класс Sd для спиралей с клочковатой структурой и слабо выраженным ядром. Например, Туманность Андромеды в этой системе обозначается как SA(s)b. Для более тонкой градации были добавлены и переходные классы Sab, Sbc и Scd. Переходный класс к неправильным галактикам, так называемые магеллановы

спирали, получили обозначение Sm: например, Большое Магелланово Облако — SB(s)m.

Для галактик, видимых с ребра, было предложено обозначение sp от англ. *spindle* — веретено. На этот счет в учебнике Б. А. Воронцова-Вельяминова встречаем едкое замечание: «Галактики, смело классифицированные во всех подробностях, когда они повернуты ребром и их структура не видна, к счастью, дополняются символом sp».

Классификацию неправильных галактик Вокулёр рассматривал как продолжение классификации спиралей. Так, галактики, в которых не удалось обнаружить спиральную структуру, но которые по всем остальным признакам походили на магеллановы спирали, получили обозначение I(m), например Малое Магелланово Облако. В достаточно крупных галактиках класса I(m) удастся обнаружить зачатки (или остатки) бара, что позволяет считать их крайним случаем галактик SB, тогда как более симметричные представители класса I(m) можно считать вырожденным случаем галактик типа SA. Различия исчезают для карликовых галактик низкой поверхностной яркости, которые получили обозначение dI, по аналогии с карликовыми эллиптическими галактиками dE. Вообще, префикс «d» был зарезервирован для всех карликовых галактик, несмотря на то, что карликовых спиральных или линзовидных галактик в то время еще не было обнаружено. Впрочем, это уже выпадает из классификации галактик по их виду и требует знания их светимости.

7.1.4. Классификация по ван ден Бергу (система DDO)

Эту схему предложил известный канадский астроном Сидни ван ден Берг (Sidney van den Bergh); ее второе название — DDO-классификация (от David Dunlap Observatory). Она включает в себя два параметра — морфологический тип и класс светимости. Тип галактики (E, Sa, Sb, Sc, Ir) указывается просто по Хабблу. Между линзовидными галактиками без спирального узора (S0) и ярко выраженными спиралями, богатыми газом (S), появилась промежуточная последовательность «бледных спиралей» (A, от *anemic spirals*). Обозначение S(B) введено для описания промежуточных объектов между нормальными и пересеченными спиралями. Класс светимости (I, II, III, IV, V) аналогичен классификации звезд по светимостям: I — сверхгиганты, II — яркие гиганты, III — гиганты, IV — субгиганты, V — карлики. Классу I соответствует абсолютная звездная величина в фильтре B около $-20,5^m$ (т. е. $2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$), а классу V — звездная величина -14^m ($10^8 L_{\odot}$).

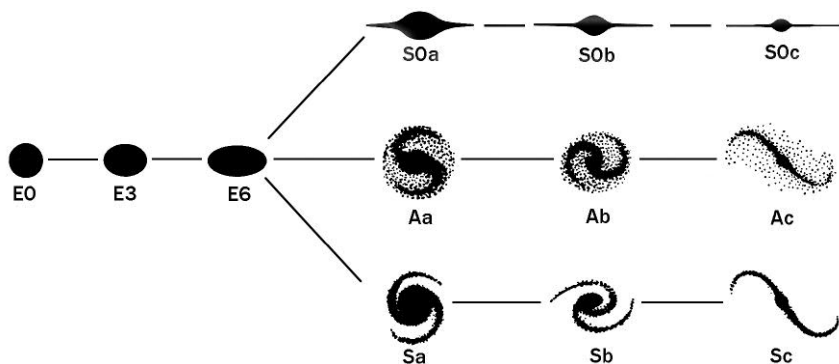


Рис. 7.9. Диаграмма-«трезубец» ван ден Берга. Это морфологическая часть его классификации, не учитывающая класс светимости галактики. К тому же для спиральных систем здесь показана только одна плоскость. На второй, параллельной ей плоскости располагаются соответствующие спирали с баром, как на диаграмме Ходжа (рис. 7.4).

Не известно ни одной спирали типов Sa или Sb, светимость которой была бы меньше, чем у класса III. Зато диапазон светимости эллиптических галактик чрезвычайно широк. Сам Хаббл, разрабатывая классификацию галактик, имел в виду только гигантские эллиптические системы, но позже были открыты и исследованы небольшие галактики эллипсоидальной формы, как правило, — спутники гигантских. Их принято делить на карликовые эллиптические (dwarf elliptical, dE) и карликовые сфероидальные (dwarf spheroidal, dSph) системы. Первые, несмотря на свой малый размер, имеют высокую поверхностную яркость, как у нормальных эллиптических галактик; традиционный пример — M32, спутник Туманности Андромеды. А карликовые сфероидальные системы — значительно более бледные, такие как система в Скульпторе или многие другие спутники нашей галактики и Туманности Андромеды (см. Приложение 8). Некоторые авторы склонны причислять к эллиптическим галактикам даже далекие от центра Галактики («межгалактические») шаровые звездные скопления как пример предельно маломассивных систем этого типа, тем более, что звездный состав шаровых скоплений практически не отличается от состава эллиптических галактик.

7.1.5. Развитие классификации галактик

Схемы классификации галактик постоянно развиваются в связи с освоением новых диапазонов спектра и новых методов обработки изображений. Например, на фотографиях галактик в ближнем ИК-диапа-

Таблица 7.3

Системы классификации галактик

Система	Основные критерии	Символы	Примеры
Хаббла—Сэндиджа	Наличие бара, плотность закрутки спиральных рукавов или отношение диск/балдж, степень выраженности спиралей	E, S0, S, SB, Ir a, b, c	M87 = E1 M31 = Sb M101 = Sc LMC = Irr I
Вокулёра	Наличие бара, плотность закрутки спиралей или отношение диск/бар, кольцо или s-форма	E, S0, S, SB, I a, b, c, m (r), (s)	M87 = E1P M31 = SA(s)b M101 = SAB(rs)sd LMC = SB(s)c
Моргана (Йерксская)	Степень концентрации яркости к центру, цвет/спектр, наличие бара, степень однородности	k, g, f, a E, R, D, S, B, I	M87 = kE1 M31 = kS5 M101 = fS1 LMC = af12
Ван ден Берга (DDO)	Богатство диска молодыми звездами, наличие бара, степень концентрации яркости к центру, форма и длина спиралей	E, S0, A, S, Ir B a, b, c I, ... V	M87 = E1 M31 = Sb I–II M101 = Sc I LMC = Ir III–IV

зоне менее заметны пылевые структуры, полнее проявляется звездное тело галактики. Поэтому проведенный под эгидой NASA в 1997–2001 гг. наземный обзор всего неба в диапазоне 2 мкм (Two Micron All-Sky Survey, 2MASS) позволил узнать много нового о строении центральной области нашей галактики (у нее определенно проявился бар) и уточнить схемы классификации прочих галактик. Еще более интересные результаты дали изображения галактик в дальнем ИК-диапазоне, полученные космической обсерваторией «Спитцер» (NASA, 2003–2009 гг. в холодном режиме). К сожалению, длинноволновые инструменты пока не дают детальных изображений далеких галактик, но создание микроволнового комплекса ALMA исправит положение.

Не решена пока и еще одна насущная проблема — автоматическая классификация галактик. В доступной для наблюдений области Вселенной многие миллиарды галактик. В последние годы массовые обзоры неба, такие как SDSS (Sloan Digital Sky Survey), уже позволили получить изображения и параметры (блеск, цвет, спектр) почти миллиона галактик, причем эта работа высоко автоматизирована. И только морфологическая классификация остается «ручной» работой: программы распознавания пока не справляются с ней. Поэтому на помощь профессиональным астрономам пришли волонтеры: бо-

лее 250 тысяч любителей астрономии участвует в сетевом проекте «Galaxy Zoo» (www.galaxyzoo.org). Каждый желающий, овладев азами морфологической классификации, может скачать изображения областей неба, полученные в ходе обзора SDSS или космическим телескопом «Хаббл», и самостоятельно заняться классификацией объектов. Затем результаты этой работы объединяются, фильтруются, усредняются и становятся полноценным астрономическим продуктом. Полезное для науки и интересное для участников этого проекта занятие: ведь вы заглядываете в далекие области Вселенной, которые до вас, возможно, никто еще детально не рассматривал. Кто знает, что там обнаружится...

Развитие классификации галактик происходит не только в сторону детализации, учитывающей всевозможные внешние признаки галактик в разных диапазонах спектра, но и в направлении учета их физического состояния, представленного разной внутренней динамикой. Порой это удается сделать, не усложняя, а лишь слегка модифицируя классическую схему Хаббла. Например, Джон Корменди и Ральф Бендер обратили внимание, что различие в наблюдаемой степени сжатия эллиптических галактик вдоль последовательности E0...E6 прежде всего обусловлено их разным наклоном к лучу зрения, а не истинной их формой (Kormendy, Bender, 1996). В то же время существует фундаментальное физическое различие между двумя типами эллиптических галактик: по сравнению с вписанным в их фигуру эллипсом (рис. 7.10) у одних заметен избыток яркости вдоль большой и малой осей, а у других — вдоль биссектрис к этим осям. Первый тип искажения авторы называли «дискообразным» (disky), а второй — «коробкообразным» (boxy). Эллиптические disky-галактики демонстрируют умеренную светимость, сравнительно быстрое вращение, придающее им форму сплюснутого (двухосного) эллипсоида, не обладают ярко выраженным ядром, а распределение скоростей звезд в них близко к изотропному. Галактики типа boxy крупнее, почти не вращаются; их форма, близкая к трехосному эллипсоиду, связана с анизотропией звездных скоростей, а в центре у них наблюдается четкое ядро, так называемый касп (cusp).

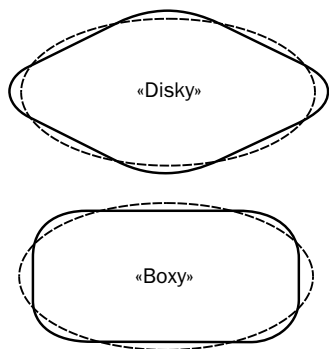


Рис. 7.10. Формы галактик, условно названные «disky» и «boxy», отличаются от идеального эллипса (пунктир).

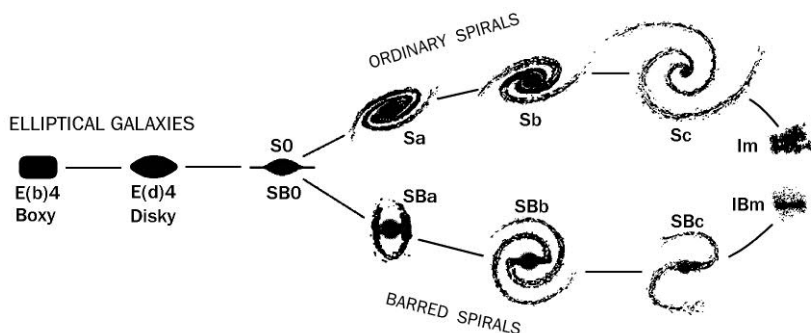


Рис. 7.11. Вариант диаграммы Хаббла, предложенный Корменди и Бендером для более точного учета формы эллиптических галактик. Для демонстрации различия между системами типа disk и boxy взяты галактики со степенью сжатия около 0,4. Рисунок из работы Kormendy, Bender, 1996.

Последовательность типов Im — Sc — Sb — Sa — S0 явно связана с эллиптическими disk-системами E(d), тогда как boxy-системы E(b), по-видимому, стоят особняком и, возможно, имеют иное происхождение. Не исключено, что непрерывного эволюционного или даже морфологического перехода между системами типа E(d) и E(b) не существует, хотя некоторые галактики демонстрируют сразу оба типа особенностей — как boxy, так и disk, причем иногда на разных расстояниях от центра, а иногда даже на одном! Пока не ясно, что бы это могло означать. Всем этим особенностям еще предстоит дать эволюционную интерпретацию.

7.1.6. Особые типы галактик

В ходе классификации в отдельную группу выделили карликовые галактики — небольшие по размеру, светимость которых в тысячи раз меньше, чем у таких галактик, как наша или Туманность Андромеды. Это самый многочисленный класс галактик, но из-за низкой светимости их трудно обнаружить на большом расстоянии. Размер карликов обычно не превосходит нескольких килопарсеков. Среди них также встречаются эллиптические dE, спиральные dS (очень редко) и неправильные dIrr. Буква «d» (от английского *dwarf* — карлик) обозначает принадлежность к карликовым системам.

Было также обнаружено два типа карликов, которые практически не имеют аналогов среди галактик высокой светимости: карликовые сфероидальные системы (dSph) и карликовые голубые компактные галактики (dBCG). Первые похожи на шаровые звездные скопле-

ния, увеличенные по объему в тысячи раз. Такие галактики — рекордсмены среди карликов по низкой поверхностной яркости, которая даже во внутренней области галактик часто бывает значительно ниже яркости темного ночного неба. Несколько галактик dSph являются спутниками нашей звездной системы. В отличие от них, галактики dBCG имеют высокую поверхностную яркость при небольшом линейном размере, а их голубой цвет свидетельствует об интенсивном звездообразовании. Эти объекты особенно богаты газом и молодыми звездами.

Несколько процентов наблюдаемых галактик не укладывается в описанные классификационные схемы: для галактик с экзотической внешностью в этих схемах просто не находится места, поэтому их называют пекулярными (англ. *peculiar* — особенный, необычный, аномальный). Как правило, это галактики, форма которых искажена сильным взаимодействием с соседними галактиками (см. с. 15 цветной вкладки), или же обладающие необычной структурой — например, полярным кольцом, вращающимся в плоскости, перпендикулярной плоскости звездного диска. Х. Арп, Б. А. Воронцов-Вельяминов, Ф. Цвикки и другие исследователи составили каталоги особых галактик, имеющих нестандартную, а порой и невероятную форму — с «хвостами», «мостами», кольцами и струями. Численное моделирование показывает, что многие из этих форм можно объяснить тесным гравитационным взаимодействием или прямым столкновением двух или нескольких галактик. Для объяснения некоторых деталей приходится привлекать активность ядра галактики или мощные вспышки звездообразования.

Особо выделяется обширный класс галактик, обладающих звездно-газовым диском, поверхностная яркость которого на порядок ниже, чем у нормальных спиральных или линзовидных галактик, хотя в этих «бледных» галактиках часто присутствуют слабые спиральные ветви. Их так и называют — галактики низкой поверхностной яркости, или LSB-галактики (Low Surface Brightness galaxies). Среди LSB-галактик встречаются как карликовые, так и гигантские системы. Поиски таких галактик очень трудны, поскольку их свечение почти не различимо на фоне свечения ночного неба. Тем не менее в природе их может быть очень много. Наиболее удивительной системой такого типа является открытая самой первой из них гигантская LSB-галактика Malin-1 (названа именем первооткрывателя), обнаруженная в 1986 г. в созвездии Волосы Вероники. Диаметр ее диска около 200 кпк, что на порядок превышает характерный размер крупных



Рис. 7.12. Галактика NGC 4650 с полярным кольцом. Здесь оно располагается в горизонтальной плоскости. Фото: Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA).

спиральных галактик нормальной яркости, но при этом яркость даже в центре диска Malin-1 ниже яркости темного ночного неба. Масса этой галактики, определенная по вращению ее увесистого газового слоя, составляет около $10^{12} M_{\odot}$ — это на порядок больше, чем у нормальных спиралей. Большинство LSB-галактик не столь велики, как Malin-1, тем не менее значения их полной массы или светимости лежат в тех же пределах, что и у галактик высокой поверхностной яркости. Происхождение таких «бледных гигантов» пока трудно понять. Чаще, чем галактики других типов, они бывают изолированы, то есть не имеют близких соседей.

Часто названием для особого типа галактик служит их характерный признак или имя астронома, составившего их каталог. Так, компактные галактики Цвикки — это яркие, но маленькие системы, на снимках с трудом отличимые от звезд. Вероятно, некоторые из них испытывают первую в их жизни вспышку звездообразования. Галактики Маркаряна — это системы с сильным ультрафиолетовым избытком в спектре, выявленные армянским астрономом Б. Е. Маркаряном. Многие из этих галактик имеют активные ядра.

Активные ядра галактик — это небольшие области в их центре, где наблюдаются нестационарные процессы, сопровождающиеся выделением большого количества энергии. Характерная мощность выделения энергии составляет от 10^{34} – 10^{38} Вт для сейфертовских галактик до 10^{39} – 10^{41} Вт для наиболее мощных квазаров. Наблюдаемые признаки активности ядра и формы выделения энергии в ядре могут быть различными. Наиболее часто встречаются следующие проявления активности:

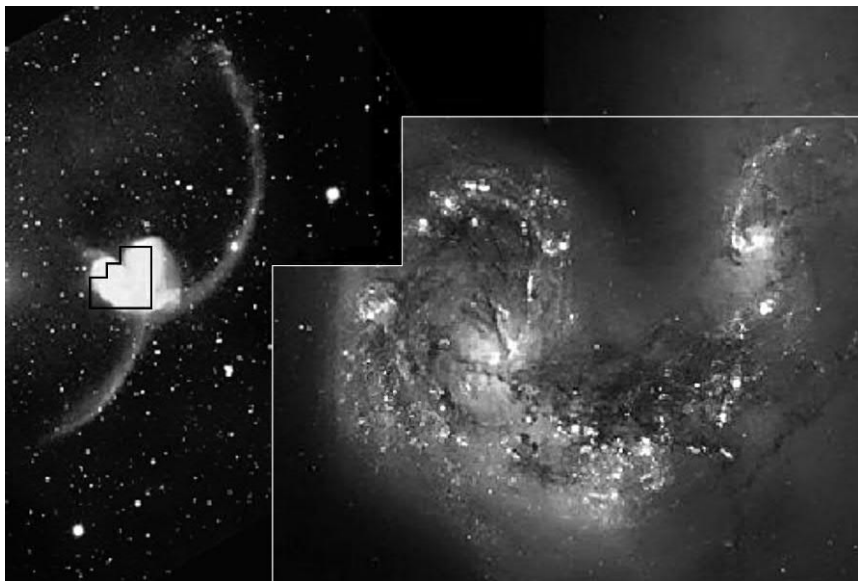


Рис. 7.13. Взаимодействующие галактики «Антенны» (NGC 4038-9). Справа: фото, полученное космическим телескопом «Хаббл», демонстрирует активное звездообразование в центральных частях столкнувшихся галактик.

— быстрое движение газа, со скоростями в тысячи километров в секунду, приводящее к сильному уширению линий излучения в спектре ядра вследствие эффекта Доплера;

— нетепловое излучение большой мощности в коротковолновых (оптической, ультрафиолетовой и рентгеновской) областях спектра. Излучение обычно имеет переменный характер без четко выраженного периода; характерное время заметного изменения светимости составляет от нескольких дней или даже часов до нескольких лет;

— мощное излучение в далекой инфракрасной области спектра (длина волны — десятки и сотни микрометров), вероятно, связанное с нагретой межзвездной пылью, находящейся в ядре;

— выбросы струй (джетов) газа или энергичных элементарных частиц из ядра;

— высокая мощность радиоизлучения, связанного с выбросом энергичных электронов из ядра.

По характерным проявлениям активности ядер эти звездные системы принято разделять на сейфертовские галактики, радиогалактики, квазары и лацертиды.

Сейфертовские галактики — это спиральные галактики, в которых активное ядро наблюдается как звездopodobный переменный по яркости объект в центре галактики. В спектре ядра наблюдаются яркие и широкие эмиссионные линии. Такие галактики обнаружил в 1940-е гг. американский астроном Карл Сейферт. Они являются наиболее многочисленными галактиками с активными ядрами.

Радиогалактики — это звездные системы, демонстрирующие интенсивное радиоизлучение, в тысячи и более раз превосходящее по мощности радиоизлучение нормальных галактик. Их радиоизлучение имеет синхротронную природу и связано с выбросом потоков релятивистских электронов из активного ядра. Встречаются почти исключительно среди эллиптических галактик.

Квазары по наблюдаемым особенностям похожи на ядра сейфертовских галактик, но превосходят их по мощности излучения на несколько порядков. В большинстве случаев яркость квазара превышает совокупную яркость всех звезд «родительской» галактики, в которой он находится.

Лацертиды выглядят как переменные звезды с крайне слабыми спектральными линиями и частично поляризованным излучением. Они оказались редко встречающимся типом активных ядер в гигантских эллиптических галактиках.

Галактики с активными ядрами довольно широко распространены и составляют несколько процентов от всех галактик высокой светимости. Вероятно, основным источником их энергии служит падение газа в гравитационном поле сверхмассивных черных дыр, которые часто обнаруживаются в ядрах галактик. Активность ядер галактик, по-видимому, меняется на больших интервалах времени и часто сопровождается резким усилением процесса звездообразования в окрестности ядра галактики. Ближайшая к нам галактика с активным ядром — NGC 1068 (сейфертовская галактика).

Различие между галактиками разных типов объясняется как различными условиями формирования, так и эволюционными изменениями, произошедшими за миллиарды лет их жизни.

7.2. Оценка расстояний до галактик

Многие характеристики галактик, такие как светимость, линейный размер, масса газа и звезд, период вращения, невозможно оценить, если не известно расстояние до них. Не существует универсального метода определения расстояний до галактик. Одни способы используются для сравнительно близких, другие — для очень далеких объектов.

Наиболее разнообразны методы оценки расстояний до близких галактик, в которых можно наблюдать и исследовать отдельные яркие объекты. В качестве таких объектов обычно используются звезды, обладающие высокой светимостью: цефеиды, ярчайшие сверхгиганты или гиганты (их легко различить по цвету), но часто привлекаются и другие образования: звездные скопления, планетарные туманности, а также новые звезды в максимуме их блеска. Характеристики этих объектов считаются известными, например, по аналогии с подобными объектами нашей галактики. Самый точный метод связан с использованием цефеид, поскольку светимости этих звезд могут быть получены по хорошо установленной зависимости «период—светимость».

Для определения расстояний проводят фотометрические измерения видимых звездных величин (видимого блеска) объектов в тех или иных галактиках. Затем полученные значения сопоставляются со светимостью выбранных объектов, т. е. их абсолютной звездной величиной (см. раздел 6.2.2); при этом обязательно вводится поправка на межзвездное поглощение света. В итоге это позволяет оценить, насколько далеко от нас находится галактика. Если m — видимая звездная величина объекта, исправленная за межзвездное поглощение, а M — его известная абсолютная звездная величина, то логарифм расстояния D до этого объекта, выраженного в мегапарсеках, определяется по формуле:

$$\lg D = 0,2(m - M) - 5.$$

Для перевода расстояния в миллионы световых лет его значение в мегапарсеках надо умножить на 3,26.

Эффективным оказался и метод определения расстояний не по отдельным объектам, а по параметрам мелкой ряби (флуктуаций поверхностной яркости) на видимом изображении галактик, которая обусловлена звездами, не разрешаемыми по отдельности. Но все эти методы достаточно грубы и в применении к индивидуальным галактикам могут давать большую ошибку.

Ярчайшие звезды, пригодные для оценки расстояний, даже с помощью крупнейших телескопов наблюдаются в галактиках, удаленных не более чем на несколько десятков миллионов световых лет (шаровые скопления — несколько дальше). Исключение составляют сверхновые звезды: их можно запечатлеть на любых расстояниях, с которых видны галактики. Но хотя сверхновые используют для оценки экстремально больших расстояний, в каждой из галактик они вспыхивают редко и неожиданно. Поэтому для массового измерения

расстояний до более далеких галактик разработаны другие подходы. Например, предполагают, что заранее известна светимость или линейный размер галактик определенного типа (это очень грубый метод). Более точные оценки опираются на статистически установленные зависимости, связывающие светимость галактик с какой-либо непосредственно измеряемой величиной, характеризующей галактику: скоростью вращения, шириной спектральных линий, принадлежащих звездам, или линий излучения межзвездного газа в радиодиапазоне.

Но чаще всего расстояние до далеких галактик определяют по зависимости Хаббла «красное смещение спектральных линий — расстояние». Этот метод — метод красного смещения — основан на измерении сдвига линий в спектре галактики, обусловленного расширением Вселенной. Открытая эмпирически, зависимость Хаббла получила надежное обоснование в теории расширяющейся Вселенной. Однако для калибровки эмпирических зависимостей все равно требуются сравнительно близкие галактики, для которых расстояния находят по индивидуальным объектам. Поэтому определить, во сколько раз одна галактика дальше другой, можно значительно точнее, чем оценить расстояние до каждой из них. В целом точность оценки расстояний не превышает 10–15%, а в некоторых случаях она значительно ниже.

7.3. Состав галактик

Описанная в разделе 7.1 морфологическая классификация галактик опирается на их внешний вид в оптическом диапазоне спектра, преимущества которого определяются лишь особенностями нашего зрения, обусловленными, в свою очередь, прозрачностью земной атмосферы для этого вида лучей. Галактики «особого» типа, не попавшие в общую классификацию, как правило, проявляют свои особенности в других диапазонах спектра. Но нередко и «нормальные» галактики существенно меняют свой внешний вид при их наблюдении в неоптических лучах: уединенные галактики становятся взаимодействующими, а спокойные — активными.

Пример первого рода мы видим в небольшой соседней группе галактик, крупнейшая среди которых — спираль М81 (рис. 7.14 и 7.15). Невдалеке от нее еще две: неправильная галактика М82 по прозвищу Сигара и маленькая NGC 3077 непонятного типа. На первый взгляд, каждая из них живет своей спокойной жизнью. Но наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне показывают, что в М82 происходит мощная вспышка звездообразования с выбросом больших масс горячего газа,



Рис. 7.14. Группа Мессье 81. Пара галактик M81 (внизу) и M82 выглядят совершенно по-разному в оптических (слева) и ультрафиолетовых лучах. Изображение в УФ: GALEX (NASA).

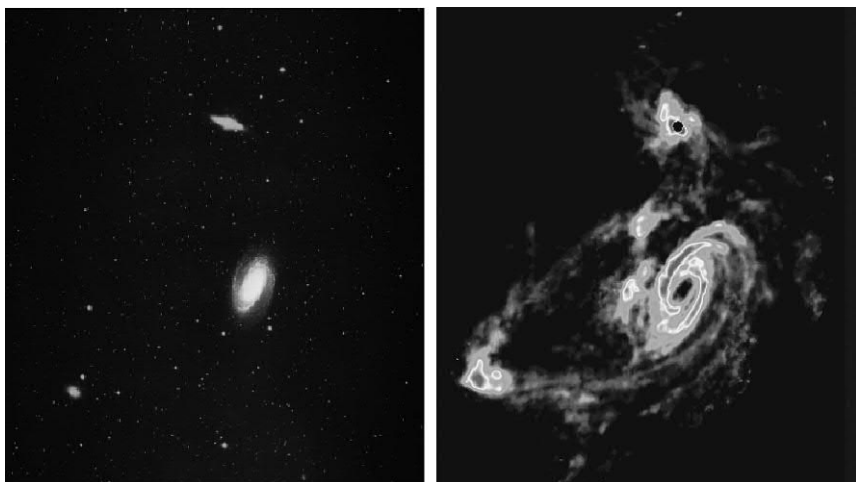


Рис. 7.15. Группа Мессье 81. Еще большее различие мы видим между оптическим (слева) и радио (21 см) изображениями галактик M81, M82 и их маленького соседа NGC 3077. Радиоизображение: VLA (NRAO).

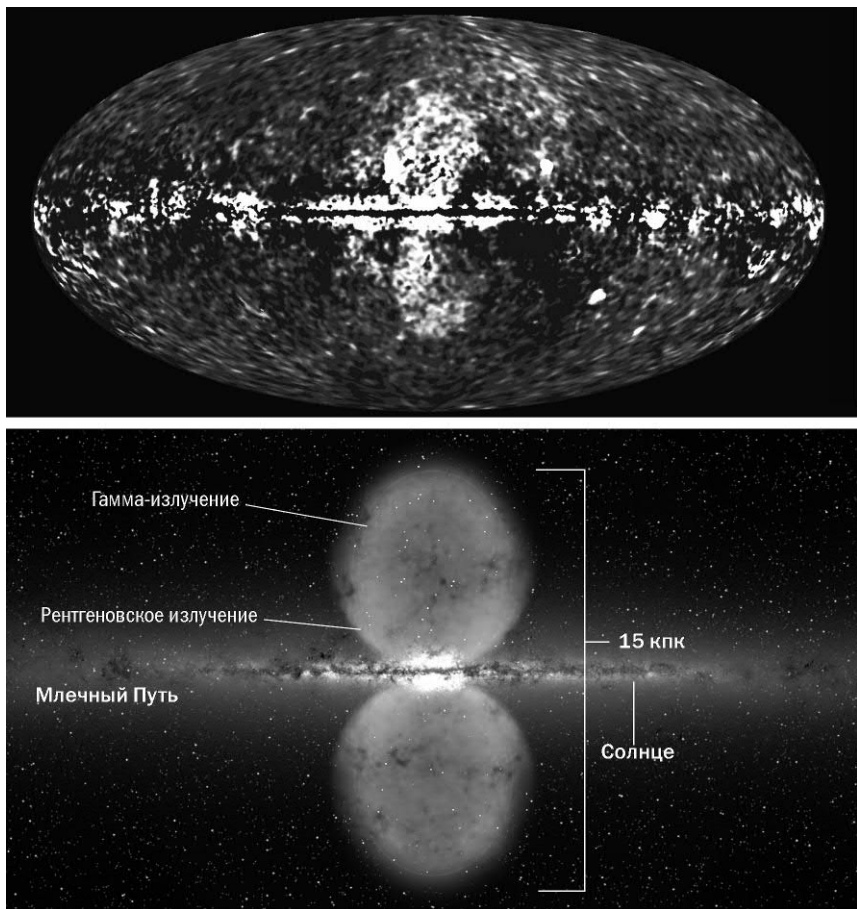


Рис. 7.16. Карта всего неба в гамма-диапазоне (30 МэВ — 300 ГэВ) по данным спутника «Ферми» (NASA), позволившая обнаружить два горячих «пузыря», симметрично расположенных над центральной областью Галактики. Вверху — карта, построенная в 2010 г. под руководством D. Finkbeiner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics); внизу — художественное представление о «пузырях».

за что эту галактику нередко называют взрывающейся. А у NGC 3077 активное ядро, за что в 1943 г. Карл Сейферт включил ее в свой список. Между этими двумя горячими малышами расположилась идеальная спираль M81, которая, казалось бы, тут совершенно ни при чем. Но радионаблюдения на волне атомарного водорода (21 см) показывают, что все три галактики заключены в общую газовую оболочку и, как видно, обмениваются веществом, которое и служит источни-

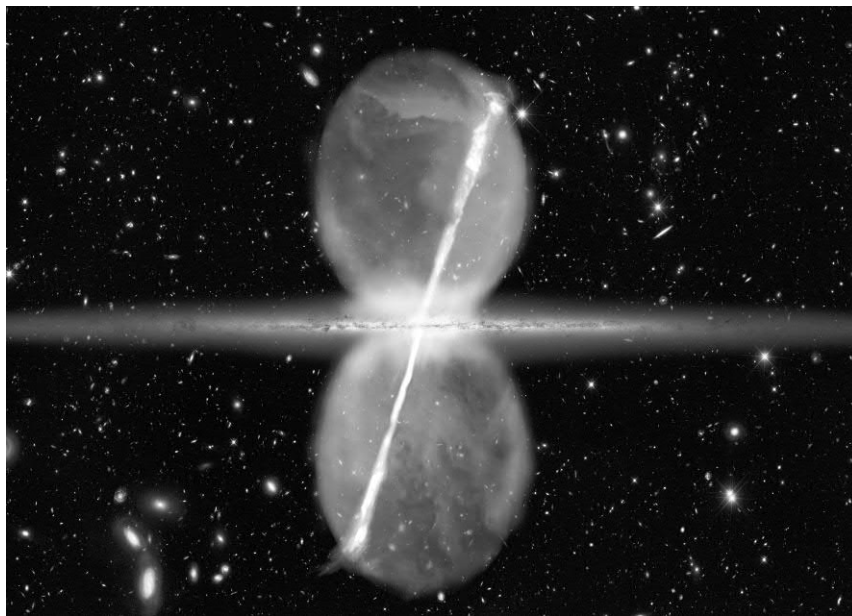


Рис. 7.17. Гамма-пузыри над галактической плоскостью, согласно одному из предположений, могли быть раздуты мощными джетами, сформировавшимися в окрестности сверхмассивной черной дыры в центре Галактики.

ком активности. Поставщиком газа, вероятно, является крупная M81, а соседние с ней NGC 3077 и M82 перерабатывают этот газ в звезды.

Не менее эффектный пример изменения внешности демонстрирует и наша галактика. Ее привычный для оптического наблюдателя вид — Млечный Путь — меняется до неузнаваемости, если «посмотреть» на небо в жестком гамма-диапазоне. Такую возможность дает нам космическая гамма-обсерватория «Ферми» (NASA). На созданном по ее данным изображении (рис. 7.16) мы видим две гигантские структуры, вздымающиеся почти на 8 кпк над галактической плоскостью к северу и югу от нее. Истинная причина появления «гамма-пузырей» пока не ясна. Это может быть последствием мощной вспышки звездообразования или же результатом активности черной дыры в центре Галактики (рис. 7.17).

Эти примеры говорят о том, что население галактик очень разнообразно, а диапазон физических условий в пределах каждой из них невероятно широк. В них есть вещество с температурой всего несколько кельвинов и есть нагретое до сотни миллионов кельвинов; есть вещество с плотностью 10^{-26} г/см³ и с плотностью 10^{15} г/см³. Ка-

кую величину ни возьми, диапазон ее значений в галактике потрясает. Взять хотя бы магнитное поле: в межзвездном пространстве его индукция около 10^{-10} Тл (1 тесла = 10^4 Гс), у поверхности Земли — около $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, а у поверхности нейтронных звезд-магнитаров — почти 10^{10} Тл. Вдумайтесь только: невидимое поле с индукцией 10^{10} Тл имеет плотность массы (E/c^2) почти полтонны в кубическом сантиметре! Далее читатель сам может поупражняться в астрофизике, оценивая диапазон различных характеристик типичной галактики: плотность излучения, размер молекул, содержание тяжелых элементов и т. п. Это даст хорошее представление о разнообразии свойств, сложности структуры и непростом характере взаимодействия различных компонентов галактики. Здесь мы кратко охарактеризуем важнейшие из них.

7.3.1. Звезды

Галактики — это прежде всего звездные системы; именно со звездами связано их оптическое излучение. Пространственно звезды образуют два основных структурных компонента галактики, как бы вложенных один в другой: быстро вращающийся звездный диск, толщина которого обычно составляет 300–600 пк, и медленно вращающуюся сферическую (или сфероидальную) составляющую, яркость которой концентрируется не к плоскости диска, а к центру галактики. Внутренняя, наиболее яркая часть сфероидального компонента — балдж, а внешняя часть низкой яркости — звездное гало. В центральной части массивных галактик часто выделяется небольшой и быстро вращающийся околядерный диск размером несколько сотен парсеков, который также состоит из звезд и газа. Такая структурность галактик отражает сложный многоступенчатый характер их формирования. Есть галактики, в которых наблюдается только один из двух основных компонентов: диск или сфероид.

Звезды различаются по массе, возрасту и химическому составу. В пределах Местной группы галактик, где есть возможность детально изучать отдельные звезды, обнаруживаются звезды всевозможных масс в диапазоне от $0,08 M_{\odot}$ до $250 M_{\odot}$. Менее массивные звездообразные объекты также присутствуют, но поскольку температура в их ядрах не достигает той, что необходима для протекания термоядерных реакций с участием водорода (pp-реакций), такие объекты с массами $0,08$ – $0,013 M_{\odot}$ называют коричневыми карликами (brown dwarf). В галактиках в большом количестве есть и менее массивные объекты — планеты; в их недрах не происходит никаких термоядерных реакций

даже с участием «легко горящих» элементов, таких как литий и изотоп водорода — дейтерий. Но в жизни галактики — в ее динамике, излучении, эволюции — планеты и еще менее массивные тела типа астероидов и комет сколько-нибудь заметной роли не играют.

В каждой галактике могут находиться звезды с различными характеристиками: массивные и маломассивные, молодые и старые. Процент давно образовавшихся (старых) звезд с возрастом в миллиарды лет и звезд, которые можно условно назвать молодыми (с возрастом менее 100 млн лет) сильно меняется от одной галактики к другой. Старые звезды присутствуют в галактиках всех типов, но относительное количество молодых звезд в среднем растет вдоль морфологической последовательности галактик — от E к Irr.

В E-галактиках, за редчайшими исключениями, молодые звезды практически отсутствуют. Спектр и цвет галактик этого типа свидетельствует о том, что они в основном состоят из звезд, возникших более 10 млрд лет назад. Самые яркие звезды E-галактик — красные гиганты. В спиральных и неправильных галактиках есть и старые, и молодые звезды. Самые яркие из них — голубые сверхгиганты, возраст которых не превышает нескольких десятков миллионов лет.

Наибольшее количество молодых звезд наблюдается в некоторых редко встречающихся галактиках со вспышкой звездообразования. Как правило, они относятся к типам Irr или dBCG, но ими могут быть и S-галактики. Молодые массивные звезды придают этим системам голубоватый цвет. Примером сравнительно близкой к нам спиральной галактики со вспышкой звездообразования служит NGC 253, удаленная на $(3,5 \pm 0,2)$ Мпк в направлении созвездия Скульптор. Эта галактика, открытая в 1783 г. Каролиной Гершель, является крупнейшим членом небольшой группы галактик в Скульпторе, одной из ближайших к нам. За высокую яркость своего диска NGC 253 получила прозвище Серебряная Монета. Особенно отчетливо это проявляется в голубых лучах (рис. 7.18), благодаря большому количеству горячих массивных звезд. На прекрасном цветном снимке этой галактики, помещенном на заднем форзаце этой книги, ясно видны потоки газа, оттекающие из центральной области галактики под действием звездного ветра и мощного излучения молодых звезд.

Помимо возрастного состава, звездное население галактик (как и диффузная межзвездная среда) может различаться своим химическим составом, точнее, относительным содержанием химических элементов тяжелее гелия. Поскольку эти элементы рождаются в массивных звездах, а затем попадают в межзвездное пространство и участ-



Рис. 7.18. Спиральная галактика NGC 253 типа SAB(s)с со вспышкой звездообразования. Верхний снимок в ближнем ИК-диапазоне получен в 2010 г. телескопом VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) на горе Паранал Европейской южной обсерватории. Нижний снимок получен в голубых лучах в ходе Паломарского обзора неба. Угловой размер кадра $30' 20''$, т. е. в нем по ширине поместился бы диск Луны. Направление на север — вправо вниз. Фото: ESO/J. Emerson/VISTA.

вуют в образовании новых поколений звезд, в молодых звездах тяжелых элементов больше, чем в старых. Поэтому измерение содержания тяжелых элементов в звездах позволяет получить информацию об истории звездообразования в галактике. Меньше всего тяжелых элементов оказалось в карликовых галактиках. Частично это объясня-

ется тем, что такие элементы еще не успели в них возникнуть, а частично тем, что некоторая доля газа, обогащенного образовавшимися в звездах химическими элементами, получает при выбросе из звезд такие большие скорости, что не удерживается гравитационным полем маломассивной галактики и навсегда покидает ее.

Возраст галактик оценивают по их звездному составу, который определяют по спектру (или цвету) звездного излучения, опираясь при этом на теорию звездной эволюции, указывающей характерный возраст звезд различного спектрального класса. Однако само понятие возраста галактик определено нечетко, поскольку процесс формирования галактики может занимать 1–2 (а в некоторых случаях и более) миллиарда лет. Тем не менее анализ наблюдений показал, что в абсолютном большинстве случаев самые старые звезды галактик всех типов имеют сходный возраст, превышающий 10 млрд лет.

Массовое формирование галактик как звездных систем из первоначально газовой среды началось 12–13 млрд лет назад. Однако среди галактик-карликов есть системы, возраст которых, по-видимому, существенно меньше. Некоторые очень редко встречающиеся карликовые галактики, вероятно, только в нашу эпоху испытывают первую вспышку интенсивного звездообразования в своей истории. В них содержится много межзвездного газа (атомарного водорода) и молодых звезд и нет заметных следов присутствия старых звезд (красных гигантов). При этом в их звездах и межзвездном газе очень мало тяжелых элементов, которые просто еще не успели возникнуть. Но чаще всего большое количество молодых звезд свидетельствует не о молодости системы, а о том, что по тем или иным причинам в ней произошла очередная вспышка звездообразования.

7.3.2. Межзвездная среда

Помимо звезд, каждая галактика содержит разреженную и слегка намагниченную межзвездную среду. Это ионизованный, нейтральный и молекулярный газ с небольшой (<1% по массе) примесью очень мелких (10^{-5} – 10^{-4} см) твердых частиц — «пылинок» — с металло-силикатными или графитовыми ядрышками, покрытыми «шубой» из замерзших летучих соединений. Межзвездную среду пронизывают потоки высокоэнергичных элементарных частиц и атомных ядер — космические лучи. Доля массы галактики, приходящаяся на межзвездную среду, как и мощность радиоизлучения, относятся к важнейшим наблюдательным характеристикам галактик. Масса межзвездного вещества сильно меняется от одной галактики к другой и обычно составляет

от нескольких десятых долей процента до 50% суммарной массы звезд (в редких случаях газ может даже преобладать по массе над звездами). Содержание газа в галактике — это очень важная характеристика, от которой во многом зависит активность происходящих в галактике процессов, и прежде всего процесса формирования звезд.

Распределение газа в галактике может сильно отличаться от распределения звезд. Иногда газ прослеживается до значительно больших расстояний от центра галактики, чем звезды, наглядно демонстрируя, что галактика может продолжаться дальше своих оптических границ. Относительная доля массы, приходящаяся на межзвездный газ, в среднем уменьшается от неправильных галактик к эллиптическим. У неправильных систем она может достигать 50%. У спиральных эта доля составляет (5–10)%, а в E-галактиках газа содержится, как правило, менее 0,1%, хотя из этого правила есть исключения.

Межзвездный газ в основном состоит из водорода и гелия с небольшой примесью более тяжелых элементов. Например, в около-солнечной области Галактики состав газа (по массе) такой: 70,4% водорода, 28,1% гелия и 1,5% более тяжелых элементов. Тяжелые элементы образуются в звездах и вместе с газом, теряемым звездами, оказываются в межзвездном пространстве, поэтому их содержание важно знать для изучения эволюции галактики. В межзвездной среде обнаружены сотни типов молекул: H_2 , CO, CS, OH, HCON, CH_3OH , SO_2 , $HC_{11}N$ и др. В ней встречаются даже такие сложные молекулярные комплексы, как фуллерены и полиароматические углеводороды — соединения, хорошо известные на Земле. По количеству и общей массе в молекулярном компоненте межзвездной среды доминирует молекула водорода (H_2), остальных молекул на несколько порядков меньше.

В дисковых галактиках почти весь газ и пыль сосредоточены в звездном диске, в слое толщиной 100–200 пк. Вблизи плоскости диска их средняя объемная плотность может даже превышать среднюю плотность звездного населения (см. табл. 7.8). Внутри диска плотность газа больше всего в спиральных ветвях, а также в центральной области. Но газ наблюдается и в эллиптических галактиках, где нет ни звездных дисков, ни спиральных ветвей. В этих галактиках газ представляет собой горячую разреженную среду, заполняющую весь объем звездной системы. Из-за температуры в тысячи кельвинов он светится в рентгеновских лучах, поэтому его удастся заметить.

Газ в S- и Irr-галактиках находится в четырех основных фазах. Во-первых, это облака холодного (<100 K) молекулярного газа. Он не

Таблица 7.4

Компоненты межзвездной среды Галактики

Компонент	Доля объема, %	Шкала высот, пк	Температура, К	Плотность, атом/см ³	Состояние водорода	Техника наблюдения
Молекулярные облака	< 1	80	10–20	10 ² –10 ⁶	Молекулы	Микроволновые и ИК-линии в эмиссии и абсорбции
Холодная нейтральная среда (CNM)	1–5	100–300	50–100	20–50	Нейтральные атомы	Линия H I (21 см) в абсорбции
Теплая нейтральная среда (WNM)	10–20	300–400	6000–10 000	0,2–0,5	Нейтральные атомы	Линия H I (21 см) в эмиссии
Теплая ионизованная среда (WIM)	20–50	1000	8000	0,2–0,5	Ионизованный	Эмиссия H и дисперсия излучения пульсаров
Области H II	<1	70	8000	10 ² –10 ⁴	Ионизованный	Эмиссия H и дисперсия излучения пульсаров
«Корональный газ», горячая ионизованная среда (HIM)	30–70	1000–3000	10 ⁶ –10 ⁷	10 ^{–4} –10 ^{–2}	Ионизованный (металлы тоже сильно ионизованы)	Рентгеновское излучение, линии УФ поглощения ионизованных металлов

излучает света, но его присутствие обнаруживается радионаблюдениями, поскольку молекулы в разреженной среде излучают на определенных длинах волн. Именно в облаках холодного газа зарождаются звезды. Во-вторых, это атомарный, или нейтральный, газ, образующий облака и более разреженную межоблачную среду. Такой газ также не излучает света. Атомарный водород был открыт по радиоизлучению на частоте 1420 МГц (длина волны 21 см). В этом состоянии находится основная масса межзвездного газа. В-третьих, в лучах видимого света обычно наблюдаются многочисленные яркие области, образованные газом, ионизованным ультрафиолетовым излучением звезд и нагретым до температуры около 10⁴ К. Как правило, источником нагрева и ионизации служат молодые звезды, поэтому большое количество ионизованного газа свидетельствует об интенсивном звездообразовании в галактике. Наконец, в диске встречаются обширные области размером до сотен парсеков, заполненные очень разреженным и горячим газом с температурой ~10⁶ К. Эти горячие пузыри

занимают не менее четверти объема диска. Плотность газа в них раз в сто ниже, чем в окружающей среде. Происхождение этого газа в основном связано со взрывами сверхновых.

Несмотря на большую разницу в температуре и плотности, большинство компонентов межзвездного газа обладают приблизительно одинаковым давлением, т. е. находятся в механическом равновесии друг с другом. Только яркие эмиссионные туманности (области H II) обладают значительно большим давлением и поэтому расширяются. Причина в том, что это области плотных и в недавнем прошлом холодных облаков, нагретые молодыми звездами: давление в них резко возросло, а расширяться и прийти в равновесие с окружающей средой они еще не успели.

Разные компоненты межзвездной среды в нашей и ей подобных спиральных галактиках распределены по галактоцентрическому азимуту неравномерно. Холодные молекулярные облака и связанные с ними яркие области H II концентрируются в спиральных рукавах близ галактической плоскости. Разреженный теплый газ заполняет межрукавное пространство диска. Ионизованный газ простирается высоко над диском. В табл. 7.5 приведена поверхностная плотность различных компонентов межзвездной среды в проекции на галактический диск (Σ) на солнечном расстоянии от центра Галактики ($R_0 = 8,5$ кпк), усредненная по галактоцентрическому азимуту. Там же указана и полная масса (M_{tot}) этих компонентов в Галактике. Следует учесть, что точность этих значений не очень высока.

Таблица 7.5

Межзвездная среда у орбиты Солнца и в Галактике в целом

Компонент	T, K	$n, \text{см}^{-3}$	$, M_{\odot}/\text{пк}^2$	$M_{\text{tot}}, 10^9 M_{\odot}$
Молекулярный	10–20	$10^2\text{--}10^6$	2,5	1,3–2,5
Холодный атомарный	50–100	20–50	3,5	} $\geq 6,0$
Теплый атомарный	$(6\text{--}10) \cdot 10^3$	0,2–0,5	3,5	
Теплый ионизованный	~8000	0,2–0,5	1,4	$\geq 1,6$
Горячий ионизованный	~ 10^6	0,0065		

Содержащаяся в газовой среде межзвездная пыль проявляет себя двояко. Во-первых, пыль поглощает видимый и ультрафиолетовый свет, вызывая общее ослабление яркости и покраснение галактики. Наиболее непрозрачные (из-за пыли) участки галактики видны как темные области на более светлом фоне. Особенно много непрозрачных областей вблизи плоскости звездного диска — именно

там концентрируется холодная межзвездная среда. Поэтому, если мы видим диск галактики «с ребра», обычно бывает хорошо заметна пылевая полоса, пересекающая галактику по длинной оси. Во-вторых, пыль излучает сама, отдавая накопленную энергию света в форме далекого инфракрасного излучения (в диапазоне длин волн 50–1000 мкм), поэтому полная энергия излучения пыли бывает сопоставима с энергией видимого излучения, приходящего к нам от всех звезд галактики. Суммарная масса пыли сравнительно невелика: в сотни раз меньше полной массы межзвездного газа. Особенно мало пыли в Е-галактиках, где практически отсутствует и холодный газ. Мало пыли и в карликовых галактиках, где газа может быть много, но среда содержит мало тяжелых элементов, необходимых для формирования пылинок. Пыль в галактиках является продуктом эволюции звезд.

Вообще особенность газово-пылевого компонента любой галактики состоит в том, что он активно взаимодействует с ее основным, звездным, компонентом. Очень важны в этом смысле массивные звезды: именно они — главный источник вещества, поступающего в межзвездную среду, и энергии, поддерживающей движение и излучение этой среды. Взаимодействие звезд и газа весьма детально изучено в Галактике. В ней непрерывно происходит кругооборот вещества: массивные звезды образуются в гигантских молекулярных облаках (Сурдин, 1990) и в конце жизни взрываются как сверхновые; совместное действие звездного ветра и взрывов сверхновых приводит к эрозии облака и к образованию гигантских оболочек вокруг ассоциаций; их расширение порождает новую волну звездообразования в облаке. В результате взрывы сверхновых и звездный ветер массивных звезд регулируют физическое состояние, структуру и движение газовой среды в Галактике (Лозинская, 2012). Сходные процессы наблюдаются и в других звездных системах. В некоторых случаях основным источником энергии выступают не звезды, а активные ядра галактик, фактически — сверхмассивные черные дыры в их центрах.

В то время как основная масса межзвездного вещества сосредоточена в дисках галактик, небольшая его доля окружает каждую массивную галактику в виде обширного разреженного и очень горячего гало, которое принято называть «газовой короной», а сам газ — корональным. Газовые короны, как правило, простираются за пределы видимых оптических границ галактик. Наиболее массивные и протяженные короны наблюдаются в гигантских эллиптических галактиках, где полная масса газа может достигать миллиарда масс Солнца. Тем-

пература газа в коронах составляет $\sim 10^6$ К. В этом смысле он похож на газ солнечной короны, и это не случайно: вторая космическая скорость у поверхности Солнца и у границы крупной галактики около 600 км/с, этим и определяется скорость движения частиц.

При температуре в миллионы кельвинов газ излучает в основном в рентгеновском диапазоне, поэтому газовые короны галактик были обнаружены по рентгеновским наблюдениям с орбиты. В зависимости от плотности и температуры этот газ со временем может охлаждаться и в виде отдельных облаков падать на галактику либо нагреваться и уходить в межгалактическое пространство. К основным источникам, пополняющим запасы газа в коронах, можно отнести: галактический диск, газ которого в отдельных областях получает большую энергию и покидает диск; звезды вдали от плоскости диска, теряющие вещество в процессе эволюции, а также межгалактический газ, существующий в группах и скоплениях галактик.

Особый компонент межзвездной среды — космические лучи, т. е. высокоэнергичные элементарные частицы и ядра атомов. В состав космических лучей входят электроны, протоны (ядра атомов водорода) и ядра более тяжелых элементов — гелия, кислорода, углерода, азота и др. Количественно они представлены примерно так же, как элементы в атмосфере Солнца, т. е. протоны и ядра гелия составляют 98% частиц, а 2% — все остальные ядра. Кинетическую энергию частиц космических лучей обычно выражают в электронвольтах (эВ). Это энергия, которую приобретает частица с единичным зарядом (как у электрона или протона), пройдя через промежуток пространства с разностью потенциалов в 1 вольт: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Космическими лучами обычно называют частицы с кинетической энергией более 100 МэВ (т. е. 10^8 эВ), а менее энергичные, но все же достаточно быстрые частицы именуют субкосмическими лучами.

Космические лучи, приходящие к Земле от Солнца, имеют сравнительно низкую энергию, обычно не выше 10 ГэВ ($= 10^{10}$ эВ). Гораздо более энергичные частицы приходят из Галактики и, возможно, внегалактического пространства: их энергия достигает 10^{21} эВ. Если вспомнить, что лучшие лабораторные ускорители разгоняют частицы до энергии порядка 10^{13} эВ, становится понятным, почему физики так интересуются космическими лучами: таких мощных «снарядов» для бомбардировки элементарных частиц и исследования их внутренней структуры никогда не удастся получить в лаборатории.

Попадая в атмосферу Земли, частицы космических лучей сталкиваются с ядрами атомов воздуха. Поскольку энергия влетающих час-

тиц значительно превышает энергию покоя (mc^2) любой элементарной частицы, от этих столкновений рождаются новые быстрые частицы (нуклоны, мезоны и др.), которые также испытывают неоднократные столкновения и в свою очередь порождают новые частицы. Таким образом, при попадании в атмосферу одной частицы «первичных космических лучей» поверхности планеты достигает целый ливень «вторичных космических лучей». Среди них немало редких и короткоживущих частиц, многие из которых были открыты именно в потоках вторичных космических лучей: например, позитроны (1932 г.), мюоны (1937 г.), пи-мезоны (1947 г.)

Относительно происхождения космических лучей кое-что уже прояснилось. Источником электронов с энергией менее $3 \cdot 10^7$ эВ в межпланетном пространстве служит магнитосфера Юпитера. Солнечные космические лучи с энергией 10^6 – 10^9 эВ ускоряются при хромосферных вспышках и других активных процессах на Солнце, а также во внешних частях гелиосферы — области, занятой солнечным ветром. Установить источники галактических космических лучей прямыми наблюдениями не удастся: двигаясь в межзвездном магнитном поле, заряженные частицы теряют первоначальное направление полета, их траектории запутываются, и поэтому они приходят к Земле одинаково часто с любого направления. Косвенно выясняется, что «ускорителями» космических лучей служат взрывы сверхновых звезд, высокая активность молодых пульсаров и тесные двойные системы, где частицы разгоняются до больших энергий в сильных переменных магнитных полях вблизи компактной звезды. Но детали этих процессов пока не ясны. Возможно, что самые энергичные космические частицы имеют внегалактическое происхождение и связаны с активными ядрами галактик.

Любопытно, что средняя пространственная плотность энергии, связанной с различными компонентами межзвездной среды, приблизительно одинакова и близка к 1 эВ/см^3 (табл. 7.6).

Разумеется, под кинетической энергией межзвездного газа понимают энергию хаотического движения его частиц в системе отсчета, связанной с вращающимся диском Галактики. Вращение самого диска переносит газ с огромной скоростью, около 200 км/с, сообщая ему плотность энергии порядка 1 кэВ/см^3 , но эта энергия не может выделяться, пока не столкнутся две галактики. А «внутренняя жизнь» диска каким-то образом выровняла плотности энергии различных компонентов межзвездной среды, что указывает на взаимную связь между ними, а также их связь со звездами, наполняющи-

Таблица 7.6

Плотность энергии (E) в районе Солнца

Компонент межзвездной среды (носитель энергии)	E , эВ/см ³
Космические лучи	1,0
Электромагнитное излучение звезд	0,7
Кинетическая энергия межзвездного газа	0,5
Галактическое магнитное поле	1,0
Реликтовое излучение	0,25

ми Галактику излучением. Некоторые физические механизмы этой взаимосвязи понятны: равновесие давлений космических частиц, магнитного поля и газа не может сильно нарушаться, ибо все они связаны с интенсивностью звездообразования. В некоторой степени с ней связана и плотность излучения звезд. Однако при чем тут реликтовое излучение?

7.3.3. Звездообразование в галактиках

Итак, звезды формируются из межзвездного газа, а в ходе эволюции возвращают часть своего вещества обратно в межзвездную среду. Вещество теряют все звезды, но темп потери зависит от массы звезды и ее эволюционного возраста. Как правило, наиболее интенсивно звезда худеет в начале и в конце своей жизни. Звезды главной последовательности неохотно расстаются со своим веществом, но есть несколько типов звезд, активно теряющих газ. Представим их:

- звезды типа Т Тельца (Т Тау) еще не закончили формироваться и не достигли главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга—Рассела. Лишнее межзвездное вещество, продолжающее падать на них из окружающего облака, они отбрасывают от себя в виде джетов, бьющих из центров аккреционных дисков;

- массивные звезды спектральных классов О и В светят так ярко, что газ из их атмосферы выталкивается давлением света;

- вспыхивающие звезды; в основном это маломассивные красные карлики с мощной хромосферой и короной. Они демонстрируют активность типа солнечной — пятна и вспышки, стимулирующие звездный ветер такой же или более сильный, чем у Солнца;

- холодные сверхгиганты и гиганты спектральных классов MI–MIII имеют такой большой размер, что их атмосферы слабо притягиваются к звезде и легко ее покидают, знаменуя переход звезды к стадии планетарной туманности;

— наиболее массивные звезды в старости становятся настолько яркими и активными, что сбрасывают оболочку давлением света и обнажают свое гелиевое ядро. Это звезды типа Вольфа–Райе.

Даже сбросив значительную часть своей массы и став в конце концов тихим белым карликом, звезда может «помочь» соседу избавиться от его лишней массы. В тесных двойных системах, где белый карлик соседствует с нормальной звездой, он может захватывать газ из атмосферы этой звезды и выбрасывать его в окружающее пространство под действием термоядерных взрывов (новые звезды) или гравитационных и магнитных сил (карликовые новые типа U Gem).

Таким образом, вещество из межзвездной среды переходит в звезды, а затем обратно. Но обмен веществом между звездами и межзвездной средой не сбалансирован: поскольку звезды теряют лишь часть своей массы, звездообразование приводит к медленному уменьшению запасов газа в галактике. Современный средний темп звездообразования в Галактике оценивается в $(3-5) M_{\odot}/\text{год}$. Это вещество черпается из межзвездной среды. А возвращается в нее в результате активности звезд около $1 M_{\odot}/\text{год}$ (табл. 7.7). Еще приблизительно столько же, по-видимому, падает на диск Галактики из далеких областей гало в результате остывания межгалактического газа или его потери галактиками-спутниками. В итоге темп исчерпания газа в Галактике составляет около $2 M_{\odot}/\text{год}$, что при его полном количестве около $10^{10} M_{\odot}$ дает характерное время уменьшения запасов газа около $5 \cdot 10^9$ лет. Эти цифры вполне согласуются с нашими представлениями об эволюции Галактики. В ней самой и в большинстве подобных ей крупных галактик на долю газа приходится лишь несколько процентов вещества, содержащегося в звездах, то есть большая часть газа уже израсходована. Поэтому звездообразование в таких галактиках происходит весьма вяло.

В среднем темпы звездообразования (в расчете на единицу массы или светимости галактики) уменьшаются вдоль хаббловской последовательности типов от Igg к E, хотя есть и исключения из этого правила. В E-галактиках молодые звезды либо вообще отсутствуют, либо их следы заметны лишь в самом центре галактики. В S- и Igg-галактиках в среднем в звезды превращается от нескольких единиц до нескольких десятков солнечных масс вещества в год. Обычно чем больше газа в галактике, тем выше темп звездообразования в ней. Теснее всего рождение звезд связано с холодным и плотным молекулярным газом, поскольку именно в нем формируются звезды. Если рассматривать протяженные участки галактических дисков размером более

Таблица 7.7

Источники межзвездного вещества в Галактике

Источники вещества	Приток от 1 звезды или 1 вспышки, $M_{\odot}/\text{год}$	Количество звезд или событий в год	Общий приток, $M_{\odot}/\text{год}$
Звезды типа Вольфа—Райе	$3 \cdot 10^{-5}$	10^3	0,03
Вспыхивающие звезды	10^{-12}	10^{11}	0,1
Звезды типа Т Тау	10^{-8}	10^6	0,01
Звезды типа U Gem	$2 \cdot 10^{-9}$	10^7	0,02
Звезды спектрального типа О и В	$2 \cdot 10^{-6}$	10^5	0,2
Сверхгиганты класса М I	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^4$	0,08
Яркие гиганты класса М II	$4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^5$	0,16
Слабые гиганты класса М III	10^{-8}	10^6	0,01
Планетарные туманности	10^{-5}	$3 \cdot 10^4$	0,3
Новые (1 вспышка)	$10^{-4} M_{\odot}$	100	0,01
Сверхновые (1 вспышка)	$0,5 M_{\odot}$	1/30 лет	0,02
Аккреция межгалактического газа	—	—	~1?

0,5 кпк, то окажется, что количество молодых звезд в них в среднем пропорционально количеству молекулярного газа.

Галактики с интенсивным звездообразованием отличаются большим числом молодых звезд высокой светимости (голубых сверхгигантов), более голубым цветом и большим количеством ярких областей ионизованного газа. Присутствие молодых массивных звезд делает такие галактики особенно яркими в ультрафиолете и в далекой инфракрасной области спектра (излучение теплой пыли). Частые взрывы сверхновых звезд увеличивают мощность радиоизлучения галактики. По этим признакам и оценивается интенсивность звездообразования в галактиках.

Почти всегда звезды формируются в дисках галактик, где концентрируется межзвездная среда. При этом звездообразование носит очаговый характер: газ и молодые звезды, как правило, группируются в отдельных областях диска размером в сотни парсеков. Небольшие галактики могут содержать два-три крупных очага звездообразования, а в галактиках-гигантах сотни областей звездообразования различных размеров рассеяны по всему диску, концентрируясь к спиральным ветвям, где плотность газа наиболее высока. Большая часть наблюдаемых различий между галактиками прямо или косвенно связана со звездообразованием в них — как в современную эпоху, так и в прошлом.

Темп звездообразования и расположение областей, где в галактике рождаются звезды, зависит от многих факторов, которые могут ускорять или замедлять процесс превращения газа в звезды. Выявление этих факторов и их роли в эволюции галактик — важная и далеко не решенная проблема. А ведь она прямо связана с вопросом о морфологии галактик, поскольку их внешний вид почти полностью определяется распределением в них областей звездообразования. Например, наша галактика спиральная. В мире галактик это не редкость: многие крупные системы имеют спиральный узор на своем звездном диске. Яркие и горячие юные звезды в основном и сосредоточены в этих спиралях. Но как образуются спиральные рукава? На этот счет существуют различные взгляды (см. раздел 3.16), причем обычно считается, что первичны коллективные процессы, приводящие к появлению спиральных рукавов-уплотнений, а звездообразование, возникающее в этих уплотнениях, — это вторичный эффект, не оказывающий прямого влияния на формирование спирального узора. В последние десятилетия особенно популярны были теории спиральных волн плотности, бегущих по звездному диску, как по поверхности воды. Но существует и другой подход к этой проблеме, связанный с особенностями формирования звезд.

Оказалось, что спиральные ветви могут и не иметь волновой природы. Спиральный узор далеко не всегда обладает четкой, правильной формой, а часто состоит из коротких спиралевидных участков. Эти сегменты, вытянутые дифференциальным вращением диска, могут быть связаны с непрерывно возникающими и исчезающими областями рождения звезд. Зрелые области звездообразования в состоянии стимулировать рождение звезд в соседних областях, так что весь процесс будет иметь незатухающий (пока есть газ) характер.

До недавних пор теория звездообразования изучала небольшие галактические структуры — туманности и звездные скопления — размером в несколько парсеков, а теория спиральной структуры имела дело с масштабами в килопарсеки. Но в последнее время эти теории сблизились при изучении структур промежуточного размера: фрагментов спиральных рукавов, огромных «пузырей» межзвездного газа и комплексов гигантских межзвездных облаков. Наблюдения указывают, что эти объекты проявляют элементы самоорганизации, располагаясь в определенном порядке, и, вероятно, связаны между собой генетически. Но причины этой связи не вполне ясны.

Вспомним, что у истоков теории формирования звезд и галактик стоял сам Исаак Ньютон. В 1692 г. он изложил свою идею о гравитаци-

онном сгущивании космического вещества: «...Если бы это вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не могло бы объединиться в одну массу, но часть его сгущалась бы тут, а другая там, образуя бесконечное число огромных масс, разбросанных на огромных расстояниях друг от друга по всему этому бесконечному пространству. Именно так могли образоваться Солнце и... звезды».

Спустя три столетия смелая гипотеза Ньютона подтвердилась почти буквально: наш мир действительно был некогда заполнен однородным веществом, и оно действительно разделилось на части и сгустилось в гигантские светящиеся массы — звезды и галактики. Вот только распределены эти массы в пространстве внутри галактик далеко не хаотично: они не «разбросаны», как полагал великий физик, а организованы в удивительные структуры — звездные комплексы, содержащие в себе не только отдельные молодые звезды, но и звездные скопления, ассоциации и облака межзвездного газа, из которого все это образуется. Комплексы размером около 300–500 пк и массой в несколько миллионов масс Солнца хорошо видны на изображениях спиральных галактик с симметрично изогнутыми рукавами, состоящими из цепочек «звездных облаков». Как выяснилось, в основном благодаря работам астрономов ГАИШ МГУ, звездные комплексы служат базовой ячейкой звездообразования в галактиках.

По поводу происхождения звездных комплексов существует несколько гипотез. Одна из них, развитая в работах Ю. Н. Ефремова (ГАИШ) и Брюса Элмегрена (B. G. Elmegreen), основана на самопроизвольном распаде межзвездной среды на отдельные облака под действием гравитации; это, так сказать, «линия Ньютона». Но имеется и альтернативная идея, разработанная Яном Палоушем (J. Palouš) В. Г. Сурдиным и Гильермо Тенорио-Тагле (Guillermo Tenorio-Tagle); она основана на процессе формирования звезд, стимулированном их предыдущими поколениями.

Действие этого механизма напоминает работу двухтактного двигателя: вспышка звездообразования в межзвездной среде приводит к расширению горячей каверны, которая сгребает и уплотняет газ в сверхоболочке, подготавливая его к следующему эпизоду формирования звезд. Правда, в отличие от бензинового мотора, у которого полный цикл «сжатие — вспышка — расширение» длится сотые доли секунды, полный цикл звездообразования протекает за сотни миллионов лет (Сурдин, 2001). Отголоски этого процесса — вокруг нас: это пояс Гулда (раздел 4.6) и Местный Пузырь/Труба (раздел 5.3). Дифферен-

циальное вращение галактического диска вытягивает сверхоболочки в бананообразные отрезки, которые воспринимаются как отрезки спиральных рукавов. Вероятно, для полного описания спиральных галактик в будущем будут использованы элементы не только упомянутых выше, но и других конкурирующих теорий.

7.4. Звездные скопления

Внешность каждой галактики определяется самыми крупными деталями ее строения — спиральными рукавами, звездным балджем, баром и активным ядром (если оно есть). Но, рассматривая галактику «под микроскопом», мы обнаруживаем в ней иерархию подсистем, самые крупные из которых — пузыри, сверхоболочки и звездные комплексы — мы уже упоминали. Однако эта цепочка структур продолжается и дальше — через звездные скопления разного калибра вплоть до двойных звезд. Современные наблюдаемые параметры этих подсистем могут многое рассказать нам (и постепенно рассказывают) о процессах, протекающих в Галактике. Но пока еще некоторые моменты жизни звездных систем разного масштаба остаются неизученными.

7.4.1. Симметрия формы и симметрия эволюции

Симметрия в природе — признак красоты: биолога восхищает радиолария, химик любит фуллерен, физик с детским любопытством изучает мыльные пузыри, астроном с изумлением взирает на звездные скопления. Почти идеальная форма звездных скоплений сулит легкую разгадку их природы. Но это не так. Хотя звездные скопления — объект пристального внимания астрономов (некоторые посвящают изучению скоплений всю свою научную жизнь), в происхождении и эволюции этих «звездных городов» еще много неясного. Особенно это касается шаровых звездных скоплений — наиболее старых, наиболее массивных и наиболее симметричных среди всех. По мере изучения этих элегантных небесных созданий в нашей и соседних галактиках, по мере все более точного компьютерного моделирования их жизни наше восхищение пространственной симметрией звездных скоплений уступает место более глубокому чувству, вызванному симметрией их эволюционного цикла.

Дело в том, что процесс формирования звезд и особенно звездных скоплений скрыт в недрах гигантских газово-пылевых облаков. Когда эти области стали доступны для наблюдения при помощи инфракрасных и радиотелескопов, когда астрономы действительно обнаружили в недрах облаков формирующиеся звездные скопления,



Рис. 7.19. Шаровое звездное скопление Мессье 13, наблюдаемое в созвездии Геркулес, одно из крупнейших в Галактике: оно содержит около миллиона звезд и имеет диаметр около 100 пк. Фото: M. Burali, T. Carocchi, M. Mancini.

стало казаться, что главная проблема их эволюции решена. Но, как выясняется, понять свойства звездных скоплений невозможно, не решив проблему их смерти. Жизненный цикл любого организма включает формирование, развитие, затухание и распад. Эта мысль совершенно очевидна для биолога, постоянно наблюдающего полный жизненный цикл растений и животных, но она пока еще непривычна для астронома, ибо звездные системы эволюционируют медленно, а возраст Вселенной не так уж велик. Поэтому, рассказывая о динамической эволюции звездных скоплений, мы особенно подробно рассмотрим механизмы их разрушения, позволяющие понять некоторые «темные» стороны их жизни.

7.4.2. Многообразие звездных систем

Все звезды являются членами тех или иных систем; до сих пор астрономы не обнаруживали светил, свободно и в одиночку блуждающих по Вселенной. Системы звезд поражают нас диапазоном масштабов и разнообразием морфологии: от двойных звезд до гигантских галактик, состоящих из сотен миллиардов светил и имеющих самые замысловатые формы. В ряду этих систем немалый диапазон занимают звездные скопления и ассоциации, содержащие от 10^2 до 10^6 звезд.

Звездные скопления, как более концентрированные и ярко выраженные на небе агрегаты, начали обнаруживать и описывать еще в XVII–XVIII вв. Но их роль в круговороте звездной эволюции оставалась неясной, пока в XX в. не были выделены значительно более разреженные и малозаметные группировки молодых звезд — ассоциации, а затем и комплексы.

Ныне номенклатура внутригалактических звездных агрегатов такова:

- двойные и кратные (т. е. тройные, четырехкратные и т. п.) звездные системы;
- рассеянные звездные скопления;
- шаровые звездные скопления;
- звездные ассоциации;
- звездно-газовые комплексы.

В главах 2 и 3 мы уже рассказали об этих системах с формальной стороны, математическим языком. В главах 4 и 5 познакомились с некоторыми конкретными системами. А теперь коснемся космогонических аспектов, т. е. рассмотрим некоторые эпизоды реальной жизни разнообразных звездных групп и скоплений.

В динамическом смысле двойная звезда — система из двух светил, обращающихся вокруг общего центра масс — чрезвычайно стабильна. Она была бы практически вечной, если бы не влияние соседей и физическая эволюция ее собственных компонентов. (Излучение гравитационных волн мы не рассматриваем — это слабый эффект.) Близкие пролеты соседних звезд, массивных звездных скоплений и облаков межзвездного газа постепенно меняют характер движения компонентов двойной звезды: они либо катастрофически сближаются друг с другом, либо удаляются друг от друга и навсегда теряют связь. При этом выполняется любопытная закономерность: под действием гравитационных возмущений от пролетающих мимо звезд изначально далекие друг от друга компоненты двойных систем расходятся еще дальше, а изначально близкие — сближаются и в конце концов сливаются. Однако процесс этот длительный; внутренняя механическая устойчивость гарантирует двойным звездам долгую жизнь. Поэтому около половины всех звезд в Галактике объединены в двойные системы, размеры которых лежат в диапазоне от нескольких диаметров типичной звезды ($\sim 10^9$ м) до характерного межзвездного расстояния ($\sim 10^{16}$ м).

Звездные системы более высокой кратности — тройные, четырехкратные и т. д. — представлены в Галактике не так широко. При-

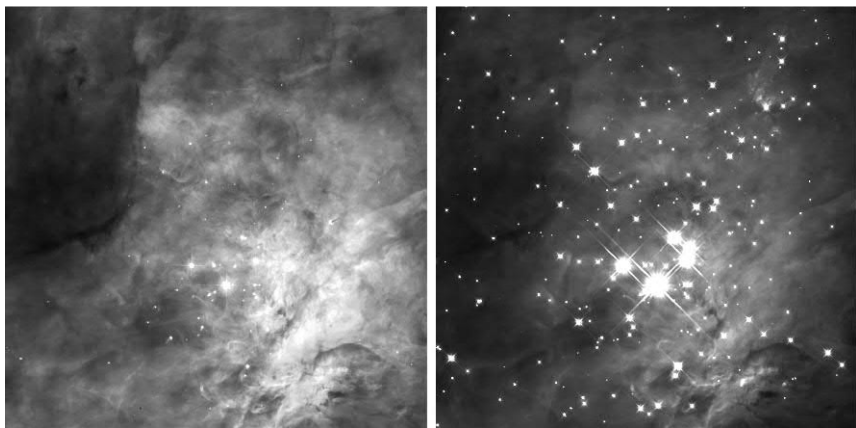


Рис. 7.20. Скопление чрезвычайно молодых звезд в созвездии Орион. Слева оптический снимок, справа — инфракрасный. Группа из четырех ярких звезд — Трапеция Ориона — уже почти расчистила пространство вокруг себя от остатков протозвездного газа. Но большинство членов этого новорожденного коллектива еще скрыты в недрах темного облака, лежащего за Трапедией. Фото: космический телескоп «Хаббл», NASA/ESA.

чина очевидна: в отличие от устойчивого периодического движения двойной звезды система из трех и более тел имеет хаотическую внутреннюю динамику, чреватую взаимными сближениями компонентов и обменом между ними энергией (раздел 3.4). В результате кратная система быстро распадается на серию одиночных и двойных звезд. Очевидно, именно такая судьба ожидает Трапецию Ориона (θ^1 Ori), четыре массивных компонента которой на небе расположены почти на одинаковом расстоянии друг от друга, да и в пространстве также находятся на сравнимых расстояниях (Витриченко, 2004). Такие системы с нерегулярными орбитами компонентов, неустойчивые относительно самопроизвольного распада, можно называть *хаотическими*.

С другой стороны, звездные системы высокой кратности, имеющие *иерархическую* структуру, могут жить долго. Их члены упакованы по принципу матрешки: например, в широкой паре звезд один из компонентов или даже оба могут быть тесными двойными системами. В динамическом смысле подобные агрегаты весьма устойчивы, поскольку и внутренние, и внешние подсистемы ведут себя практически как двойные. Простейший пример двухуровневой системы демонстрируют Мицар (ζ UMa) и Алькор (γ UMa или 80 UMa) в Ручке Ковша Большой Медведицы: даже в небольшой телескоп Мицар разделяет-

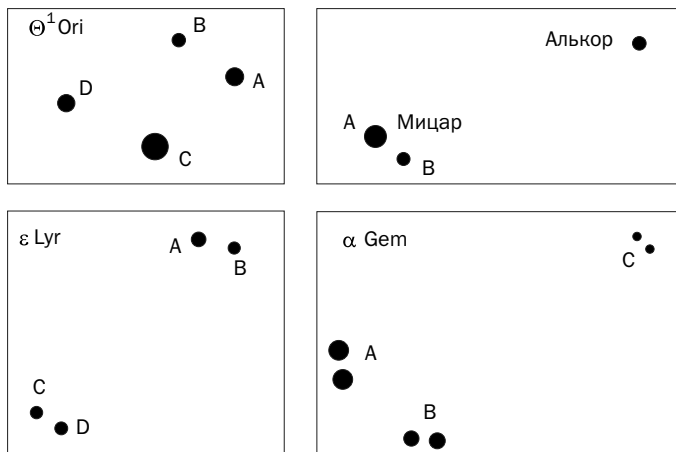


Рис. 7.21. Структура некоторых кратных звезд. Трапеция Ориона ($\Theta^1 \text{ Ori}$), Мицар—Алькор в Большой Медведице, Эпсилон Лиры ($\epsilon \text{ Lyr}$) и Кастор ($\alpha \text{ Gem}$) в Близнецах.

ся на два компонента — А и В. Можно сказать, что у этой тройной звезды иерархический тип « $2 + 1$ ».

Более сложный пример типа « $2 + 2$ » демонстрирует система Эпсилон Лиры, состоящая из двух тесных двойных звезд; обычно ее так и называют — «двойная двойная». Одна пара от другой легко разрешаются в бинокль, а компоненты пар видны по отдельности в телескоп. Известны примеры и более высокой иерархичности: одна из самых сложных систем — звезда Кастор (Альфа Близнецов) — имеет шесть компонентов, распределенных на трех уровнях иерархии: т. е. это система типа « $(2 + 2) + 2$ ». Ее яркие компоненты А и В — спектральные двойные, а тусклый компонент С — алголь, т. е. затменная двойная.

Следует отметить, что приведенные здесь примеры в некотором смысле условны. Например, система Мицар—Алькор традиционно представляется как тройная. Но в действительности давно известно, что Мицар А — двойная звезда: это первая спектральная двойная, открытая Эдуардом Пикерингом еще в 1889 г. Позже обнаружилась спектральная двойственность и Мицара В. Недавно, в декабре 2009 г., у Алькора тоже был открыт спутник — красный карлик. Так что в группе Мицар—Алькор содержится как минимум 6 звезд. А с другой стороны, до сих пор нет уверенности, что Мицар и Алькор гравитационно связаны друг с другом. Если эта связь будет надежно доказана, то окажется, что система Мицар—Алькор по сложности своей структуры не уступает Кастору. Впрочем, и от Кастора еще можно ожидать сюрпризов. Систе-

ма ϵ Луг также оказалась сложнее, чем кажется: в ней недавно обнаружен пятый член (звезда С оказалась двойной). Ну а Трапеция Ориона вообще поражает своей населенностью: компонент D двойной, А и С — тройные, а В состоит из шести звезд!

Что касается иерархических систем, то выше мы видели примеры трехуровневых (Кастор и Мицар—Алькор), но встречаются и более сложные. Примеры кратных систем с четырьмя уровнями иерархии дают DN UMa (5 компонентов), β Car (6 компонентов) и Sco (7 компонентов). Вообще говоря, в каталогах кратных звезд присутствуют даже 8-кратные светила, но физическая связь между всеми их компонентами пока не доказана, т. е. они могут быть результатом случайной проекции на небе. А насколько сложными в принципе могут быть иерархические звездные системы? Поскольку каждый более высокий уровень иерархии требует существенного увеличения размера системы, ее средняя плотность с возрастанием количества уровней быстро падает, и такой звездный агрегат слабо сопротивляется разрушительному действию приливных сил в галактике. Расчеты показывают, что в нашей галактике населенность иерархических агрегатов ограничена несколькими десятками звезд (Сурдин, 1997). Все более населенные звездные скопления имеют *хаотическую* структуру и динамику.

Типичное скопление звезд — Плеяды (Стожары). Эти симпатичная группа светил знакома многим, поскольку легко отыскивается на зимнем небе в созвездии Телец. Хотя наш глаз замечает в ней в лучшем случае 5–6 слабеньких звездочек, в телескоп их можно насчитать несколько сотен, а детальное исследование показывает, что в этом скоплении не менее 1000 звезд. Это обычное рассеянное скопление. Термин «рассеянное» в отношении к таким скоплениям связан с их рыхлым внешним видом и в основном обусловлен малым числом звезд, среди которых всего несколько ярких, определяющих «лицо» скопления. В диске Галактики порядка 100 тыс. таких скоплений, но из них пока обнаружено около 2200, а более или менее детально изучены лишь около 1500. Возрасты этих скоплений заключены в интервале от 10^6 до 10^{10} лет, но преобладают молодые: среди изученных скоплений всего около 50 имеют возраст более 1 млрд лет. Типичный размер рассеянного скопления — несколько парсеков. Их массы измеряются пока не очень точно, с неопределенностью около 20%; в целом они лежат в интервале от 10^2 до $10^4 M_{\odot}$, а средняя масса рассеянного скопления близка к $10^3 M_{\odot}$.

Самые молодые рассеянные скопления возрастом от 1 до 10 млн лет еще погружены в родительское газовое облако. В основном эти



Рис. 7.22. Рассеянное скопление Плеяды (центральная часть). Его возраст около 100 млн лет, и оно еще не успело сильно проэволюционировать. Облака межзвездного газа, рассеивающие свет ярких звезд скопления, не имеют к нему отношения: они лежат между Землей и Плеядами. Фото: NASA/ESA/AURA/Caltech.

«инкубаторы» звезд сосредоточены в спиральных рукавах Галактики, т. е. там же, где формируются гигантские молекулярные облака. Но скопления возрастом более 30 млн лет уже почти не связаны с газом. А наиболее старые рассеянные скопления, возрастом 8–12 млрд лет, по массе и химическому составу звезд приближаются к шаровым скоплениям и населяют внешнюю часть диска Галактики, практически лишенную межзвездного газа.

Шаровые звездные скопления встречаются как в диске Галактики, так и во всем объеме окружающего диск гало. Их диаметры, ограниченные приливными силами Галактики, заключены в пределах от 10 до 500 пк. Массы большинства шаровых скоплений лежат в диапазоне от 10^4 до $2 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Именно большому количеству звезд эти скопления обязаны своей правильной формой. По этой же причине, а также в силу своего положения вдали от непрозрачного галактического диска шаровые скопления видны в самых дальних уголках Галактики. Сейчас в каталоги занесено около 160 шаровых скоплений;

всего их в Галактике, как показывают расчеты, не более 180 (Сурдин, 1994). Таким образом, система шаровых скоплений Галактики выявлена с уникальной полнотой — практически полностью. В других галактиках количество шаровых скоплений приблизительно пропорционально массе самой галактики: в карликовых галактиках их несколько или вовсе нет, а в гигантских системах — многие тысячи: например, в крупной эллиптической галактике M87 около 13 тыс. шаровых скоплений.

Возраст шаровых скоплений близок к хаббловскому возрасту Вселенной (около 14 млрд лет). На это указывают несколько независимых фактов, например, «химические часы», т. е. накопление в межзвездном веществе Галактики химических элементов тяжелее гелия, выбрасываемых умирающими звездами; чем позже сформировалась из этого вещества звезда, тем больше в ее составе тяжелых элементов (кислорода, углерода, азота и др.). Звезды шаровых скоплений наиболее бедны такими элементами, а значит, они очень старые. Другое указание на преклонный возраст шаровых скоплений — сильно вытянутые галактические орбиты многих из них; это говорит о том, что они родились или вошли в состав Галактики ранее той эпохи, когда она пришла в стационарное состояние. Эти и другие факты указывают, что эпоха формирования большинства шаровых скоплений предшествовала эпохе формирования Галактики или совпадала с ней.

От шаровых и рассеянных звездных скоплений, члены которых прочно связаны между собой взаимным притяжением, принципиально отличаются звездные ассоциации и комплексы, имеющие большую протяженность и очень низкую плотность, но демонстрирующие при этом несомненную взаимную генетическую связь своих членов. Наиболее известны группировки молодых массивных звезд спектральных классов O и B, открытые в первой половине XX в. и названные OB-ассоциациями. В отличие от звездных скоплений, они не демонстрируют заметной концентрации звезд к центру системы и «на глаз» не выделяются в звездном поле, однако совместное формирование их членов не вызывает сомнения. Эти разреженные звездные коллективы содержат от нескольких десятков до нескольких сотен голубых звезд и наверняка тысячи менее массивных звезд, которые не так легко заметить. Их диаметры составляют от 15 до 300 пк, что значительно превышает размеры рассеянных скоплений с такой же характерной массой. Наконец, еще более рыхлыми являются обширные группировки молодых звезд, населяющие звездно-газовые ком-

плексы (Ефремов, 1989); их размеры близки к 1000 пк; по существу, это фрагменты спиральных рукавов Галактики. Если эти области охвачены бурным звездообразованием и содержат много молодых ярких звезд, то их называют сверхассоциациями.

7.4.3. Рождение и молодость звездных коллективов

Какова связь между описанными выше группировками звезд и какова их роль в жизни Галактики? Именно эти вопросы интересуют сейчас астрономов, изучающих звездные скопления. Дело в том, что, научившись при помощи инфракрасных телескопов заглядывать в недра космических облаков, туда, где рождаются звезды, мы увидели, что рождаются они большими группами. Но что происходит с этими группами дальше? В период формирования они выглядят очень плотными и стабильными, но почему же тогда эти группы крепко связанных гравитацией звезд не сохраняются надолго? Почему доля звезд Галактики, объединенных в составе звездных скоплений, чрезвычайно мала ($\sim 10^{-3}$)? В поиске ответов на эти вопросы в последние годы обнаружилось много интересного.

Оказалось, что в период формирования и ранней молодости звездного скопления существует несколько явлений, весьма быстро приводящих к его частичному или даже полному разрушению. Наиболее важное из них — выброс из формирующегося скопления остатков межзвездного газа. Это происходит сразу после рождения наиболее массивных звезд, обладающих очень мощным излучением, способным разогреть и даже ионизовать протозвездный газ. Образовавшийся горячий плазменный шар своим высоким давлением разрушает родительское облако, и новорожденная группа звезд оказывается «изъятой» из той «гравитационной ловушки», которой служило массивное облако.

Предоставленную самой себе группу новорожденных звезд ожидает три возможных исхода: а) скорости хаотического движения звезд так велики, что они преодолевают взаимное притяжение и разлетаются от места рождения навсегда: образуется расширяющееся «облако» молодых светил — ассоциация; б) взаимного притяжения звезд достаточно, чтобы удержать их вместе: образуется гравитационно связанная система — звездное скопление; в) медленно движущиеся звезды остаются на месте и формируют гравитационно связанное скопление, а более «шустрые» светила разлетаются в виде ассоциации. Очевидно, в зависимости от конкретных условий в различных областях звездообразования реализуются все три вариан-

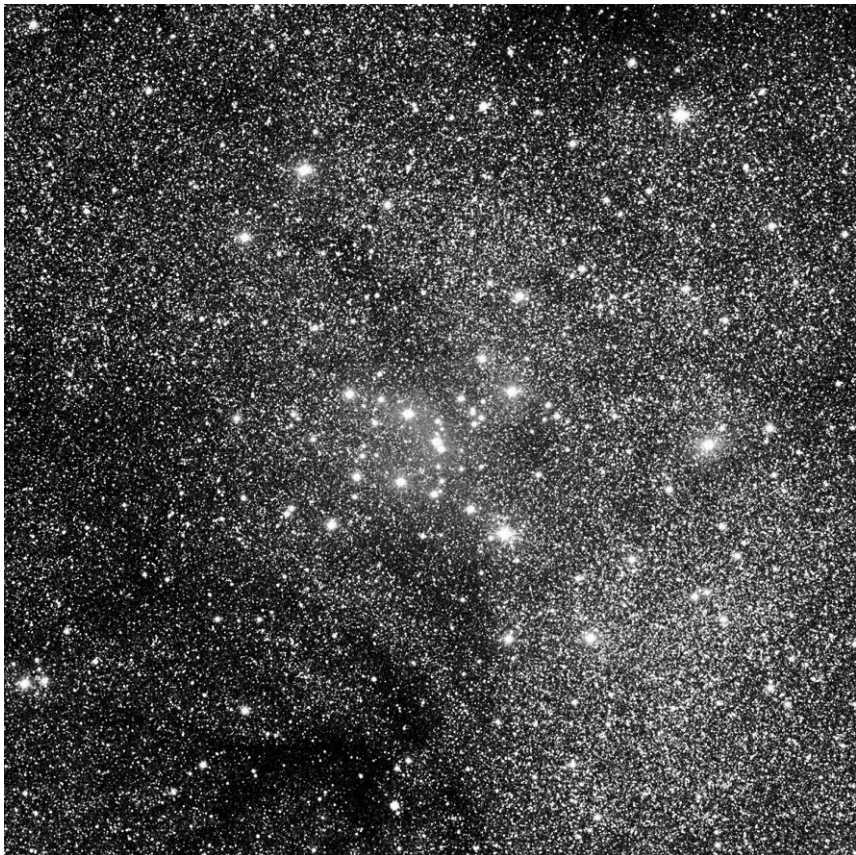


Рис. 7.23. Рассеянное скопление Мессье 7 в созвездии Скорпион наблюдается на фоне более далеких звезд центральной области Галактики. Возраст этого скопления около 250 млн лет, вполне зрелый для рассеянного скопления.

та. Наблюдения показывают, что нередко звездное скопление находится в центре ассоциации, а она сама представляет как бы корону скопления, звезды в которой слабо связаны гравитацией как со скоплением, так и друг с другом. У некоторых ОВ-ассоциаций по измеренным движениям звезд обнаружены признаки расширения со скоростью 7–10 км/с. При этом характерное время расширения (т. е. размер, деленный на скорость) составляет 2–5 млн лет, поэтому через несколько миллионов лет после рождения такая ассоциация полностью растворяется в окружающем поле звезд. Наши расчеты показывают, что именно таким путем — через расширяющиеся ассоциации — большинство звезд попадает в галактический диск; в со-



Рис. 7.24. Туманность Розетка (NGC 2237-39, 2244, 2246 или Caldwell 49) — очень красивый объект диаметром около 30 пк, хорошо известный любителям астрономии. В центре «розетки» располагается молодое звездное скопление, которое разогрело окружающий газ и уже изгнало его из центральной части облака.

ставе скоплений остается их меньшая часть (Сурдин, 1995; Moskal, Surdin, 1998).

Но история «разрушительной молодости» скопления на этом не заканчивается. Медленные звезды, не способные преодолеть взаимное притяжение, начинают приближаться друг к другу и взаимодействовать все сильнее. Происходящий при этом процесс обмена энергией между звездами впервые был описан на современном математическом языке английским астрономом Д. Линден-Беллом в 1967 г. и назван «бурной релаксацией» (см. раздел 3.10). Но первая мысль об этом процессе родилась еще у отца теории гравитации...

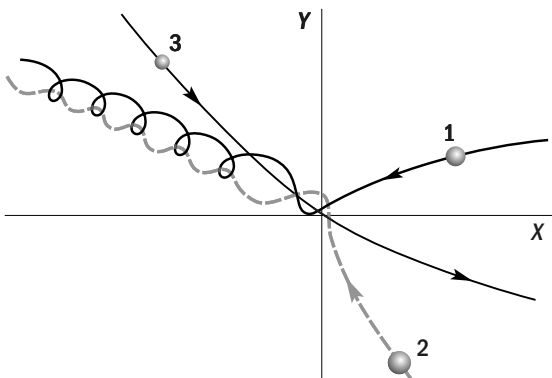
Стоит ли напоминать, что Исаак Ньютон обладал поразительным физическим чутьем. В известных письмах Ричарду Бентли он высказал несколько замечательных идей, в частности идею о гравитационной неустойчивости однородного вещества. Там же он нарисовал умозрительную картину, фактически предвосхитившую теорию звездной релаксации. В первом, наиболее известном письме Бентли от 10 декабря 1692 г., формулируя идею о гравитационной неустойчи-

ности, Ньютон описал *идеальную* картину коллапса: «Мне представляется, что если бы вещество нашего Солнца и планет, да и все вещество Вселенной было бы равномерно рассеяно по всему небу и каждая частица обладала бы внутренне присущим ей тяготением ко всем остальным, а все пространство, по которому было бы рассеяно это вещество, было бы конечным, то вне этого пространства вещество под действием своего тяготения стремилось бы ко всему веществу внутри него и, следовательно, падало бы к центру пространства и образовало бы там одну гигантскую сферическую массу». Но уже в четвертом письме от 25 февраля 1693 г. великий физик развивает картину коллапса протозвездного вещества до более реалистического уровня: «Однако материя при падении могла бы собираться в множество круглых масс, наподобие тел планет, а те, притягивая друг друга, могли бы обрести наклонность спуска и в результате падать не на большое центральное тело, а в стороне от него, и, описав вокруг него полукруг, снова начать подниматься теми же шагами и ступенями движения и скорости, какими до того они опускались, на манер комет, обращающихся вокруг Солнца». (Цит. по: Данилов Ю. А. Ньютон и Бентли // Вопросы истории естествознания и техники. 1993. № 1. С. 30.)

Как известно, пролетающие через внутренние области Солнечной системы кометы при случайном взаимодействии с планетами часто изменяют свою траекторию так, что навсегда уходят за пределы планетной системы. Такая же судьба ждет многие звезды, проходящие близ центра скопления в период его первоначального сжатия: ведь при движении в нестационарном гравитационном поле энергия частиц не сохраняется. Численные модели показывают, что от 5 до 30% всех звезд после этого навсегда покидают скопление с весьма большими скоростями. А вслед за этим происходят события иного рода, но имеющие те же последствия. Значительная доля массивных новорожденных звезд входит в состав тесных двойных систем, компоненты которых обращаются вокруг центра масс со скоростью в десятки километров в секунду. Спустя несколько миллионов лет после рождения одна из звезд в каждой паре заканчивает свою эволюцию, взрывается как сверхновая и теряет при этом большую часть своей массы, а ее соседка, имея солидную орбитальную скорость и неожиданно лишившись притяжения партнера, вылетает, как камень из пращи, и покидает скопление навсегда.

Впрочем, еще до разрушения одной из звезд, тесная двойная система может сыграть роль рогатки: при случайной встрече в пространстве одиночной звезды с двойной (или двух двойных систем) весьма

Рис. 7.25. В результате тесного сближения трех одиночных звезд в этой компьютерной модели две более массивные из них образовали двойную систему, а третья с возросшей скоростью покинула место встречи, унося часть гравитационной энергии связи двойной звезды.



вероятен переход внутренней гравитационной энергии звездной пары в кинетическую энергию звезд. Проще говоря, после встречи одиночной звезды с тесной двойной системой (или встречи двух двойных систем) компоненты пары оказываются ближе друг к другу, а за счет выделившейся гравитационной энергии возрастает как скорость их орбитального движения, так и скорость их полета в пространстве.

В скоплениях возможны и другие типы взаимодействия звезд, приводящие к их ускорению. Различные варианты тесного взаимодействия звезд изучены в последние годы путем численного моделирования: так, возможны обменные взаимодействия, когда одиночная звезда, встретившись с парой, заменяет собой один из ее компонентов. Еще больше вариантов обмена и распада возможно при встрече двух двойных систем. При этом в среднем действуют простые правила: 1) массивные звезды предпочитают объединяться с массивными, выбрасывая из системы более легких партнеров; 2) если налетающая звезда движется медленнее, чем компоненты двойной системы обращаются по орбите, то после встречи двойная система становится еще плотнее, а удаляющаяся звезда уносит выделившуюся гравитационную энергию, т. е. ускоряется. Как частный случай этого правила можно рассматривать случайное сближение трех одиночных звезд, которое приводит к формированию двойной системы и значительно ускоряет движение третьей звезды, оставшейся в одиночестве (рис. 7.25).

Как видим, в звездном скоплении есть немало возможностей для ускорения звезд. В связи с этим можно вспомнить, что в областях звездообразования, кроме медленно расширяющихся звездных ассоциаций, наблюдаются также «убегающие звезды» (runaway stars), находящиеся за пределами ассоциации, но имеющие к ней прямое отно-

шение: направление и скорость их движения указывают, что они покинули область формирования звезд несколько миллионов лет назад и удаляются от нее значительно быстрее, чем расширяется ассоциация в целом. Например, звезды AE Aur и μ Col разлетаются из области Трапеции Ориона со скоростью 130 км/с, а двойная система Vela X-1 с рентгеновским пульсаром 2,5 млн лет назад вылетела из звездной ассоциации Vela OB1 и удаляется от нее со скоростью 90 км/с. Трудно сказать, какой именно из описанных выше эффектов сыграл роль в каждом конкретном случае, но оба они эффективно разрушают скопления.

Итак, через нескольких миллионов лет после рождения группы звезд в недрах космического облака эти звезды своим излучением и звездным ветром разрушают родительское облако, а вслед за тем и сами звезды в большинстве своем покидают место рождения. Лишь меньшая их часть (~10%) остаются связанными в звездных скоплениях, время жизни которых измеряется уже сотнями миллионов и даже миллиардами лет.

7.4.4. Механизмы эволюции взрослых скоплений

После того как молодое звездное скопление рассталось с остатками родительского газа и быстрыми звездами, оно приходит в стационарное состояние, но все равно продолжает медленно терять звезды под действием процессов внутренней релаксации и под влиянием внешних гравитационных возмущений.

Двигаясь в стационарном гравитационном поле скопления, звезды время от времени сближаются друг с другом и под действием взаимного притяжения изменяют свои траектории и энергию движения. Звездная система, как и любая другая система взаимодействующих частиц, стремится со временем к термодинамическому равновесию и максвелловскому распределению энергии между частицами. Однако звездное скопление — не колба с газом: у него нет стенок. Поэтому звезды, получившие в ходе обмена энергией большую скорость, вылетают из скопления навсегда, подобно тому как испаряются молекулы из открытого стакана с водой. Астрономы называют это *диссипацией звездных скоплений*. Особенно активно происходит диссипация относительно маломассивных рассеянных скоплений: скопление из тысячи звезд полностью «испаряется» за несколько сотен миллионов лет.

Стремление «звездного газа» к равномерному распределению энергии частиц ($mv^2/2$) приводит к тому, что более массивные звезды уменьшают скорость и опускаются к центру скопления: происходит сегрегация

звезд по массе. Легкие звезды уходят на периферию скопления и формируют протяженную корону, а более массивные собираются в плотном ядре, которое непрерывно сжимается.

Сразу после создания первых компьютеров специалисты по звездной динамике стали моделировать эволюцию звездных скоплений, представляя звезды в виде точечных масс. Первые расчеты показали, что центральная часть скопления должна за конечное время сжаться до нулевого размера и бесконечной плотности. Когда этот теоретический результат был получен, астрономов очень заинтересовало, а что же происходит в действительности в центре звездного скопления, когда теряющие энергию звезды подходят близко друг к другу: ведь в природе не бывает бесконечностей, это всего лишь математическая абстракция. По поводу уплотняющихся ядер звездных скоплений высказывались разные идеи: одни говорили, что реальные звезды будут сталкиваться и разрушать друг друга, другие — что звезды будут сталкиваться и слипаться друг с другом и при этом из многих обычных звезд получится одна очень массивная звезда. Но такая сверхзвезда, конгломерат из сотен слившихся вместе звезд, представляла бы собой чрезвычайно эффектное зрелище, а ничего подобного в звездных скоплениях никто никогда не наблюдал. В нашей галактике ни у одного из скоплений в центре нет сверхзвезды. Вероятно, простые модели не учитывают какие-то важные особенности звездных скоплений. Какие же именно?

Выяснилось, что представление звезд в виде точечных масс было чересчур грубым: такие звезды обменивались энергией, но в сумме не теряли ее, а в действительности это не всегда так. Рассмотрим близкий пролет двух звезд. Если в процессе сближения они остаются шарообразными, то притягиваются по закону Ньютона, а значит, движутся по гиперболическим траекториям и после сближения вновь расходятся «на бесконечность». На самом же деле взаимное приливное влияние искажает форму звезд: они становятся вытянутыми эллипсоидами. Для иллюстрации будем считать, что одна из звезд — очень массивная, жесткая и неподвижная, а вторая подлетает к ней издалека (рис. 7.26). Сначала подлетающая звезда была шарообразна, но, приближаясь к массивной соседке, она вытягивается вдоль соединяющей их прямой. Это и есть приливный эффект; он полностью аналогичен тому, который под влиянием притяжения Луны и Солнца вызывает на Земле морские приливы и отливы.

При сближении звезд их тела деформируются все сильнее, вытягиваясь в направлении друг друга. Звезды движутся, и приливные гор-

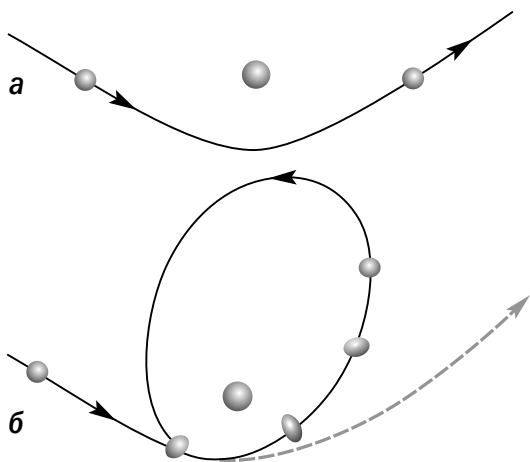


Рис. 7.26. Приливный захват при тесном сближении двух звезд (одна из них для простоты показана неподвижной и абсолютно жесткой). Если бы звезды не деформировались гравитацией соседа (а), то пролет был бы симметричным, и захват не произошел. В действительности (б) приливная деформация звезды отбирает у нее часть механической энергии, поэтому звезда переходит на связанную орбиту — образуется двойная система.

бы поворачиваются, пытаясь отследить направление гравитационной силы. Но из-за инерции и вязкости горб не может точно следовать повороту радиуса-вектора звезд: он сначала запаздывает, а затем опережает его. В результате взаимодействие происходит не по ньютонову закону: более близкий горб притягивается сильнее, чем более далекий, а значит, есть составляющая силы притяжения, *тормозящая* движение звезды по орбите и уводящая ее с простой гиперболической траектории. Энергия движения при этом частично переходит в энергию вращения звезды, а частично в тепло. Орбитальный момент тоже частично трансформируется в момент осевого вращения. Звезда переходит на эллиптическую орбиту и оказывается навсегда привязанной к той звезде, с которой она случайно сблизилась. Так из двух одиночных звезд образуется двойная система. Это возможно только при очень тесном сближении звезд, на расстояние не более нескольких их собственных размеров. Следовательно, массовое формирование двойных в результате приливного захвата, равно как и в результате описанного выше сближения трех звезд, возможно только в очень плотных ядрах звездных скоплений.

Формирование двойных звезд способно серьезно повлиять на эволюцию звездного скопления в период сжатия его ядра. Объединившиеся в двойные системы звезды весьма своеобразно взаимодействуют друг с другом и с одиночными звездами скопления, заставляя их двигаться все более и более интенсивно. Специалисты по звездной динамике провели множество численных экспериментов, заставляя одиночные звезды пролетать мимо двойной системы. Ока-

залось, что результат пролета зависит от того, насколько сильно связаны друг с другом компоненты двойной системы. Если орбитальная скорость компонентов двойной системы меньше скорости, с которой на них налетает третья, одиночная звезда, то их встреча в большинстве случаев заканчивается распадом системы: все три звезды разлетаются в разные стороны. На языке физиков этот процесс можно называть ионизацией ударом: пролетающий мимо атома электрон, если сближение происходит с большой скоростью, может ионизовать атом, т. е. оторвать один из его электронов; в результате вместо двух свободных частиц получается три — ион и два электрона, однако их скорости уменьшаются, поскольку часть кинетической энергии ушла на отрыв электрона.

Физикам известен и обратный процесс — так называемый удар второго рода, когда пролетающий рядом с возбужденным атомом электрон получает дополнительную энергию за счет того, что атом переходит из возбужденного в основное состояние, т. е. электрон в нем опускается на более низкую орбиту. Вы уже догадались, что такой же процесс оказался возможен и в звездной динамике: если одиночная звезда пролетает мимо двойной системы, компоненты которой тесно связаны и быстро движутся, то, скорее всего, после этой встречи двойная система сохранится, станет еще более связанной, с еще большей орбитальной скоростью, а разницу в энергии унесет с собой налетающая одиночная звезда, которая после этой встречи увеличит свою скорость. Напомню: энергия гравитационной связи двух частиц равна $E_g = Gm_1m_2/R$. Можно сказать, что компактные, крепко связанные двойные звезды после встречи с одиночными становятся компактнее, т. е. еще плотнее связанными, а рыхлые, широкие, слабо связанные двойные системы после таких встреч обычно распадаются. Как говорится, богатые становятся богаче, а бедные — беднее.

Численные эксперименты указали и другие возможности взаимодействия одиночной звезды с двойной. Например, иногда происходит обмен компонентом, когда налетающая одиночная звезда становится компонентом двойной системы, выбрасывая оттуда одного из законных ее членов. Любопытно, что в большинстве случаев легкая звезда в системе заменяется более массивным пришельцем (толстые становятся толще?). Еще интереснее наблюдать столкновения двух двойных звезд. Но оставим эту тему: вы без труда можете сами осуществить такие эксперименты на персональном компьютере. Только следите, чтобы звезды не сталкивались «в лоб», а то не миновать космической катастрофы (имеется в виду деление на ноль).

Теперь сведем воедино то, что мы узнали о приливном механизме формирования двойных звезд и о взаимодействии одиночных звезд с двойными. Приливный механизм приводит к формированию только очень плотных двойных систем, поскольку он включается только при тесном сближении двух звезд. Плотные системы не распадаются, а при каждой встрече с одиночными звездами передают им часть своей энергии и заставляют их двигаться более интенсивно. Это и есть тот самый эффект, который не позволяет центральным областям звездных скоплений сжаться до бесконечной плотности. Когда в ядре звездного скопления плотность возрастает, звезды там начинают чаще встречаться друг с другом, чаще образуют двойные системы, которые начинают разгонять одиночные звезды, и те выскакивают из этой плотной области и уходят на периферию скопления. Звездные пары могут выбрасывать даже друг друга. Если провести аналогию звездного скопления с газовым облаком, то двойные звезды играют в скоплении роль источника тепла, не позволяющего облаку сжиматься. Попробуйте сами продолжить эту аналогию, вспомнив строение звезды (ведь это тоже газовое облако) и источник ее стабильности — термоядерные реакции, происходящие в ядре. Что общего между формированием двойных звезд в шаровом скоплении и превращением водорода в гелий? (Подсказка: энергия связи.)

Итак, ядра звездных скоплений избегают чрезмерного уплотнения благодаря формированию двойных звезд и их действию как источников энергии. При этом двойные образуются при тесном сближении одиночных звезд. Такие сближения называют гравитационными столкновениями звезд, подчеркивая, что физического контакта между ними при этом не происходит. А случаются ли в скоплениях настоящие, физические, столкновения? До сих пор их никто не наблюдал, но указания имеются. Два явления астрономы «списывают» на столкновения и слияния звезд.

Одно из них — это так называемые голубые бродяги (blue stragglers), они же голубые странники или голубые скитальцы. Это внешне молодые и достаточно массивные звезды, лежащие выше точки поворота главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, поэтому они и голубее других звезд главной последовательности. С современной аппаратурой их можно найти почти в любом шаровом скоплении, а впервые их заметил Аллан Сэндидж в 1953 г. в скоплении М3. Внешняя молодость этих звезд озадачила астрономов: ведь все звезды шарового скопления образовались одновременно, га-

за на образование новых звезд в нем не осталось, а такие яркие и массивные звезды, как голубые бродяги, должны были давно проэволюционировать и закончить свое существование.

Поначалу эти звезды посчитали «приблудными», захваченными скоплением при движении сквозь Галактику, — отсюда и название. Однако вскоре стало ясно, что голубые бродяги представляют собой естественный компонент звездного населения старых скоплений, и были предложены две теории их образования, основанные на механизме звездных слияний. Одна — теория столкновений — предполагает, что бродяги образуются в результате прямых столкновений звезд, которые в шаровых скоплениях изредка происходят. Вторая — теория тесных двойных — утверждает, что голубые бродяги рождаются в результате обмена массой или полного слияния звезд в двойных системах. Похоже, что сегодня больше аргументов у второй из этих теорий: в ее пользу говорит корреляция между количеством голубых бродяг и массой скопления, от которой зависит число тесных двойных. Но и столкновения или, по крайней мере, тесные сближения звезд тоже играют роль, ведь именно они влияют на эволюцию орбит двойных систем и даже на их формирование в ядрах скоплений.

Второе явление, которое некоторые астрономы приписывают слиянию звезд, — это рождение наиболее массивных светил. Дело в том, что стандартная теория гравитационной неустойчивости и дальнейшего формирования звезд не может объяснить появление светил с массой более $120\text{--}150 M_{\odot}$. А они обнаружены в ядрах некоторых молодых массивных скоплений: например, в скоплении R136 в центре туманности Тарантул в Большом Магеллановом Облаке есть звезда R136a1 с массой не менее $260 M_{\odot}$. Теоретики пытаются объяснить рождение таких монстров слиянием массивных протозвезд, но для этого требуется плотность в ядре скопления порядка $10^8 M_{\odot}/\text{пк}^3$. Не исключено, что у предельно молодых звездных скоплений, сформировавшихся в недрах гигантских молекулярных облаков и еще не расставшихся с ними (такие скопления называют «внедренными», *embedded clusters*), пространственная плотность молодых звезд действительно может достигать таких значений.

А теперь вернемся к эволюции «взрослого» звездного скопления. Продолжая аналогию со стаканом воды, легко понять, что любое внешнее гравитационное воздействие влияет на скопление звезд, как нагреватель на воду, усиливая «испарение» молекул-звезд. Для рассеянных скоплений, движущихся в пределах галактического диска по почти круговым орбитам, главным источником гравитационных воз-

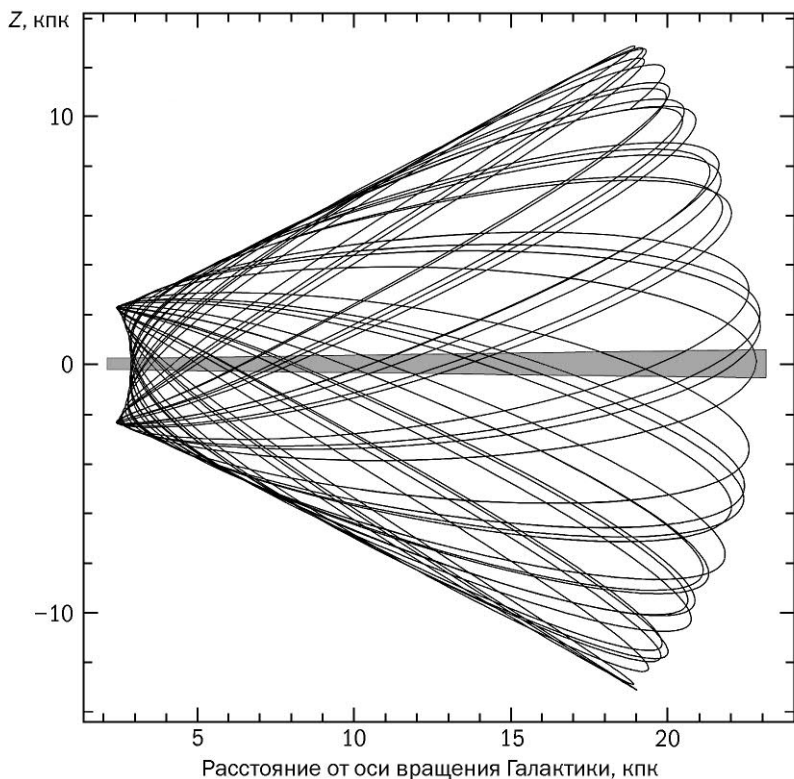


Рис. 7.27. Типичная орбита шарового скопления в проекции на сопутствующую меридиональную плоскость дисковой галактики. По вертикали — расстояние вдоль оси вращения галактического диска; по горизонтали — расстояние от этой оси. Серым показано сечение диска галактики. Сравните с рис. 3.22.

мущений служат близкие пролеты гигантских молекулярных облаков, имеющих массы 10^5 – $10^6 M_{\odot}$. При этом среднее время жизни рассеянного скопления в диске Галактики оказывается всего $3 \cdot 10^8$ лет. Именно поэтому все известные рассеянные скопления так молоды — старые давно разрушились.

Для шаровых скоплений, большую часть жизни проводящих за пределами галактического диска, встречи с межзвездными облаками существенного значения не имеют, ибо происходят крайне редко. Зато эти скопления регулярно пересекают плотный диск Галактики, попадая в его весьма неоднородное поле и испытывая при этом резкий «гравитационный удар». Такие удары ощутимо «нагревают»

шаровое скопление, ускоряя его диссипацию и заставляя оставшиеся в скоплении звезды удаляться от центра (по аналогии с лабораторной физикой это можно назвать тепловым расширением скопления). В условиях Галактики расширение звездного скопления чревато его распадом, поскольку неоднородное гравитационное поле Галактики вызывает приливной эффект и стремится растянуть скопление вдоль направления на галактический центр. Поэтому распухшее скопление теряет звезды со своей периферии, которые некоторое время сопровождают его по галактической орбите (как метеорный рой сопровождает ядро кометы), а затем «растворяются» среди прочих звезд Галактики.

Еще один чрезвычайно любопытный эффект, влияющий на жизнь самых массивных шаровых скоплений, — это динамическое трение, тормозящее движение массивного тела, летящего сквозь рой легких частиц. Этот эффект хорошо известен физикам в случае кулоновского взаимодействия; он с успехом используется в ускорительной технике для электронного охлаждения пучков быстрых протонов. В Галактике роль протона играет шаровое скопление, роль электронов — окружающие его звезды, а кулоновскую силу заменяет гравитация (раздел 3.11). Возмущая движение звезд и отдавая им свою энергию, скопление по спирали падает к центру Галактики. Чем ближе оно оказывается к плотному галактическому ядру, тем сильнее ощущает его приливное влияние и теряет от этого свои наружные слои. Так что до самого центра Галактики добирается в лучшем случае «огрызок» шарового скопления — его ядро, вносящее свой вклад в строительство галактического ядра.

Изучение описанных выше и многих других механизмов эволюции звездных скоплений привело к важным выводам об их судьбе и об эволюции Галактики в целом. Во-первых, яснее стало происхождение ядер галактик и звезд галактического гало: важную роль в этом сыграла уже не существующая, разрушившаяся часть популяции шаровых скоплений. Во-вторых, теперь мы лучше понимаем, какие свойства шаровых скоплений являются «врожденными», а какие — приобретенными в ходе длительной динамической эволюции; именно врожденные свойства этих древних звездных скоплений помогают восстанавливать историю формирования нашей Галактики. Наконец, одной из важнейших особенностей современного рождения звезд оказалось их взаимодействие с окружающим газом, приводящее к формированию различных звездных систем — скоплений, ассоциаций, комплексов.

7.4.5. Поиск звездных скоплений

Пристальный интерес астрономов к звездным скоплениям легко понять. Измеряя характеристики сотен звезд-родственников, сформировавшихся из одного материала, в одном месте и в одно время, можно существенно увеличить точность результатов за счет усреднения, уменьшающего случайные ошибки. Расстояние до скопления, его скорость, степень межзвездного поглощения света, химический состав и возраст его звезд определяются значительно точнее, чем для каждой звезды индивидуально. Но польза от скоплений не только в этом. По сравнению со звездами их скопления — значительно более хрупкие и прозрачные создания, подверженные внешнему гравитационному влиянию и демонстрирующие нам свою внутреннюю структуру. Изучая распределение и движение звезд в скоплениях, можно многое сказать о его происхождении и эволюции. А внешние характеристики скопления — его форма и средняя плотность — говорят нам о том, в каких гравитационных полях побывало скопление, насколько сильно оно приближалось к центру галактики, сталкивалось ли с гигантскими молекулярными облаками и т. п. Можно сказать, что звезды скопления обладают коллективной памятью, и это делает звездные скопления ценными космогоническими свидетелями. Чем больше звездных скоплений обнаружено в галактике, тем точнее можно восстановить ее историю.

Это справедливо для всех галактик, но особенно важно для нашей. Именно здесь есть возможность наиболее полно изучить систему звездных скоплений и, основываясь на ее свойствах, восстановить ис-

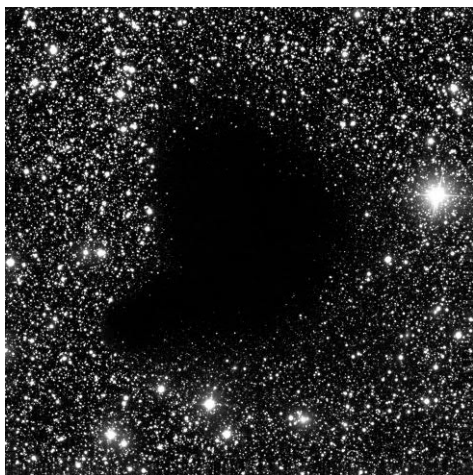


Рис. 7.28. Два препятствия в Млечном Пути мешают поиску далеких звездных скоплений — непрозрачные для света облака и богатый звездный фон в промежутках между ними. На снимке: газово-пылевое облако B68 (Barnard 68) в созвездии Змееносец, удаленное от Земли всего на 150 пк; поэтому перед ним не оказалось ни одной яркой звезды, а за ним вообще ничего не видно. Фото: телескоп VLT обсерватории ESO (Чили).



Рис. 7.29. Изображение центральной части Млечного Пути размером $5^\circ \times 2^\circ$ получено сложением трех инфракрасных снимков. Два фото в ближнем ИК-диапазоне (1,25 и 2,17 мкм) сделаны с Земли в обзоре 2MASS, а фото в диапазоне 6–11 мкм получил спутник MSX (США) с околоземной орбиты в 1996–1997 гг. Его 33-см телескоп охлаждался твердым водородом до температуры 12 К. В ближнем ИК-диапазоне заметно множество далеких звезд, в основном красных гигантов, которые обычно не видны. На больших длинах волн межзвездная пыль сама ярко светится, но все же позволяет заглянуть почти в самый центр Галактики (в середине снимка).

торию Галактики. Наиболее древние свидетели этой истории — шаровые скопления, и почти все они уже обнаружены, хотя и не изучены детально. К сожалению, их осталось мало — всего около 180. Но это очень важные свидетели, и с каждым из них идет индивидуальная работа. Значительно богаче и разнообразнее система рассеянных скоплений. Если они распределены во всем галактическом диске с такой же плотностью, как в окрестностях Солнца, то их должно быть порядка 10^5 , но мы уже говорили, что обнаружено из них всего около 2200, т. е. 2%. Причины вполне очевидны: рассеянные скопления населяют галактический диск, который мы наблюдаем изнутри, сквозь плотную пылевую среду, препятствующую оптическим наблюдениям на расстояниях более 2–3 кпк. А в тех немногих направлениях, где пыли на луче зрения поменьше («окна прозрачности»), обнаружению скоплений мешает богатый звездный фон.

Преодолеть пылевую завесу отчасти помогают наблюдения в инфракрасном (ИК) диапазоне, в котором межзвездная пыль поглощает излучение значительно слабее, чем в оптике. В последние годы такие обзоры Млечного Пути проводились в ближнем ИК с Земли и в дальнем ИК с орбиты. Результаты впечатляют. Особенно ценным для поиска звездных скоплений стал обзор 2MASS (Two Micron All-Sky Survey), проведенный в 1997–2001 гг. автоматическими 1,3-метровыми теле-

скоплениями, работающими на вершинах Маунт-Хопкинс (США) и Серро-Тололо (Чили). Этот замечательный обзор, покрывший практически все небо и имеющий предельные звездные величины в фильтрах $J(1,25 \text{ мкм}) = 15,8^m$, $H(1,65 \text{ мкм}) = 15,1^m$ и $K_S(2,17 \text{ мкм}) = 14,3^m$, позволил при его «визуальном» просмотре обнаружить 346 новых скоплений и еще 10 скоплений путем автоматического анализа (Glushkova, 2012). Большинство этих скоплений очень молоды и внедрены в плотную облачную среду (embedded clusters); это делает их чрезвычайно интересными, но и сложными для исследования.

Автоматические методы поиска скоплений в основном опираются на выявление локальных пиков плотности звезд в определенном диапазоне их характеристик, например в ограниченном диапазоне их углового размера (поскольку все очень большие, т. е. близкие, уже обнаружены, а очень маленькие, т. е. далекие, вообще не видны). Эти методы приносят некоторые плоды. Так, автоматический просмотр каталога USNO-A2, основанного на Паломарском и ему подобных обзорах неба и содержащего объекты до $V = 21^m$, выявил около 1000 известных звездных скоплений и 8 новых кандидатов. Но алгоритмы поиска скоплений пока несовершенны. Например, автоматический поиск по каталогу GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire), основанному на данных космического инфракрасного телескопа «Спитцер» в четырех ИК-фильтрах (3,6; 4,5; 5,8 и 8,0 мкм), выявил 59 кандидатов в скопления в области Млечного Пути с координатами $|b| < 1^\circ$ и $|l| = 10\text{--}65^\circ$, а при «визуальном» просмотре этих же данных обнаружилось еще 33 внедренных скопления. Порой автоматический поиск выдает слишком много кандидатов. Так, в 2008 г. С. Е. Копосов, Е. В. Глушкова и И. Ю. Золотухин (ГАИШ МГУ) развили новый метод автоматического поиска и, применив его к обзору 2MASS в области $|b| < 24^\circ$, выявили 11 тыс. пиков звездной плотности, среди которых надежных скоплений оказалось не так уж много: в результате дополнительного автоматического и ручного отбора осталось около 700 известных рассеянных скоплений, около 100 известных шаровых скоплений и обнаружилось еще 168 новых скоплений (SAI Open Clusters Catalog, 2012). Можно сказать, что эффективность «полуавтоматического» поиска новых скоплений составила 1,5%. Однако сам по себе результат — 168 новых звездных скоплений — впечатляет!

Тем не менее пока в Галактике обнаружено лишь 2% звездных скоплений, а 98% — не найдено, так что работы впереди много. Следующего прорыва в области «инвентаризации» галактического диска

следует ожидать после 2018 г., когда вступят в строй обзорные телескопы-гиганты такого типа, как LSST (Large Synoptic Survey Telescope) диаметром 8,4 м, способный за 3–4 ночи зарегистрировать все доступное ему небо до $24,5^m$, а суммирование кадров к 2030 г. улучшит это значение до $27,5^m$. Это позволит не только пробить пылевую завесу на значительно большую глубину, чем сейчас, но и дотянуться до самых далеких и бедных звездами скоплений в гало Галактики. Пока такие скопления обнаруживаются лишь в относительной близости — не далее 50 кпк, поскольку глубина нынешних обзоров не превышает $22,5^m$.

Однако и на этих расстояниях уже обнаружены замечательные объекты. В 2010–2012 гг. по результатам обзора SDSS и программы SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration) были открыты два маленьких спутника Галактики: скопление Segue 3 на расстоянии 17 кпк от нас, имеющее светимость около $170 L_{\odot}$ и скопление Муньоз 1 (Muñoz 1) на расстоянии 45 кпк, содержащее всего около 500 звезд с общей светимостью около $120 L_{\odot}$. Оба они очень старые и бедные металлами, т. е. это древние шаровые скопления, хотя и чрезвычайно маленькие. Несколькими годами ранее в гало Галактики были обнаружены такие же маленькие древние скопления: Willman 1 (38 кпк, $500 L_{\odot}$), Boötes II (42 кпк, $1000 L_{\odot}$), Segue 1 (23 кпк, $300 L_{\odot}$) и Segue 2 (35 кпк, $800 L_{\odot}$). Их исследование уже продвинулось достаточно далеко и показало удивительный результат: эти крошки весьма массивны. Отношение масса/светимость составляет у них сотни и, может быть, даже тысячи (Segue 1) солнечных единиц! Иными словами, в них доминирует темная материя. Вероятно, в гало еще немало таких. С этой популяцией Галактики астрономам еще предстоит познакомиться. Возможно, это самые первые структурные элементы Вселенной, строительные блоки современных галактик.

7.5. Кинематика галактик

Наш земной мир в основном статичен: нас окружают предметы замысловатой и при этом неизменной формы — дома, машины, мебель, посуда, книги, компьютеры... Ложась спать, мы уверены, что утром эти предметы будут такими же, как накануне вечером. Этим свойством наша «локальная вселенная» обязана электростатическим силам, силам Ван-дер-Ваальса, действующим между атомами и молекулами, объединяющими в себе электрические заряды разного знака. Именно это свойство вещества обеспечивает ему твердость в определенном интервале температуры. Но в Большой Вселенной силы Ван-дер-Ва-

альса ничтожны, в космосе царствует гравитация. Гравитационные заряды — массы тел — имеют лишь один знак; они не способны отталкиванием компенсировать взаимное притяжение. Поэтому все космические тела находятся в непрерывном движении: частицы плазмы движутся в недрах звезд, планеты кружат вокруг звезд, сами звезды мчатся в галактиках и т. д.

Изучить структуру какой-либо галактики означает исследовать характер движения ее компонентов: измерить вращение галактики как целого и отдельных ее подсистем, выяснить движение крупномасштабных потоков звезд и газа, определить орбиты звездных скоплений и так вплоть до орбит отдельных звезд. Характер движения различных частей галактики в совокупности с другими их свойствами (возрастом, химическим составом и пр.) может — мы надеемся — рассказать нам о происхождении и эволюции самой галактики.

7.5.1. Вращение галактик

Вращение — неотъемлемое свойство галактик любого морфологического типа. Поскольку галактика — не сплошное тело, а совокупность отдельных объектов, удерживаемых общим гравитационным полем, ее различные составляющие могут иметь разные скорости вращения даже на одном и том же расстоянии от центра. Термин «скорость вращения» относят, как правило, к самым быстро вращающимся компонентам галактик — к их дискам. Звезды и газ, образующие диск, движутся вокруг центра масс галактики по орбитам, близким к круговым с характерным периодом от нескольких десятков до нескольких сотен миллионов лет. Отклонения от круговых движений вращающихся дисков обычно связаны со структурными деталями галактик: наличием бара или спиральных ветвей, либо же (в случае газа) — с областями интенсивного звездообразования. Сильные некруговые движения газа и звезд часто имеют место во взаимодействующих и взаимно проникающих галактиках.

Отдельные звезды, звездные скопления и газовые облака непрерывно движутся в галактике, причем каждый объект описывает сложную незамкнутую траекторию вокруг центра масс галактики. Но непосредственно измерить перемещение звезд или облаков газа невозможно. Определение скорости движения различных объектов основано на эффекте Доплера и производится по измерениям сдвига линий в их спектрах. Для звезд это линии поглощения, для облаков ионизованного газа — оптические линии излучения. Для облаков холодного газа, не излучающего свет, используются радиолинии атомов водорода.

да (21 см) или молекулярных соединений, прежде всего молекулы CO (поскольку у гораздо более распространенной молекулы H_2 нет линий в радиодиапазоне). Большинство радиотелескопов лежит в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Разумеется, доплеровские измерения дают лишь величину проекции скорости на луч зрения, а восстановление полного вектора скорости требует определенных предположений о характере движения объектов, например о наклоне диска к лучу зрения (на практике его часто измеряют по видимой сплюснутости диска).

Оценка скоростей газа и звезд в галактиках имеет одну особенность: объекты, скорости которых определяются, обычно не видны по отдельности, так что измерения дают некоторые средние значения скоростей в данном месте галактики. При этом каждая звезда или облако газа может иметь скорость, заметно отличающуюся от средней. Поэтому часто говорят не о скорости отдельных объектов, а о скорости газа или звезд данного типа в определенной области галактики. Скорости движения газа и звезд составляют от нескольких десятков километров в секунду в карликовых галактиках до 200–300 км/с (в редких случаях — до 400 км/с) в гигантских спиральных галактиках. Эллиптические галактики, не обладающие заметными звездными дисками, вращаются очень медленно (десятки км/с), несмотря на то, что средние скорости движения образующих их звезд обычно на порядок выше. Измерения скоростей вращения галактик (у дисковых систем) и дисперсии скоростей их звезд (у эллиптических систем) дают возможность оценки их полной массы, а также массы их отдельных составляющих, в том числе темного гало.

Галактики вращаются не как твердые тела: орбитальный период (T) объектов возрастает с увеличением расстояния (R) от центра вращения, т. е. центра масс галактики, следовательно, угловая скорость обращения вокруг центра (Ω) уменьшается с расстоянием. Но линейная скорость ($V = \Omega R = 2\pi R/T$) ведет себя более сложно. Зависимость скорости вращения от расстояния от центра галактики называют *кривой вращения*. Разумеется, у каждой подсистемы (диск, балдж, гало...) своя кривая вращения: чем подсистема более плоская, тем скорость ее вращения на данном R ближе к скорости кругового движения $V_c(R)$, т. е. к скорости движения частицы по круговой орбите радиуса R . Знание $V_c(R)$ очень важно, поскольку позволяет вычислить распределение массы в галактике. Например, в простейшем случае сферически симметричного распределения массы круговая скорость — это фактически первая космическая скорость, зависящая только от мас-

сы внутри орбиты: $V_c^2(R) = GM(R)/R$. В этом случае распределение массы в галактике прямо следует из ее кривой круговой скорости: $M(R) = RV_c^2(R)/G$. Но следует помнить, что прямо измерить $V_c(R)$ невозможно: для этого необходимо было бы измерить скорости объектов, движущихся на разных R по строго круговым орбитам.

На практике вместо $V_c(R)$ обычно используют кривую вращения диска, поскольку это самая плоская подсистема галактики, объекты которой (молодые звезды, газовые облака) движутся по почти круговым орбитам в среднем с почти круговой скоростью; к тому же кривая вращения диска легче всего измеряется из-за наличия в нем газа и ярких звезд. Но при этом нельзя забывать, что в области центра галактики наблюдаемая кривая вращения диска существенно отличается от $V_c(R)$. Эффекты проекции, ограниченного углового разрешения телескопа и возрастающего вклада балджа в поверхностную яркость галактического ядра приводят к тому, что наблюдаемая $V(R) \rightarrow 0$, тогда как круговая скорость $V_c(R)$ с приближением к центру галактики нередко возрастает (иногда — очень сильно, если в центре галактики находится сверхмассивная черная дыра).

Если исключить область вблизи центра галактики, то по мере удаления от него наблюдаемая скорость вращения обычно возрастает («кривая вращения растет») и достигает максимального значения, как правило, на расстоянии нескольких килопарсеков, после чего мало меняется с удалением от центра. Встречаются и более сложные случаи. Например, в некоторых массивных галактиках наблюдается динамически обособленный и быстро вращающийся околоядерный звездно-газовый диск радиусом в несколько сотен парсеков. Плоскость таких дисков часто не совпадает с плоскостью основного диска.

Максимальные скорости вращения галактик в большинстве случаев заключены в пределах 20–100 км/с для карликовых неправильных галактик и 200–400 км/с для спиральных галактик-гигантов. В отдельных случаях значения скоростей выходят за указанные пределы. В среднем максимальная скорость вращения тем больше, чем выше светимость галактики или масса ее диска. Найденную из наблюдений среднюю зависимость между максимальной скоростью вращения и светимостью спиральных галактик называют зависимостью Талли—Фишера (Tully—Fisher relation). Близкую по физическому смыслу зависимость между светимостью и центральной дисперсией скоростей звезд эллиптических галактик называют зависимостью Фабера—Джексона (Faber—Jackson relation).

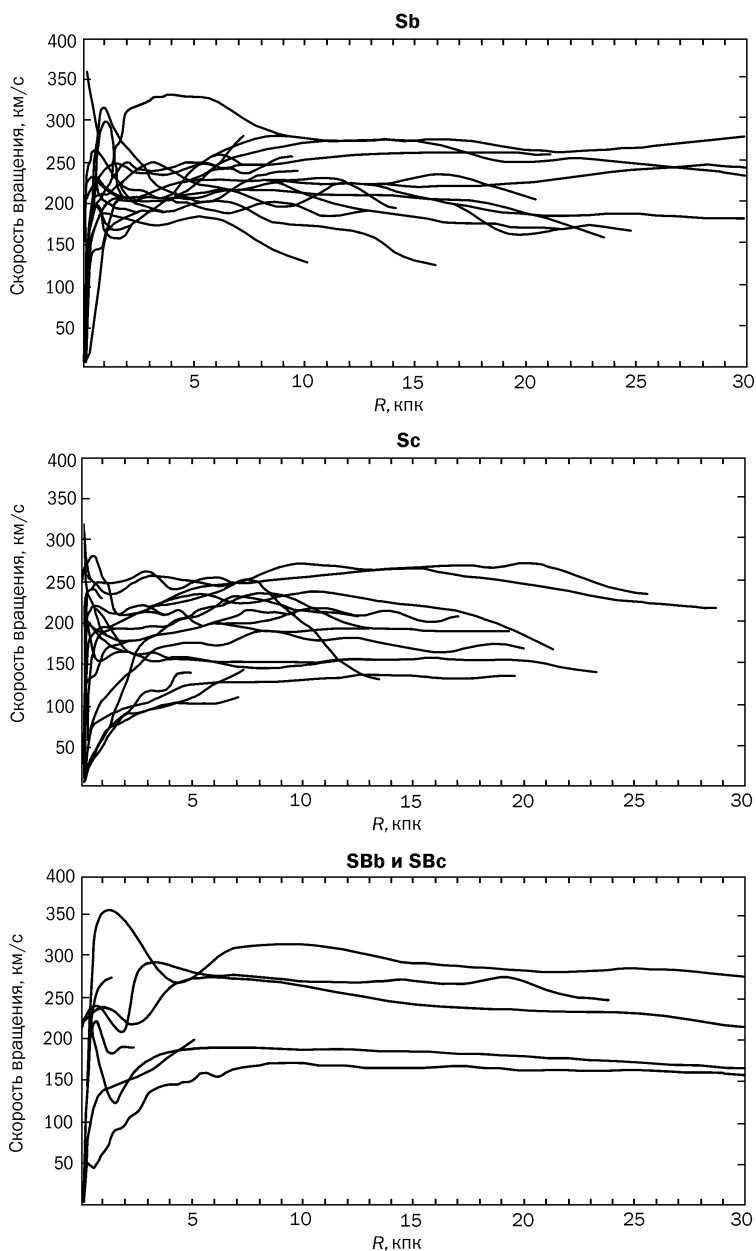


Рис. 7.30. Кривые вращения спиральных галактик различного типа (по Софю и др., 2001)

Поскольку измеренное значение круговой скорости или дисперсии скоростей не зависит от расстояния до галактики, а видимый блеск зависит от расстояния и светимости, зависимости Талли—Фишера и Фабера—Джексона используют для определения или уточнения расстояния до галактик, а также для сравнения фотометрических и динамических свойств различных галактик.

Направления осей вращения галактических дисков могут различаться даже у близких друг к другу галактик. От характера вращения галактики зависит форма и ориентация спиральных ветвей в ее диске. За редкими исключениями направление вращения галактики таково, что концы спиральных ветвей обращены «назад» (закручивающиеся ветви).

Суммируем основные характеристики вращения галактик.

Спиральные галактики. Различные компоненты дисковых галактик имеют разные скорости вращения. Медленнее всего вращается звездный балдж и звездное гало: их скорости вращения почти такие же небольшие, как у эллиптических галактик. Звезды и газ в галактическом диске вращаются быстрее, потому что скорости всех объектов диска более упорядочены: они движутся преимущественно в одном направлении. Наибольшей упорядоченностью отличаются скорости облаков газа и молодых звезд. Их орбиты в диске галактики близки к круговым, поэтому скорости этих объектов часто называют скоростями кругового вращения, или круговыми скоростями.

Характерный вид кривых вращения спиральных галактик показан на рис. 7.30. Спиральные ветви могут вызывать заметные отклонения скоростей вращения от круговой скорости, но амплитуда этих отклонений обычно невелика и, как правило, не превосходит 20–30 км/с. Значительно более существенные отклонения скорости от круговой наблюдаются во взаимодействующих галактиках, а также в локальных областях звездообразования, где воздействие массивных звезд на газ вызывает нагрев и расширение межзвездной среды.

Эллиптические галактики. Скорости звезд в них тем больше, чем массивнее галактика, но скорости соседних звезд, как правило, имеют различное направление, так что среднее значение скорости в каждом локальном объеме галактики оказывается небольшим. Поэтому даже при высоких скоростях движения звезд вращение галактики как целого довольно медленное — несколько десятков километров в секунду. Любопытно, что степень сжатия галактики, вопреки ожиданиям, оказалась не связанной со скоростью ее вращения: медленно вра-

щающаяся галактика может иметь как шарообразную, так и сплюснутую форму.

Неправильные галактики. Это медленно вращающиеся системы. Как и в дисках спиральных галактик, скорости вращения газа и звезд в них близки к круговым. В отличие от эллиптических галактик, низкая скорость вращения неправильных галактик — следствие их малой массы.

7.5.2. Гиперскоростные звезды

При изучении кинематики Галактики в последние годы обнаружен новый феномен — гиперскоростные звезды (hypervelocity stars, HVSs). Речь идет о звездах, движущихся с огромной скоростью, порядка 1000 км/с. Это существенно больше второй космической скорости, т. е. скорости убегания из любой области Галактики. Даже в центре Галактики она составляет около 600 км/с, а в районе орбиты Солнца снижается примерно до 450 км/с. Если же учесть, что гиперскоростная звезда на такой огромной скорости практически не испытывает гравитационного рассеивания на других звездах (раздел 3.9), то ясно, что этот «снаряд» не может задержаться в Галактике и способен лишь однократно пересечь ее и покинуть. Некоторые исследователи считают, что гиперскоростные звезды влетели в Галактику со стороны вместе с поглощенными ею галактиками-спутниками, другие полагают, что они выбрасываются из центра Галактики в результате взаимодействия со сверхмассивной центральной черной дырой.

Впервые на возможность существования таких звезд обратил внимание американский теоретик Джек Хиллс (J. G. Hills) в 1988 г. Простые физические соображения указывают, а компьютерные модели подтверждают, что сверхскоростные звезды должны быть естественным результатом слишком тесного прохода двойной звездной системы близ массивной черной дыры. Именно такая черная дыра массой около $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ расположена в центре нашей галактики. Когда двойная звезда оказывается вблизи массивной черной дыры, мощная гравитация дыры может разорвать двойную систему. При этом черная дыра захватывает одну из звезд, а вторую выбрасывает с огромной скоростью наружу. Чем более тесной была двойная система, тем эффективнее работает этот механизм.

Первую гиперскоростную звезду обнаружили в 2005 г. с помощью Многозеркального телескопа MMT в Аризоне. Это звезда SDSS J090745.0+024507 спектрального класса B9, удаленная от нас на 71 клк и летящая сквозь гало Галактики со скоростью 850 км/с, что вдвое

больше скорости отрыва, минимально необходимой для вылета из той области Галактики во внегалактическое пространство. Открытие этой звезды так ошеломило астрономов, что ей даже дали прозвище «Outcast star» — изгнанная, отвергнутая звезда. Затем европейские астрономы открыли еще две подобные звезды, одна из которых, как сначала казалось, вылетела из соседней галактики Большое Магелланово Облако; но дальнейшие исследования этого не подтвердили. Следом были открыты еще два таких же объекта: одна звезда удалена от нас на 74 кпк и движется от центра Галактики со скоростью около 556 км/с, а другая удалена на 55 кпк и летит со скоростью 639 км/с. Всего к 2012 г. было обнаружено около двух десятков гиперскоростных звезд, большинство из которых — по результатам обзора SDSS.

Хотя о происхождении гиперскоростных звезд единого мнения пока нет, появляется все больше аргументов за то, что они вылетели из самого сердца Галактики, из области радиусом всего 0,04 пк вокруг массивной черной дыры. В более обширной области радиусом около 0,5 пк вокруг черной дыры, кроме множества старых звезд (из них видны лишь красные гиганты), обнаружено также более сотни молодых массивных звезд спектральных классов O, B и Вольфа—Райе. Вероятно, эти молодые звезды сформировались несколько миллионов лет назад в едином событии звездообразования. Двигутся они довольно регулярно, по кругу, одни звезды — по часовой стрелке, другие — против, демонстрируя этим, что сформировались они в окрестностях газовой диска (или двух дисках). Но ближе к центру, в области радиусом 0,04 пк, замечены только B-звезды главной последовательности (их обозначения начинаются с буквы S, от *source* — источник), причем характер их движения совсем иной: они движутся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, проходя в опасной близости от черной дыры. По мнению исследователей, эта картина согласуется с идеей о том, что молодые двойные звезды могли мигрировать к центру диска или же быть вытолкнуты туда в результате сближений с другими звездами и таким образом, сблизившись с черной дырой, могли быть разорваны приливным эффектом ее гравитационного поля. После распада двойной звезды один ее компонент должен притормозиться и перейти на вытянутую эллиптическую орбиту вокруг черной дыры, а второй компонент — с большой скоростью покинуть ядро Галактики. С этими ускорившимися вторыми компонентами и связывают появление гиперскоростных звезд.

Исследования гиперскоростных звезд только начинаются, и пока в отношении них многое неясно. Например, как столь массивные звезды

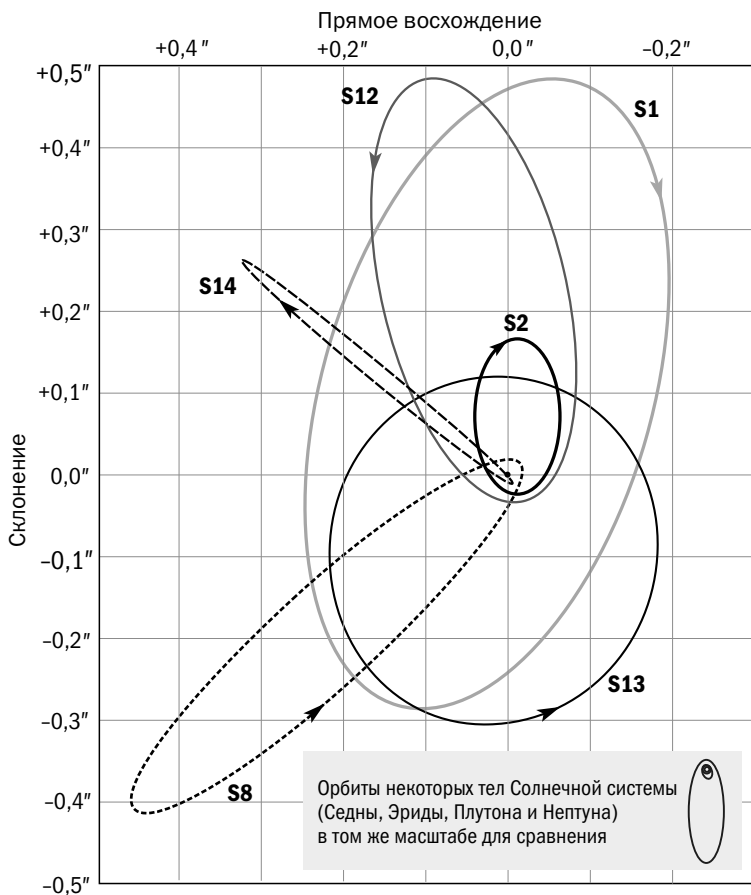


Рис. 7.31. Траектории некоторых звезд вокруг массивной черной дыры в ядре Галактики, прослеженные с 1992 по 2012 гг.

успели преодолеть расстояние во многие десятки килопарсеков за относительно короткое время своей жизни? Массы В-звезд — от $3,5$ до $15 M_{\odot}$ и живут они от 15 до 220 млн лет. А как мы помним, $1 \text{ км/с} \approx 1 \text{ млн лет} \approx 1 \text{ пк}$. Следовательно, $500 \text{ км/с} \approx 100 \text{ млн лет} \approx 50 \text{ кпк}$. Таким образом, звезда класса В8–В9 (масса около $3,5 M_{\odot}$, как у большинства гиперскоростных звезд), вылетев в ранней молодости из ядра Галактики со скоростью около 1000 км/с , успевает уйти за пределы Галактики. Звезда класса В5 (масса $5,5 M_{\odot}$, время жизни 80 млн лет) успевает уйти далеко в гало, но звезда класса В3 (масса $8 M_{\odot}$, время жизни 35 млн лет) не успевает. В связи с этим особый интерес вызывает гиперскоростная звезда HE 0437-5439, имеющая массу $8\text{--}9 M_{\odot}$ и время жизни около

30 млн лет. Ее скорость относительно центра Галактики 560 км/с, а расстояние 62 кпк. Но за время жизни она не могла пройти более 17 кпк! Поэтому специально для нее пришлось изобретать весьма изощренный сценарий, согласно которому вблизи центральной черной дыры была разорвана тройная звездная система, состоявшая из очень плотной двойной звезды и более удаленной одиночной. Черная дыра оставила при себе одиночную звезду и «выстрелила» в гало тесную двойную, которая по пути сравнительно недавно слилась в массивную одиночную. В принципе это возможно, но выглядит как-то уж очень искусственно. Хотелось бы найти иное объяснение этому феномену, ведь природа так изобретательна!

По оценкам теоретиков, гиперскоростные звезды должны выбрасываться из центра Галактики в среднем раз в 10–20 тыс. лет. Постоянно в объеме Галактики должно быть несколько тысяч гиперскоростных звезд, однако обнаружить их на фоне 100 миллиардов «медленных» звезд Галактики не так просто. Тем не менее эти поиски продолжаются, поскольку звезды, вылетевшие из окрестностей центральной черной дыры, могут кое-что рассказать нам о ней, а также могут оказаться полезными реперами для изучения темного гало Галактики.

7.6. Темная материя

Эту тему мы уже затрагивали в разделах 3.8, 3.15 и 6.3. Но проблема темной материи настолько важна и актуальна, что ее следует обсудить подробнее. Ведь даже специалисты, уверенные в существовании темной материи, не могут сказать ничего определенного о физической природе этого вещества, да и уверены в его существовании отнюдь не все. А в науке, как известно, *extraordinary claims require extraordinary proofs* (необычные заявления требуют сверхнадежных доказательств). Темная материя настолько не вписывается в существующую физическую теорию, что прежде чем настаивать на пересмотре теории, астрономы обязаны окончательно убедиться в существовании этого необычного вещества.

7.6.1. Загадочная субстанция

Загадка невидимой массы галактик — одна из самых волнующих в астрономии. Много замечательных открытий было сделано астрономами в XX и XXI вв., но где и в форме каких объектов скрывается невидимая масса галактик, выяснить пока не удалось. В разное время разные авторы по-разному называли эту загадочную субстанцию: скрытая масса (*missing mass*), невидимая масса, темное вещество, темная

материя (dark matter). Гипотеза о существовании темной материи позволяет теоретикам решить несколько важных космологических проблем, связанных с первичным нуклеосинтезом, формированием крупномасштабной структуры и самих галактик. Но пока не найдены носители этого загадочного вещества, темная материя останется гипотезой. Для астрономов, изучающих галактики и их скопления, проблема темного вещества стоит несколько уже: они хотят понять, в чем причина расхождения в массах звездных систем, измеренных разными методами.

Грубо говоря, массу звездной системы можно измерить двумя путями: либо подсчитав сумму масс всех входящих в эту систему объектов, либо вычислив силу притяжения этой системой окружающих ее тел. Первый путь реализуется путем суммирования масс всех наблюдаемых в галактике звезд (исходя из их суммарной светимости) и облаков межзвездного газа с учетом и тех остатков эволюции звезд, которые уже остыли и стали почти невидимыми. Второй путь заключается в наблюдении за движением далеких спутников галактики — звезд и звездных скоплений, которые «чувствуют» притяжение галактики как целого и подчиняются в своем движении ее общему гравитационному полю. Массу, вычисленную первым путем, называют *наблюдаемой*, а вторым — *динамической*. Разность этих двух величин (динамическая масса минус наблюдаемая масса) как раз и называют скрытой массой, или невидимой массой, или темным веществом, или темной материей.

Как показывают наблюдения, невидимая масса есть почти в каждой галактике. Присутствие этой скрытой массы чувствуется даже в небольших звездных системах — карликовых галактиках. Измерения показали, что в центральных ярких областях галактик невидимой массы очень мало: практически все притяжение этих областей можно связать с обычными звездами. Но чем дальше от центра галактики, тем больше доля невидимой массы. Например, в нашей Галактике в области солнечной орбиты (ее радиус около 8 кпк) приблизительно треть массы невидима. А дальше от центра Галактики невидимая масса начинает доминировать: звезд и газа там почти не видно, а источник тяготения присутствует, да еще какой! Динамическая масса Галактики в радиусе 45 кпк в несколько раз больше, чем масса внутренней, видимой ее части радиусом около 15 кпк. Из чего же состоит невидимое гало Галактики? В какие объекты «расфасована» эта загадочная масса? В принципе это может быть что угодно — от гигантских черных дыр с массами в миллионы масс Солнца до мельчайших субъ-

ядерных частиц неизвестного сорта (типа нейтрино, но более массивных), которые практически не взаимодействуют с обычным веществом, кроме как через гравитационное поле. Как определить массу отдельных невидимых объектов? Далее мы обсудим эти вопросы.

7.6.2. Темная материя в окрестности Солнца

Речь идет о так называемой «локальной темной материи», сосредоточенной вблизи плоскости Галактики в районе Солнца. Первое исследование на эту тему выполнил замечательный эстонский астроном Эрнст Эпик (1893–1985). В 1915 г., будучи студентом Московского университета, он опубликовал работу, в которой предложил метод определения плотности вещества вблизи плоскости Галактики по вертикальным движениям звезд относительно этой плоскости: это позволяет найти полное количество гравитирующей материи, независимо от того, светится она или нет. Звезды движутся относительно плоскости симметрии вверх-вниз. Чем больше вертикальная скорость, тем выше звезда может подняться над плоскостью Галактики; чем сильнее гравитация, тем меньше размах колебаний звезды. Измерение скоростей звезд и их расстояний от плоскости Галактики позволяет определить силу гравитационного поля и на основе этого вычислить плотность вещества в плоскости Галактики. Изучая доступные в ту пору данные, Эпик нашел, что плотность вещества вблизи галактической плоскости вполне согласуется с известным количеством звезд. Отсюда он сделал вывод, что в Галактике не может быть большого количества темной материи: в противном случае ее влияние на вертикальные движения звезд было бы заметным.

Этот вывод на долгие годы стал «визитной карточкой» эстонских астрономов. В Тартуской обсерватории сложилась сильная группа звездных динамиков: ученик Эпики Григорий Кузмин и его сотрудники — Хейно Элсал, Михкель Йыэвээр, Яан Эйнасто и др. На высоком научном уровне они неизменно подтверждали вывод Эпики об отсутствии сколько-нибудь заметного количества невидимого вещества в окрестности Солнца. Этот вывод резко расходился с мнением московских астрономов (школа П. П. Паренаго в МГУ) и мнением западных специалистов.

В Европе этой проблемой первым занялся голландский астроном Ян Оорт. В опубликованной в 1932 г. работе он нашел, что известных звезд недостаточно для объяснения вертикального ускорения звезд в Галактике, вследствие чего приходится предположить наличие темной материи вблизи галактической плоскости. В 1956 г. работающий

в США голландский астроном Мартин Шмидт (рис. 9.8) опубликовал работу, в которой предложил новую модель Галактики. Она, как и ранее разработанные в Голландии модели, представляла Галактику набором из множества эллипсоидов равной плотности. Но, в отличие от прежних моделей, Шмидт попытался представить реальные звездные популяции и уточнил значения основных параметров. Его модель получила очень широкое признание астрономического сообщества. В ней приводилась также новая оценка плотности вещества в окрестности Солнца. Шмидт нашел, что плотность вещества заметно превосходит ту величину, которая следует из плотности звездного населения. Иными словами, согласно его оценке, в плоскости Галактики имеется значительное количество темной материи. К такому же выводу через пару лет пришел и Ян Оорт, приняв в расчет открытое к тому времени межзвездное вещество (в основном нейтральный водород, наблюдаемый в радиолинии 21 см). Даже с учетом межзвездной среды Оорт констатировал заметное количество массы, не видимой ни в оптике, ни в радиодиапазоне.

Результат голландцев примерно в два раза отличался от значения, найденного тартускими астрономами. Для объяснения возможных причин этого Кузмин заново проанализировал свой материал и тщательно сравнил результат с результатами других авторов. Он также порекомендовал своим ученикам Хейно Элсалу и Михкелю Ййэвзеру заново определить плотность на основе нового наблюдательного материала и по иной методике. Результаты Элсалу были готовы в 1959 г., Ййэвзер опубликовал свои результаты в 1972–1974 гг. Как новый анализ самого Кузмина, так и результаты Элсалу и Ййэвзера подтвердили ранние выводы Кузмина: в окрестности Солнца количество темной материи пренебрежимо мало.

В 1980-е гг. проблемой локального темного вещества в Галактике занимался один из ведущих американских астрономов Джон Бакол. Он разработал модель, которая во многих отношениях напоминает

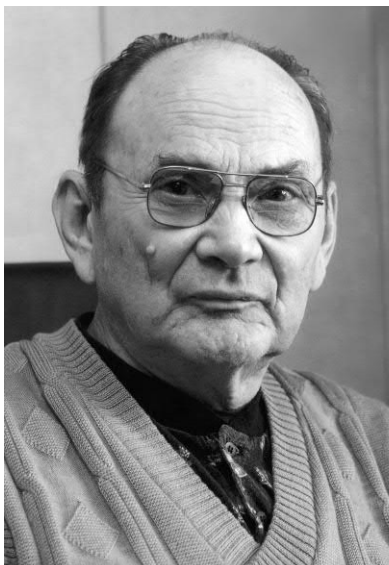


Рис. 7.32. Ян Эйнасто.

модель Шмидта. Бакол уделил большое внимание определению плотности вещества в окрестности Солнца. Согласно его данным, плотность темной материи сопоставима с плотностью обычного вещества; иными словами, полная плотность материи примерно вдвое превосходит плотность обычного вещества.

Кто же оказался прав: голландцы и американцы, считавшие, что в окрестности Солнца темной материи столько же, сколько наблюдаемой, или эстонцы, полагавшие, что весь гравитационный потенциал обеспечивается наблюдаемым веществом и для темной материи не остается места? Выяснилось, что правы были и те, и другие: все дело оказалось в том, какого размера солнечную окрестность мы рассматриваем. Если ограничиться *локальной* окрестностью Солнца размером несколько сотен парсеков и содержащей достаточно много звезд для надежных статистических оценок, то фактически мы будем исследовать самую плотную часть галактического диска — его экваториальную плоскость, вблизи которой сейчас находится Солнце. Распределение вещества в этой области показывает табл. 7.8. Объемная плотность и объемная светимость даны в ней для экваториальной плоскости галактического диска, а поверхностная плотность и поверхностная светимость — для слоя толщиной $\pm 1,1$ кпк от экваториальной плоскости (включающего вещество как диска, так и гало). Светимость дана в полосе R. Видимые звезды — это все звезды главной последовательности и гиганты. Остатки звезд — это белые карлики и нейтронные звезды. Межзвездная среда включает ионизованный, нейтральный и молекулярный газ, а также пыль.

Как видим, пространственная (объемная) плотность обычного вещества вблизи экваториальной плоскости настолько высока, что в пределах точности измерений для темной материи там не остается места. То есть намек на присутствие темной материи заметить можно: суммарная плотность всех видов наблюдаемого вещества, а также труднонаблюдаемых остатков звездной эволюции (остывшие белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры) составляет $0,09 M_{\odot}/\text{пк}^3$, тогда как динамическая оценка полной плотности вещества по его гравитационному влиянию на движение звезд равна $0,10 M_{\odot}/\text{пк}^3$. Однако разница между ними в $0,01 M_{\odot}/\text{пк}^3$ не превосходит ошибки измерений.

Но совсем иную картину мы получим, если рассмотрим *широкую* окрестность Солнца размером около 1 килопарсека. Эта область охватывает полную толщину диска Галактики, поэтому удобнее говорить не об объемной плотности вещества, которая быстро уменьшается с

Таблица 7.8

Состав окрестностей Солнца (Binney, Tremaine, 2008)

Компонент диска	Объемная плотность, $M_{\odot}/\text{пк}^3$	Поверхностная плотность, $M_{\odot}/\text{пк}^2$	Объемная светимость, $L_{\odot}/\text{пк}^3$	Поверхностная светимость, $L_{\odot}/\text{пк}^2$
Видимые звезды	0,033	29	0,05	29
Остатки звезд	0,006	5	0	0
Коричневые карлики	0,002	2	0	0
Межзвездная среда	0,050	13	0	0
Всего	$0,09 \pm 0,01$	49 ± 6	0,05	29
Динамическая оценка	$0,10 \pm 0,01$	74 ± 6	—	—

удалением от галактической плоскости, а о поверхностной плотности диска в проекции на его плоскость. Как видим (табл. 7.8), суммарная плотность наблюдаемого вещества ($49 M_{\odot}/\text{пк}^2$) в полтора раза меньше динамической плотности ($74 M_{\odot}/\text{пк}^2$), и это различие существенно превышает ошибки измерения. Таким образом, диск Галактики на расстоянии солнечной орбиты от его центра в целом на $1/3$ состоит из темной материи, которая распределена в этой области диска значительно однороднее видимого вещества и поэтому заметнее проявляет себя на большом расстоянии от галактической плоскости.

Полученные выше результаты для локальной и широкой окрестностей Солнца согласуются друг с другом. Если предположить, что разность поверхностных плотностей ($74 - 49 = 25 \pm 8 M_{\odot}/\text{пк}^2$) полностью обусловлена темной материей и что эта материя однородно распределена в галактическом диске толщиной 2 кпк, то ее пространственная плотность составляет $25/2000 = 0,0125 M_{\odot}/\text{пк}^3$. Это в точности равно формальной разнице между динамической и наблюдаемой массами в плоскости Галактики ($0,01 M_{\odot}/\text{пк}^3$), хотя не следует забывать о низкой статистической значимости этого числа.

Измерения локальной плотности Галактики сейчас продолжают. Разные звездодинамические школы пока не пришли к согласию. Нынешний глава эстонских астрономов Яан Эйнасто считает, что проблема локальной плотности темной материи остается актуальной по сей день. Таково же мнение крупнейших специалистов по динамике Галактики (Gilmore et al, 1990; Bertin, 2000). И для этого есть основания. Взять хотя бы недавнее исследование чилийских астрономов (Moni Bidin et al, 2012), изучивших движение 400 звезд в широких окрестностях Солнца на расстояниях от 1,5 до 4 кпк от галактической плоскости. Их вывод — темной материи практически нет! Получен-

ная ими плотность скрытой массы в непосредственной окрестности Солнца формально составила $(0 \pm 1) \text{ мМ}_\odot/\text{пк}^3$. (Пусть вас не удивляет эта непривычная единица измерения: $\text{мМ}_\odot$ — это «милли-масса Солнца», т. е. $10^{-3} \text{ М}_\odot = 2 \cdot 10^{27} \text{ кг}$.) Для широкой публики авторы этого исследования выразили свой результат наглядно: ранее считалось, что в окрестности Солнца содержится от 0,4 до 1,0 кг темной материи в объеме пространства размером с Землю; новые данные говорят, что в объеме нашей планеты содержится $(0,00 \pm 0,07) \text{ кг}$ темной материи. Если это исследование получит одобрение коллег-астрономов, то окажется, что возросшая за несколько лет в 10 раз точность измерений (с 0,01 до $0,001 \text{ М}_\odot/\text{пк}^3$) вновь обострила проблему скрытой массы в окрестности Солнца.

7.6.3. Темная материя в гало Галактики

Первые указания на наличие вокруг галактик обширной и очень массивной, но при этом абсолютно темной периферической области было получено астрономами Тартуской обсерватории в 1970-е гг. Эстонские астрономы строили математические модели пространственного распределения и движения звезд в крупных галактиках, таких как наша или Туманность Андромеды. Оказалось, что если ограничиться только звездами, то самосогласованную модель галактики построить не удастся. Яркость галактики быстро уменьшается от центра к периферии диска. Если так же быстро уменьшается и пространственная плотность всех звезд, включая слабосветящиеся, а других носителей массы в галактике нет, то вблизи края диска скорости звезд должны быстро уменьшаться с удалением от центра, почти так же быстро, как в Солнечной системе уменьшаются орбитальные скорости планет с удалением от Солнца, в котором сосредоточена практически вся масса.

Планеты движутся по почти круговым орбитам, а значит, с первой космической скоростью: $V = (GM_\odot/R)^{1/2}$. Поэтому в Солнечной системе (табл. 7.9) скорости планет уменьшаются по «закону Кеплера»: $V \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$. Такая же зависимость ожидалась и на краю галактических дисков, но наблюдения за движением звезд и облаков межзвездного газа показали, что ожидания не оправдываются — скорость движения с удалением от центра галактики, как правило, не уменьшается (рис. 7.33, а также 6.8, 6.9 и 6.11).

Следовательно, за пределами светлого звездного тела галактики есть невидимая масса, распределенная более или менее сферически

Таблица 7.9

Средние скорости орбитального движения и среднее расстояние планет от Солнца

Параметр	Мер- курий	Венера	Земля	Марс	Юпи- тер	Сатурн	Уран	Неп- тун
Скорость, км/с	47,9	35,0	29,8	24,1	13,1	9,6	6,8	5,4
Расстояние, а. е.	0,39	0,72	1,00	1,52	5,2	9,6	19,2	30,0

симметрично относительно центра галактики. В этом случае ее влияние на движение *внутренних* звезд диска неощутимо мало (теорема Ньютона об отсутствии гравитационного ускорения внутри однородной сферы), но далекие звезды ощущают притяжение этой массы в полной мере и вынуждены двигаться быстро, чтобы центробежная сила уравновешивала это притяжение. Пытаясь согласовать наблюдения и теорию, эстонские астрономы вынуждены были ввести в свои модели темное массивное гало. Яан Эйнасто предложил называть его *коронай* галактики, и этот термин сейчас используется как синоним «темного гало».

В 1973 г. американские астрономы Джерри Острайкер и Джим Пиблз опубликовали теоретическое исследование, в котором предсказали наличие массивных гало вокруг галактик. Их аргументы основывались на существовании тонких галактических дисков, движение которых было бы неустойчивым, если бы они не были погружены внутрь массивного гало, которое своим тяготением стабилизирует движение звезд в диске.

Первые результаты точных расчетов эстонских астрономов, в проведении которых участвовали Энн Саар и Антс Каазик, появились 11 января 1974 г. Они обнаружили, что двойные галактики действительно движутся так, как ожидалось бы в случае, если они окружены темными коронами. Данные по двойным галактикам показали, что массы и радиусы корон превышают массы и радиусы видимых популяций примерно в 10 раз. Результаты этой работы были опубликованы в журнале *Nature* и с того момента считаются классическими. Через пару месяцев Острайкер, Пиблз и Яхил опубликовали свои результаты, которые практически совпали с эстонскими. А еще пару месяцев спустя появилась третья статья, где корифей астрофизики Джеффри Бербидж выдвинул ряд сомнений относительно этих работ. Бербидж указывал на сделанное в них неявное предположение о том, что в случае двойных галактик мы имеем дело с физическими парами, то есть с близкими объектами, связанными между собой силой взаимного притяжения. Если же допустить, что компоненты двойных

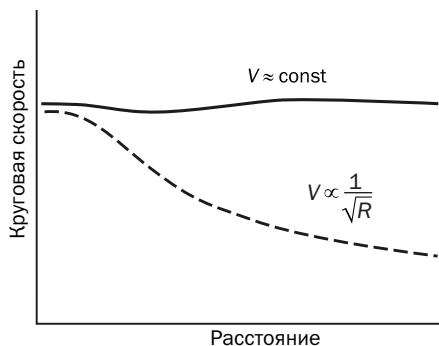


Рис. 7.33. Скорость орбитального движения звезд в диске галактики почти не меняется с удалением от центра, тогда как в отсутствие темной материи она должна на периферии уменьшаться как $1/\sqrt{R}$.

использовали очень чувствительный детектор, который позволил измерять галактические спектры в очень слабых периферийных областях галактик. Рубин начала измерения в 1975 г. Ей удалось зафиксировать спектры большинства ярких галактик и измерить скорости вращения до гораздо больших расстояний от центра, чем раньше. Ее измерения показали, что кривые вращения почти всех галактик являются плоскими, т. е. что линейная скорость вращения вокруг центра галактики (V) не меняется с расстоянием от него (R). А поскольку этими величинами определяется центростремительное ускорение (V^2/R), роль которого играет гравитационное ускорение (GM_R/R^2), то оказывается, что масса галактики внутри некоторого радиуса (M_R) увеличивается пропорционально радиусу ($M_R \propto V^2 R \propto R$). Даже за пределами видимого тела галактики эта зависимость сохраняется. Работа Веры Рубин надежно подтвердила, что вокруг галактик имеются темные гало.

Пока общепринятое представление о гало нашей Галактики таково: это квазисферическая область, охватывающая галактический диск и простирающаяся как минимум на 150 кпк от центра Галактики (напомним, что радиус диска Галактики всего около 20 кпк). Различают *звездное гало* (stellar halo) и *темное гало* (dark halo). Звездное гало содержит в себе около 1% звезд Галактики и прослеживается примерно до 50 кпк от ее центра. На больших расстояниях звезды практически не наблюдаются, поскольку их пространственная плотность быстро уменьшается от центра Галактики к ее периферии

галактик встретились лишь случайно и не образуют устойчивых систем, то никаких выводов об их массах делать нельзя. Это несколько охладило энтузиазм защитников темного вещества. Стало ясно, что нужны новые независимые аргументы.

Второй факт в пользу массивного невидимого гало обнаружился при исследовании движения межзвездного газа — атомарного водорода, излучающего в радиолинии длиной 21 см. Американская исследовательница Вера Рубин и ее сотрудники

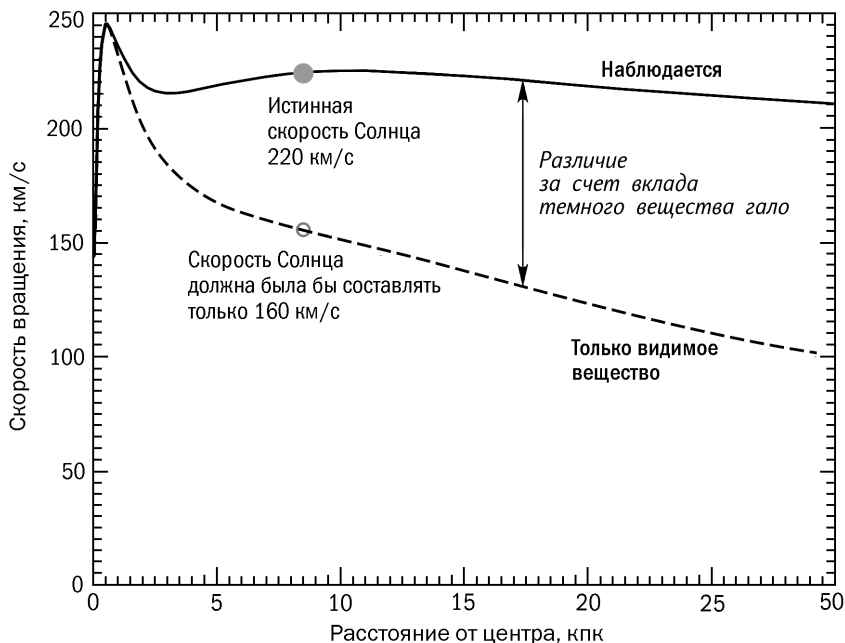


Рис. 7.34. Истинная кривая вращения Галактики существенно отличается от той, которая была бы только при учете гравитации видимого вещества.

($\rho_s \propto R^{-3}$). Темное гало обнаруживается только динамическими методами, т. е. состоит из темной материи. Оно тянется как минимум до 100 кпк от центра Галактики, а возможно, и до 200 кпк и имеет массу $\sim 10^{12} M_\odot$, тогда как масса диска Галактики — около $10^{11} M_\odot$. По сравнению со звездным гало плотность темного гало существенно медленнее падает с удалением от центра ($\rho_d \propto R^{-2}$). Поэтому темная материя доминирует на периферии Галактики и слабее представлена в ее центральной области и даже внутри орбиты Солнца.

При моделировании Галактики ее темное гало обычно представляют в виде усеченной изотермической сферы с распределением плотности $\rho_d \propto (a^2 + R^2)^{-1}$, где постоянный параметр $a \approx 3$ кпк. Если принять для темного гало следующие параметры: $M_d = 10^{12} M_\odot$ и $R = 200$ кпк, то его средняя плотность равна $\langle \rho_d \rangle = 3 \cdot 10^{-5} M_\odot/\text{пк}^3$, а плотность у орбиты Солнца ($R = 8$ кпк) составляет $\rho_{\text{loc}} = 0,006 M_\odot/\text{пк}^3$. Это значение хорошо согласуется с указанным выше традиционным ограничением на локальную плотность темного вещества в окрестности Солнца ($\leq 0,01 M_\odot/\text{пк}^3$), но вступает в противоречие с самыми последними указанными выше оценками ($\leq 0,001 M_\odot/\text{пк}^3$). Может быть,

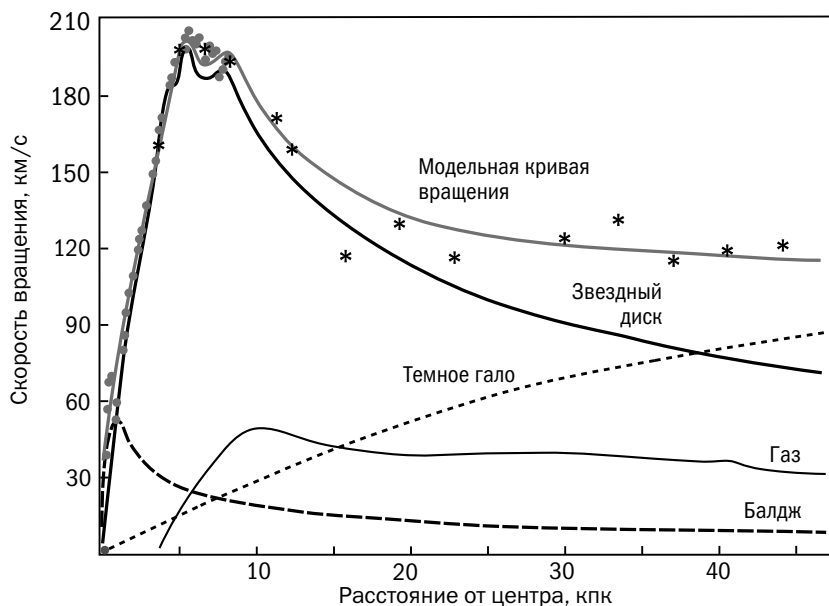


Рис. 7.35. Наблюдаемая кривая вращения спиральной галактики NGC 157 и результат ее моделирования в виде суммы нескольких компонентов. Кружки — оптические наблюдения, звездочки — радионаблюдения в линии водорода 21 см. Оптический радиус галактики менее 15 кпк. Вклад темного гало становится преобладающим только на очень больших расстояниях от центра.

наличие массивного диска как-то меняет распределение плотности темного вещества в окрестности Солнца? Расчеты показывают, что частицы темного гало, имеющие высокую скорость хаотического движения (около 200 км/с), почти не замечают гравитацию диска, и их локальная плотность изменяется незначительно.

Желание астрономов решить эту проблему можно понять: от того, каковы параметры темного гало Галактики, зависит наше представление не только о ее прошлом, но и о будущем. Например, от этого зависит исход возможной встречи Галактики с Туманностью Андромеды. Не менее любопытна и судьба Магеллановых Облаков, которые сейчас мчатся всего в 50 кпк от нас. Будут ли они захвачены Галактикой и сольются с ней или же пролетят мимо, зависит от массы гало. Глобальный подход к этой проблеме заключается в том, чтобы «взвесить» всю Местную группу галактик, а затем разделить найденную массу по отдельным галактикам, например пропорционально их светимости.

Такую работу проделал известный канадский астроном Сидни ван ден Берг (van den Bergh, 1999). Изучив движение членов Местной группы, он определил, что радиус ее сферы нулевой скорости, за пределами которой галактики теряют связь с группой, составляет $(1,18 \pm 0,15)$ Мпк, а вириальная масса $(23 \pm 6) \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Разумеется, основная часть этой массы приходится на долю Туманности Андромеды (50%) и Галактики (37%). Значит, масса Галактики — около $8,5 \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Практически такое же значение массы, по мнению ван ден Берга, дает исследование движения далеких спутников Галактики. С другой стороны, светимость Галактики составляет около $2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$. По данным разных авторов, для населения галактического диска (звезды + газ) в окрестности Солнца характерно отношение массы к светимости в голубой части спектра M/L $(2-5) M_{\odot}/L_{\odot}$. Если принять для Галактики в целом значение $M/L = 3,5$, то масса обычного (барионного) вещества в ней около $7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, что в 12 раз меньше ее полной массы, включающей темное гало.

Впрочем, не все астрономы согласны с расчетами ван ден Берга. По данным Д. И. Макарова (САО РАН, канд. дис., 2000 г.) радиус сферы нулевой скорости Местной группы галактик составляет $(0,96 \pm 0,05)$ Мпк, а ее вириальная масса — $(12 \pm 2) \cdot 10^{11} M_{\odot}$. Если опираться на это исследование, то масса нашей галактики — около $4,4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, а масса ее темного гало вдвое меньше, чем по оценке ван ден Берга. С другой стороны, в недавней работе Пола Макмиллана (McMillan, 2011) полная масса звезд в Галактике составляет $(6,4 \pm 0,6) \cdot 10^{10} M_{\odot}$, а ее динамическая масса — $(12,6 \pm 2,4) \cdot 10^{11} M_{\odot}$; на скрытую массу остается $12 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, что в полтора раза больше, чем у ван ден Берга. Как видим, пока точность «взвешивания» темной материи в Галактике невысока. Можно лишь заключить, что ее масса $\sim 10^{12} M_{\odot}$, а это раз в 20 больше массы обычного вещества.

7.6.4. Темная материя в скоплениях галактик

Проблема недостатка видимой массы (или избытка динамической массы) в галактических системах имеет почти вековую историю. Еще в 1933 г. американский астроном швейцарского происхождения Фриц Цвикки обнаружил, что скопление галактик в созвездии Волосы Вероники (Coma) таит в себе загадку: галактики движутся в нем заметно быстрее, чем это позволяет предположить их суммарная масса, вычисленная на основе светимости их звезд..

Цвикки впервые применил метод, суть которого проста. Если наблюдать за движением двух близких друг к другу галактик вокруг их

общего центра массы, то можно вычислить силу притяжения между ними. Если окажется, что всю эту силу обеспечивает видимое вещество галактик — их звезды и газ, — значит, невидимого вещества в них нет. А если вычисленная сила явно превосходит то, что может дать видимое вещество, значит, в галактиках много невидимой массы. Для таких измерений подходят не только двойные галактики, но и группы галактик, и их крупные скопления. Измеряя среднюю скорость взаимного движения галактик в скоплении, нетрудно вычислить и среднюю силу их взаимного притяжения: чем больше скорость движения, тем больше должна быть и сила, удерживающая галактики в скоплении (см. раздел 3.8). Используя этот метод, Цвикки заключил, что в скоплении имеется еще какая-то темная материя. По данным Цвикки, если рассматривать скопление в целом, то полная масса темной материи превышает массу наблюдаемого вещества в галактиках более чем на порядок. Впервые эта проблема широко обсуждалась в 1961 г. в США на съезде Международного астрономического союза. С новой идеей там выступил армянский астроном В. А. Амбарцумян. Он утверждал, что большая скорость галактик в скоплениях указывает на быстрое расширение скоплений и что существование скоплений в настоящий момент будто бы свидетельствует об их недавнем возникновении. Однако большинство астрономов возражали против этой гипотезы, указывая на свидетельства значительного возраста галактик в скоплениях.

Аналогичный парадокс имеет место для двойных галактик, а также для небольших групп галактик, подобных Местной группе, которую мы уже обсудили. Полная масса Местной группы оценивается в $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$, откуда следует отношение $M/L \approx 40 M_{\odot}/L_{\odot}$, что на порядок выше, чем в окрестности Солнца. Следовательно, 90% массы до сих пор ускользает от исследователей. Дополнительным аргументом в пользу темной материи стало обнаружение горячего ($\sim 10^8$ K) газа, заполняющего скопления галактик. Удержать его там может только гравитация темной материи. Другой важный аргумент — эффект гравитационного линзирования, искажающий изображения галактик, лежащих за скоплениями. Он позволяет оценить полную массу скоплений, которая согласуется с массой, найденной другими методами.

7.6.5. Темная материя и крупномасштабная структура Вселенной

Все космологические модели представляют Вселенную как пространство, однородно заполненное веществом и излучением. Действительно, распределение галактик во Вселенной весьма однородно, но толь-

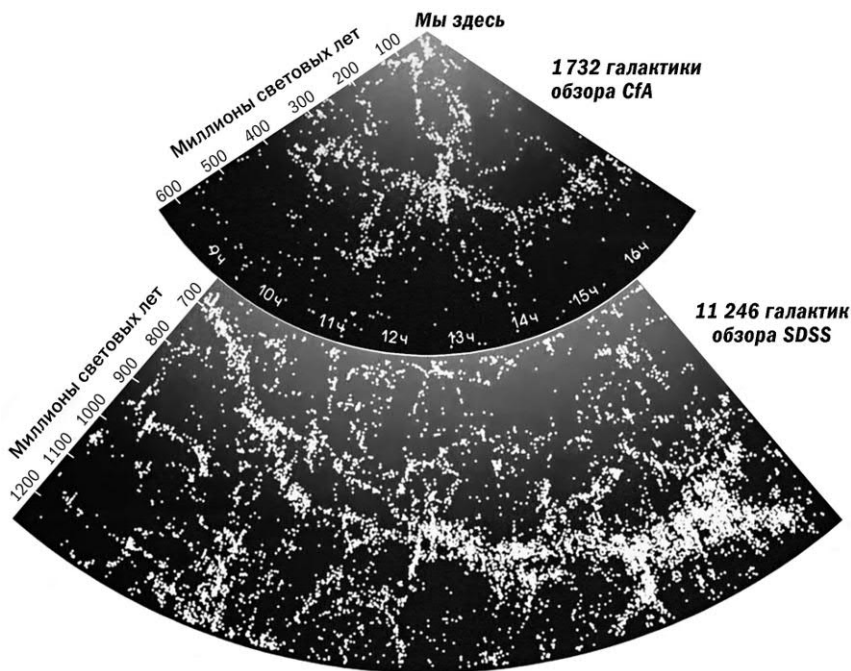


Рис. 7.36. Распределение галактик в тонком слое Вселенной до расстояния 1,25 млрд св. лет, построенное по результатам двух обзоров красных смещений галактик — обзора Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра (CfA) и Слоановского цифрового обзора неба (SDSS). Наша галактика находится в вершине клиновидных карт.

ко если рассматривать гигантские объемы пространства размером в сотни мегапарсеков и крупнее. На более мелких масштабах распределение имеет ячеистый характер, где плотные участки чередуются с пустотами. Крупномасштабная структура Вселенной напоминает мыльную пену или пчелиные соты, только она более размытая, без определенного четкого рисунка. Диаметры ячеек достигают примерно 100 Мпк. Стенки ячеек образованы сверхскоплениями галактик, а внутри ячеек галактик почти нет. На пересечении стенок плотность вещества повышена; эти одномерные уплотнения — нити — образуют в пространстве структуру, подобную мочалке из запутанной металлической проволоки. На пересечениях нитей наблюдаются узлы — наиболее крупные сверхскопления галактик.

Даже в масштабе миллиарда световых лет (примерно 300 Мпк) распределение вещества во Вселенной не совсем однородно: видны

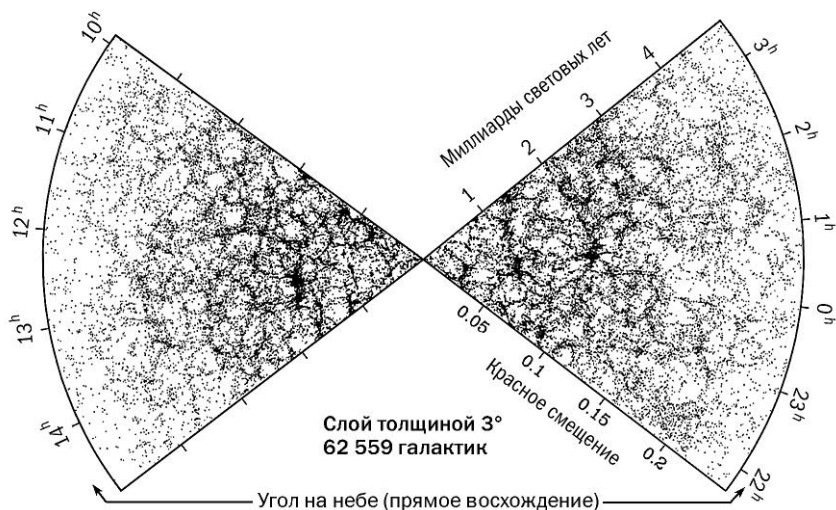


Рис. 7.37. Распределение галактик в тонком слое Вселенной в направлениях северного и южного полюсов Галактики до расстояний 5 млрд св. лет. Получено на основе обзора 2dF или 2dFGRS (Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey, Обзор красных смещений галактик в двухградусных полях), проведенного в 1997–2002 гг. на 3,9-м телескопе Англо-Австралийской обсерватории.

скопления и сверхскопления галактик, объединенные в несколько «великих стен» (рис. 7.36). В более крупном масштабе (рис. 7.37) в целом ощущается однородность, но сотовая структура все еще легко просматривается.

Пытаясь представить себе структуру Вселенной в этих гигантских масштабах, важно помнить, что она не статична: Вселенная расширяется, ее части удаляются друг от друга, поэтому расширяются упомянутые выше ячейки, а также и отдельные сверхскопления галактик. В этом — главное отличие скоплений от сверхскоплений: скопления галактик не расширяются вместе с крупномасштабной структурой. Более того, многие скопления галактик еще не достигли равновесного, стационарного состояния, такого, в каком пребывают, например, шаровые звездные скопления. Самые внешние области протяженных и рыхлых скоплений галактик еще продолжают сжиматься, то есть галактики в них медленно движутся от краев к центру скопления.

Наблюдаемое распределение галактик и их скоплений изучено уже довольно хорошо, до расстояний в миллиарды световых лет. Задача космологической теории — объяснить это распределение. Дела-

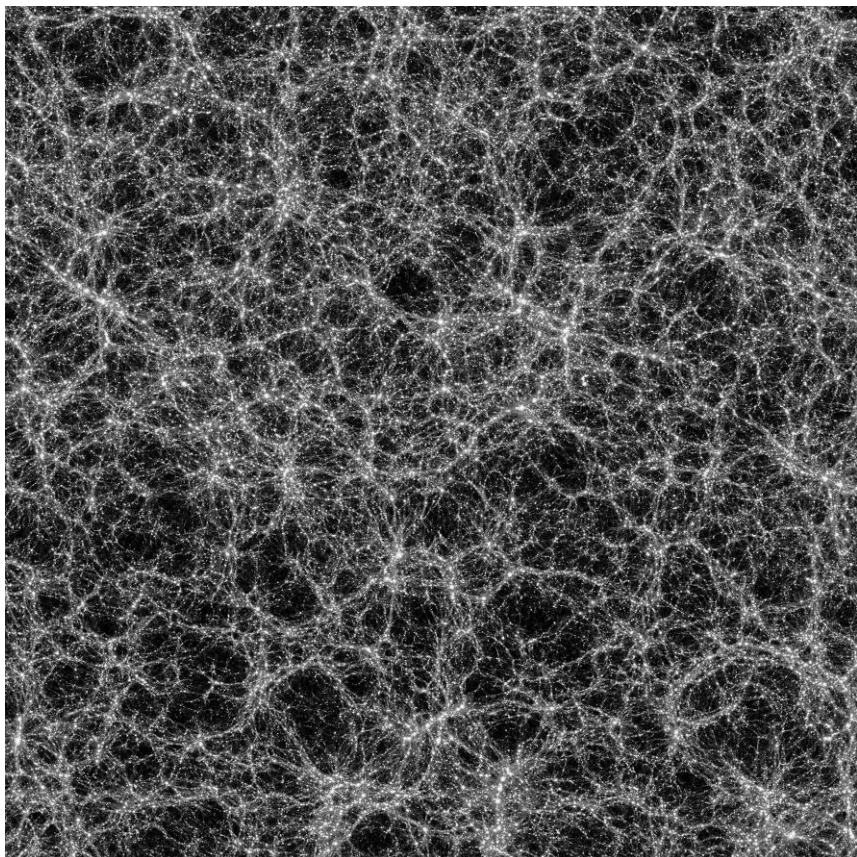


Рис. 7.38. Численная модель крупномасштабной структуры Вселенной в нынешнюю эпоху: область размером 870–800 Мпк (около 2,8–2,6 млрд св. лет) и толщиной 90 Мпк (около 300 млн св. лет). Светлым показано барионное вещество (галактики, скопления галактик, горячий газ); темная материя не показана. Автор — James Wadsley (McMaster University, Canada).

ется это при помощи трехмерного численного моделирования процесса расширения большого объема Вселенной. В начальные условия закладываются малые флуктуации плотности, которые не противостоят наблюдаемой высокой однородности реликтового излучения. А затем, в процессе расширения и гравитационного взаимодействия, эти неоднородности плотности возрастают и превращаются в некую структуру, почти застывшую в расширяющейся сетке координат, поскольку средняя плотность с расширением уменьшается и гравитационное взаимодействие ослабевает. Путем такого моделирования уда-

ется воспроизвести наблюдаемую ячеистую структуру сверхскоплений галактик (рис. 7.38), но только в том случае, если в модель закладывается $\frac{1}{4}$ барионного вещества и $\frac{3}{4}$ темной массы, взаимодействующей с обычным веществом (и с самой собой) только гравитационно. Этот результат считается одним из важных аргументов в пользу существования темной материи.

7.6.6. Темная материя и теория происхождения галактик

В конце 1970-х гг. все больше наблюдательных фактов указывало на существование во Вселенной темной материи, причем в количестве, в несколько раз превышающем полную массу барионного вещества. Это требовало теоретической интерпретации: нужно было понять природу темной материи и ее роль в эволюции Вселенной.

Тогда еще не было ясности в том, как образуются галактики (полной ясности нет и сегодня). Во многом благодаря работе академика Я. Б. Зельдовича и его коллег стало понятно, что галактики и системы галактик возникают из небольших возмущений плотности, которые усиливаются гравитацией. В областях, где плотность чуть выше средней, гравитационное притяжение сильнее, чем в соседних областях, где плотность ниже. Поэтому вещество истекает из разреженных областей и стекается в более плотные области. Однако процесс этот довольно медленный. Из теоретических расчетов следовало, что ко времени, когда первоначально горячий газ Вселенной заметно остынет и сможет начаться гравитационная концентрация, относительные флуктуации плотности должны стать уже достаточно большими, составляя примерно тысячную долю средней плотности. Измерения фонового космического излучения показали, что на самом деле флуктуации плотности были в то время (при красном смещении $z \approx 1200$) примерно в сто раз меньше. Когда результаты этих измерений фонового излучения впервые стали известны, Зельдович усомнился в их достоверности, поскольку, по его мнению, в таком случае галактики никак не смогли бы возникнуть.

Путь к решению предложил Артур Давидович Чернин. Его расчеты показали: если темная материя состоит не из обычного барионного вещества, а из чего-то наподобие нейтрино, то такой нейтринный газ освобождается от влияния горячего излучения на гораздо более ранней стадии развития Вселенной, и рост в нем флуктуаций плотности может начаться раньше, чем в обычном газе. Особенность нейтрино состоит в том, что они очень слабо взаимодействуют друг с другом, с обычным барионным веществом и с излучением. К тому времени, ко-

гда обычное вещество может только начать конденсироваться, нейтринный газ уже образует поле плотности с достаточным контрастом. Эта идея отводила для нейтрино роль темной материи, которая в рамках теории становилась *необходима* для возникновения галактик.

Эти результаты впервые обсуждались в 1981 г. в Таллине на конференции «Возникновение структуры Вселенной», в которой вновь участвовали все ведущие теоретики и наблюдатели — как физики, так и астрономы. Эту конференцию можно считать краеугольным камнем в зарождении новой области науки — астрофизики элементарных частиц. Однако идея с нейтрино себя не оправдала: их слишком быстрое движение не позволяло объяснить рост неоднородностей малого масштаба. К 1984 г. возникла концепция холодной темной материи, позволяющей при компьютерном моделировании воспроизвести крупномасштабную ячеистую структуру в распределении галактик — нити и пустоты между ними. Но на роль носителя этой массы кандидат не нашелся.

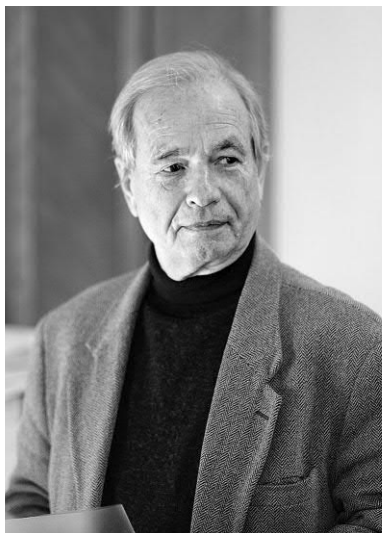


Рис. 7.39. А. Д. Чернин.
Фото О. С. Бартунова.

7.6.7. Поиск невидимой массы

Как определить массу отдельных невидимых объектов? Решение напрашивается само собой: нужно заметить действие гравитационных полей индивидуальных носителей невидимой массы. Большие надежды при этом возлагаются на эффект «гравитационной линзы».

Гравитационная линза — это любое массивное тело, например планета или звезда, или даже система тел — галактика, скопление галактик, — искривляющая своим гравитационным полем направление распространения излучения, подобно тому, как искривляет путь светового луча положительная стеклянная линза. Эффект гравитационной линзы предсказал Альберт Эйнштейн, который в 1915 г. в рамках общей теории относительности впервые правильно вычислил угол отклонения луча света в гравитационном поле. Во время полного солнечного затмения 29 мая 1919 г. английские астрономы измерили от-

клонение света звезд, проходящего вблизи поверхности Солнца: смещение изображений звезд составило 1,75 в полном согласии с предсказанием Эйнштейна.

Петербургский физик Орест Данилович Хвольсон в 1924 г. и А. Эйнштейн в 1936 г. теоретически рассмотрели линзоподобное действие одной звезды на излучение другой; они показали, что луч света далекой звезды может быть отклонен притяжением другой звезды-линзы, в результате чего возникнет второе изображение далекой звезды; в случае, когда обе звезды и наблюдатель находятся на одной прямой, изображение будет иметь форму кольца. Ни Хвольсон, ни Эйнштейн не верили в возможность экспериментального обнаружения эффекта гравитационной линзы в случае с обычными звездами, поскольку более близкая к наблюдателю звезда-линза мешает своим излучением разглядеть слабое искаженное изображение более далекой звезды.

Однако в 1937 г. Фриц Цвикки пришел к выводу, что эффект гравитационной фокусировки света можно наблюдать в том случае, если линзой является галактика, поскольку ее гравитационное поле очень велико, а средняя поверхностная яркость мала и не сильно мешает наблюдению. В 1979 г. английские астрономы Д. Волш и др. впервые обнаружили «двойной квазар» QSO 0957+16 A,B с угловым расстоянием между компонентами A и B около 6". Когда выяснилось, что оба квазара изменяют свой блеск синхронно, астрономы поняли, что в действительности это два изображения одного квазара, обязанные своим появлением эффекту гравитационной линзы. Вскоре нашли и саму линзу — далекую галактику, лежащую между Землей и квазаром. К концу XX в. было обнаружено уже несколько десятков гравитационных линз. Некоторые изображения действительно имеют форму ровного или разорванного кольца, которое называют «кольцом Эйнштейна» или «кольцом Хвольсона—Эйнштейна». Позже был обнаружен эффект гравитационной линзы и в пределах нашей Галактики (так называемое микролинзирование): однократная спонтанная переменность блеска некоторых звезд указывает на то, что между ними и Землей проходят массивные и довольно темные тела, природа которых пока не ясна.

В 1990-е гг. началось несколько экспериментов по поиску носителей невидимой массы с использованием эффекта гравитационного микролинзирования: польско-американский эксперимент OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment), американо-австралийский MACHO (Massive Compact Halo Objects) и французский EROS (Expe-

rience de Recherche d'Objets Sombres). В каждом из них практически непрерывно измеряется яркость тысяч звезд в надежде, что проходящий между Землей и наблюдаемой звездой невидимый объект своим гравитационным полем исказит ее изображение и изменит его яркость. Уже зафиксировано несколько сотен подозрительных случаев, но с выводами астрономы пока не спешат: нужно накопить большой материал, чтобы выводы стали статистически надежными.

В отношении природы темной материи большинство специалистов склоняется к одному из двух вариантов:

1) элементарные частицы неизвестного типа, условно называемые WIMP (weakly interacting massive particles). Имеется в виду отсутствие у них сильного взаимодействия, а также электрического заряда, то есть это не барионное вещество;

2) макроскопические несветящиеся объекты типа нейтронных звезд, черных дыр, свободных планет и т. п. Для их обозначения используется аббревиатура МАСНО. Анализ экспериментов по гравитационному микролинзированию уже показал, что такого рода объекты в интервале масс от 10^{-7} до $30 M_{\odot}$ не могут быть доминирующим компонентом темного гало.

Учитывая это, все больше научных коллективов разворачивают поиск WIMPов в земных условиях (Клапдор-Клайнгротхаус и Цюбер, 2000). Есть надежда, что носители скрытой массы Галактики будут выявлены именно в этих экспериментах.

Почему астрономы оказывают такое большое внимание проблеме невидимой массы? Во-первых, потому, что восстановить историю Вселенной невозможно без точного знания об ее элементарном составе. Во-вторых, потому, что от количества темной материи и от ее свойств зависит будущее Вселенной. Но главное, загадка природы невидимого вещества — это вызов для современной науки!

7.7. Метаморфоз галактик

Как мы убедились, галактики по своим свойствам чрезвычайно разнообразны. Современный внешний вид, размер, масса и внутренняя динамика той или иной галактики зависят от того, как она сформировалась и насколько изменилась в ходе эволюции. Узнать историю галактик помогает изучение их звездного населения. В каждой галактике могут присутствовать звезды с различными характеристиками: молодые, возрастом менее 100 млн лет, и старые, возрастом в миллиарды лет; среди молодых могут быть массивные и маломассивные. Но соотношение молодых и старых звезд у каж-

дой галактики свое, сложившееся в результате ее индивидуальной эволюции.

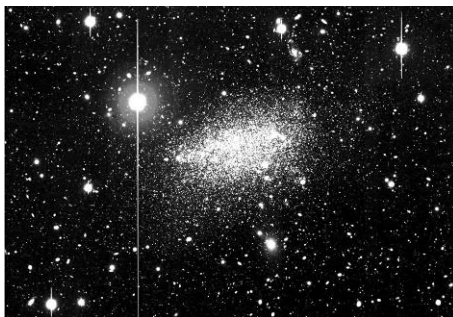
В большинстве эллиптических систем практически отсутствуют молодые звезды; эти галактики в основном состоят из звезд, родившихся более 10 млрд лет назад. Самые яркие звезды в них — красные гиганты. В спиральных и неправильных системах кроме старых звезд есть и молодые; самые яркие из них — голубые сверхгиганты возрастом лишь несколько десятков миллионов лет. Наибольшее относительное количество молодых звезд наблюдается в некоторых редко встречающихся галактиках со вспышкой звездообразования. Как правило, они относятся к неправильным или голубым карликовым галактикам. Для них характерно не только повышенное содержание молодых массивных звезд, но и пониженное (по отношению к солнечному) содержание тяжелых химических элементов, а значит, вспышки звездообразования в таких галактиках редки и кратковременны.

Пример такой системы есть в Местной группе — это галактика Leo A (она же Leo III), которую Фриц Цвикки открыл в 1942 г. в созвездии Лев. Это маленькая, размером около 1 кпк, изолированная неправильная галактика, удаленная от нас на 690 кпк. Ее звездное население разнообразно — от самых древних звезд возрастом не менее 10 млрд лет до очень молодых и массивных спектрального класса O. Наличие таких звезд и созданных ими в межзвездном газе областей HII говорит о недавней вспышке звездообразования. Но в настоящее время темп рождения звезд в этой галактике невысок, и в целом в ее истории он, по-видимому, был невысоким, о чем свидетельствует низкая металличность ее звезд и газа (1–2% солнечной). Динамическая масса галактики Leo A оценивается в $8 \cdot 10^7 M_{\odot}$, но не менее 80% этой массы заключено в темной материи. Любопытное совпадение: у нашей галактики соотношение барионной и темной массы приблизительно такое же. Возможно, Leo A — один из немногих хорошо сохранившихся «строительных блоков», большинство из которых вошло в состав Галактики и Туманности Андромеды.

Что же важное выяснилось при изучении истории галактик и каков их возраст?

Если люди стареют в более или менее одинаковом темпе, хотя индивидуальные особенности, конечно, существуют, то с галактиками все значительно сложнее. Само понятие возраста галактик определено нечетко, поскольку процесс их формирования занимал миллиарды лет, и непонятно, откуда начинать отчет. В большинстве случаев самые старые звезды у галактик всех типов имеют более 10 млрд лет.

Рис. 7.40. Карликовая неправильная галактика Leo A. Фото получено в 2004 г. 8,2-метровым японским телескопом «Subaru», работающим на обсерватории Мауна-Кеа (о. Гавайи). Светлые линии, пересекающие яркие звезды, образовались из-за растекания заряда в ПЗС-матрице.



Массовое формирование галактик как звездных систем началось 12–13 млрд лет назад. В наши дни почти все галактики — старые звездные системы. Лишь очень редко встречающиеся карликовые галактики, возможно, рождаются прямо сейчас, испытывая первую в своей истории вспышку звездообразования. В них содержится много межзвездного газа и молодых звезд и незаметно присутствия старых звезд — красных гигантов. Содержание тяжелых элементов у них крайне низкое. Такие галактики — объекты пристального исследования.

Современные теории образования галактик говорят о том, что исходными материалами для формирования крупных звездных систем служили неоднородно распределенная в пространстве темная материя и обычный газ (водородно-гелиевая плазма), сжатие и остывание которого в гравитационном поле темной материи привели к бурному рождению звезд и формированию галактических структур. Масса звездных островов, рождающихся в бурных потоках газа, могла расти как за счет струй межгалактического газа и темной материи, вливающих в галактику, так и благодаря слиянию и поглощению более мелких систем. В этой картине еще много неясного, но наблюдения дают возможность проверить и уточнить сценарии формирования галактик разного типа. Это возможно благодаря тому, что мы непосредственно наблюдаем молодые галактики в тех далеких областях Вселенной, свет от которых шел до нас миллиарды лет. Правда, такие исследования трудоемки и доступны только самым крупным телескопам на Земле или орбитальным обсерваториям.

Не вызывает сомнения, что наиболее быстрый рост галактик происходил первые 1–2 млрд лет. В нашей галактике от тех далеких времен остались дожившие до нынешней эпохи шаровые скопления и наиболее старые звезды, образующие толстый диск. Активность галактических ядер в далеком прошлом также была значительно выше, чем в наши дни. В целом роль активных ядер в эволюции галактик до

сих пор детально не исследована, но уже ясно, что в некоторых случаях она может быть очень большой: ядро на стадии квазара способно, воздействуя на межзвездный газ, повлиять на свойство галактики в целом.

Прошли миллиарды лет. Последовавшая за бурным ростом галактик сравнительно спокойная их эволюция отразилась в разной степени на галактиках различных масс и типов, изолированных и входящих в скопления. Эллиптические галактики быстро потеряли запас межзвездного газа, формирование звезд в них остановилось, и в большинстве своем эти системы медленно старели и стареют сейчас, не претерпевая существенных изменений. Чуть позднее прекратилось звездообразование в тех галактиках, которые мы наблюдаем как линзовидные. Другое дело — спиральные и неправильные галактики: их формирование растянулось на миллиарды лет и не завершилось полностью даже к настоящему времени. Это может быть связано как с более экономным расходом газа на звездообразование, так и с постоянным притоком в них новых порций газа из межгалактического пространства.

В нашу эпоху катастрофические события в жизни галактик — вспышка активного ядра, слияние с другой галактикой, мощный всплеск звездообразования — события редкие, и поэтому галактики меняются очень медленно. Жизни человека недостаточно, чтобы заметить в них какие-либо существенные изменения. Те регулярные события, которые мы смогли пока заметить, — вспышки сверхновых звезд и бурные процессы в активных ядрах галактик — являются лишь проявлением стационарной эволюции галактик. Однако в распоряжении галактик, с нашей точки зрения, целая вечность, так что они не смогут избежать значительных перемен хотя бы потому, что звезды, из которых они состоят, имеют большой, но ограниченный срок жизни, а для рождения новых звезд нужно «сырье» — межзвездный газ, запасы которого не бесконечны.

Что произойдет с галактиками через миллиарды лет? За 2–3 млрд лет — ничего существенного. Разве что увеличится число галактик, где практически прекратилось формирование звезд, да еще галактики в группах и скоплениях заметно переместятся внутри своих систем. Некоторые галактики, связанные узами тяготения, за это время успеют слиться друг с другом. Туманность Андромеды приблизится к нашей галактике, а через 4–6 млрд лет неизбежно сольется с ней, образовав одну гигантскую систему, похожую на современные эллиптические галактики, но с небольшим количеством холодного

газа. Впрочем, никакой катастрофой такое столкновение галактик не угрожает: звезды при этом сталкиваться друг с другом не будут, а просто изменят свои орбиты.

Ну а еще дальше в будущее, через многие миллиарды лет, в галактиках постепенно исчезнут спиральные ветви и области звездообразования. Звезды будут стареть, а их свет — медленно затухать, так что постепенно галактики будут погружаться во тьму. Прогнозировать судьбу мира галактик дальше, на бесконечно далекое будущее, бессмысленно. Этого никто не знает. У природы еще много секретов.

Литература

- Витриченко Э. А. Трапеция Ориона. М.: Наука, 2004.
- Воронцов-Вельяминов Б. А. Внегалактическая астрономия. М.: Наука, 1978.
- Горбачкий В. Г. Введение в физику галактик и скоплений галактик. М.: Наука, 1986.
- Ефремов Ю. Н. Очаги звездообразования в галактиках. Звездные комплексы и спиральные рукава. М.: Наука, 1989.
- Засов А. В., Постнов К. А. Общая астрофизика. Фрязино: Век 2, 2011.
- Клапдор-Клайнгротхаус Г. В., Цюбер К. Астрофизика элементарных частиц. М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 2000.
- Крупномасштабное движение галактик: http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_flow.
- Лозинская Т. А. Взрывы звезд и звездный ветер в галактиках. М.: КРАСАНД, 2012.
- Сурдин В. Г. Гигантские молекулярные облака // М.: Знание, 1990.
- Сурдин В. Г. Сколько шаровых скоплений в Галактике? // Письма в Астрон. журн. 1994. Т. 20. № 6. С. 467–472.
- Сурдин В. Г. Звездные скопления как источник звезд поля галактического гало // Письма в Астрон. журн. 1995. Т. 21. № 8. С. 574–579.
- Сурдин В. Г. Иерархические звездные скопления максимальной населенности // Вестник МГУ. Сер. физика, астрономия. 1997. Т. 52. № 1. С. 63–66.
- Сурдин В. Г. Рождение звезд. М.: УРСС, 2001.
- Тейлер Р. Дж. Галактики: строение и эволюция. М.: Мир, 1981.
- Темная материя: альтернативные теории гравитации.
http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_fluid.
- Эйнасто Я. Э. История темной материи. Тарту, 2007.
- Van den Bergh S. The Local group of galaxies // Astron. Astrophys. Rev. 1999. Vol. 9. P. 273–318.
- Bertin G. Dynamics of galaxies. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- Binney J., Merrifield M. Galactic astronomy. Princeton: Princeton University Press, 1998.

- Binney J., Tremaine S. Galactic dynamics. 2nd edition. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- Galaxy Zoo – волонтерский проект морфологической классификации галактик. <http://www.galaxyzoo.org>.
- Gilmore G. F., King I. R., van der Kruit P. C. The Milky Way as a galaxy. University Science Books, 1990.
- Glushkova E. V. Discovery and investigation of open star clusters in the Milky Way // Baltic Astronomy. 2012. Vol. 17. P. 277–282.
- Hodge P. W. The Physics and Astronomy of Galaxies and Cosmology. New York: McGraw-Hill Book Co., 1966.
- Kormendy J., Bender R. A Proposed Revision of the Hubble Sequence for Elliptical Galaxies // Astrophys. J. Letters. 1996. Vol. 464. P. L119–L122.
- McMillan P. J. Mass models of the Milky Way // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011. Vol. 414. P. 2446–2457.
- Moni Bidin C., Carraro G., Méndez R. A., Smith, R. Kinematical and chemical vertical structure of the Galactic thick disk. II. A lack of dark matter in the solar neighborhood // Astrophys. J. 2012. Vol. 751, Issue 1.
- Moskal E. V., Surdin V. G. Dynamical models of stellar associations // Astron. and Astrophys. Transactions, 1998. Vol. 15. P. 37–43.
- SAI Open Clusters Catalog. 2012. <http://ocl.sai.msu.ru>.
- Sandage A. Classification and stellar content of galaxies obtained from direct photography // Galaxies and the Universe. Eds A. Sandage, M. Sandage, J. Kristian, 1975. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sandage/frames.html>
- De Vaucouleurs G. Classification and Morphology of External Galaxies // Handbuch der Physik, 1959. Vol. 53. P. 275–310. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Dev/frames.html>.





ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

О. К. Сильченко

8.1. Два подхода к изучению эволюции галактик

Детальные исследования звездного состава ближних галактик свидетельствуют, что во всех в них есть старые звезды возрастом не менее нескольких миллиардов лет. Это означает, что галактики вокруг нас прошли долгий жизненный путь с тех пор, как миллиарды лет назад сформировалась их начальная структура и первое звездное население. Что происходило с галактиками на разных этапах этого пути? Как они эволюционировали?

Нет сомнений, что галактики меняли свою светимость, цвет и спектр, поскольку давно родившиеся поколения звезд постепенно старели и вымирали «с массивного конца»: как известно, массивные звезды живут совсем мало по космическим меркам — около 10 млн лет, тогда как звезды с массой Солнца светят почти 10 млрд лет. Однако в процессе жизни любой галактики свой свет в ее общую светимость добавляли новые звезды, рождавшиеся на очередном этапе ее эволюции. Поскольку история звездообразования у каждой галактики своя — в разное время к разным ее подсистемам добавляется разное количество молодых звезд, — то эволюция цвета и спектра каждой звездной системы своеобразна и неповторима. Химический состав звезд и межзвездного газа в галактике со временем может изменяться, а точнее — он обязательно должен изменяться, поскольку звезды в процессе своего термоядерного горения синтезируют из водорода путем разных реакций всю таблицу Менделеева. Чем дольше живет галактика и чем дольше горят в ней звезды, тем, казалось бы, больше должно быть в ее веществе тяжелых химических элементов, синтезированных в звездах. Тот факт, что химический состав звезд диска нашей галактики практически не менялся последние 8–9 млрд лет, удивляет и требует объяснения. Эту особенность химической эволюции нашей звездной системы нужно понять и промоделировать, что, впрочем, и делают весьма успешно исследователи химической эволюции галактик.

Наконец, в ходе эволюции галактики могут менять не только состав своего вещества и соотношение звезд разного типа, но даже свою форму и морфологический тип. Это самая удивительная, грандиозная и впечатляющая эволюция, которая происходит под действием процессов, описываемых законами звездной и газовой динамики.

Изучать эволюцию галактик путем наблюдений можно двумя принципиально разными способами. Первый состоит в том, чтобы детально разглядывать близкие к нам галактики — современный продукт их предшествовавшей эволюции — и по набору их нынешних свойств пытаться восстановить историю их жизни, которая привела именно к такому конечному продукту. Разумеется, этот способ модельно зависим: пытаясь теоретически воспроизвести конечный продукт, мы вынуждены манипулировать известными нам физическими механизмами эволюции и не можем угадать иные механизмы, которых просто пока не знаем. Но возможен и альтернативный подход: можно непосредственно наблюдать галактики с разными красными смещениями, которые, согласно закону Хаббла, расположены на разных расстояниях от нас и, в силу конечной скорости света, видны с разным запаздыванием во времени. Чем больше красное смещение галактики, тем в более глубоком прошлом мы ее видим, тем дальше она от нас в пространстве и, к сожалению, тем труднее ее исследовать. Но современная наблюдательная техника достигла невероятно высокой чувствительности: сейчас практически вся Вселенная просматривается большими телескопами насквозь, вплоть до эпохи, отстоящей от Большого взрыва не более чем на полмиллиарда лет. Именно в ту эпоху, по современным представлениям, галактики начали зарождаться.

Казалось бы, именно второй подход гарантирует нам прямой способ изучения эволюции галактик: поскольку мы наблюдаем их на разных стадиях эволюции, есть возможность выстроить полную эволюционную последовательность. Но на самом деле второй подход тоже модельно зависим. Глядя в глубь веков, мы не можем пронаблюдать жизненный цикл какой-то одной галактики: на разных стадиях эволюции мы наблюдаем *разные* галактики, причем в режиме «стоп-кадров». В масштабе галактик эволюционные процессы развиваются так медленно, что мы не замечаем изменений в каждой конкретной галактике и лишь подозреваем, что из одних, более ранних, галактик со временем получают другие, более поздние, близкие к нам в пространстве и времени. Чтобы из отдельных «стоп-кадров» разных эпох

построить непротиворечивую картину эволюции, все равно требуются предположения о механизмах эволюции. Кроме того, необходимо согласовать количество галактик-предшественников и их прямых потомков на разных красных смещениях, т. е. в разные эпохи. Поэтому наиболее продуктивный подход при восстановлении истории жизни галактик — пытаться сочетать оба метода, используя все имеющиеся наблюдательные данные.

8.2. Морфологическая схема или историческая последовательность? Эволюция взглядов на эволюцию

Когда Эдвин Хаббл выстраивал свою схему морфологических типов галактик, слева он разместил самые «простые» (однокомпонентные) звездные системы — эллиптические галактики, а далее — чем правее на схеме, тем сложнее выглядит структура галактик. Типы галактик в левой части схемы Хаббл назвал *ранними*, а в правой части — *поздними*. Быть может, в эту последовательность морфологических типов галактик, напоминающую камертон, Хаббл вкладывал эволюционный смысл? С одной стороны, в его статье 1926 г. о морфологической классификации галактик есть примечание, что типы галактик — это чистая феноменология, дескать, не ищите в них скрытых смыслов. С другой стороны, в этой же статье он признается, что построенная исключительно по наблюдательным признакам последовательность типов галактик «почти идентична пути развития, извлеченному Джинсом из чисто теоретических исследований».

Как известно, английский астрофизик Джеймс Джинс в начале XX в. сформулировал основные физические принципы, по которым

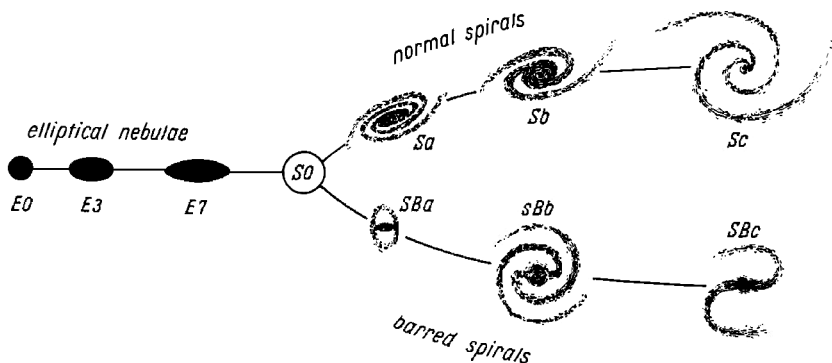


Рис. 8.1. Схема морфологической классификации галактик, предложенная Э. Хабблом. Рисунок из книги Хаббла «*Realm of the Nebulae*» (1936).

из газа формируются звезды. Заселение галактики новорожденными звездами, сгруппированными в крупномасштабные структуры, — это как раз и есть эволюция галактики, спектрофотометрическая и морфологическая. На наш взгляд, есть все основания полагать, что Хаббл считал вероятным развитие спиральной галактики из эллиптической путем наращивания крупномасштабного диска вокруг изначально однородного звездного сфероида. То есть направление эволюции галактик на схеме морфологических типов рисовалось ему подобным направлением европейской письменности — слева направо, вдоль ручки, а затем вдоль ножек «камертона».

Семидесятые годы прошлого века были ранним золотым веком внегалактической астрономии. Появились первые, еще немногочисленные, но уже решающие для мировоззрения исследователей наблюдательные данные о структуре, кинематике и звездном населении галактик (Sandage, 1975). В ногу с наблюдениями шла и теоретическая мысль: молодые гениальные аспиранты ваяли модели «на века», такие, например, как предложенная Ричардом Ларсоном модель формирования галактики путем «монолитного коллапса» протогалактического газового облака или модель эволюционного синтеза интегрального спектра галактик, разработанная Беатрис Тинсли. В те годы стало ясно, что формирование спиральных галактик из эллиптических в массовом порядке невозможно: эллиптические галактики в среднем массивнее поздних спиральных. Более того, Ричард Ларсон, уточняя свои модели монолитного коллапса, в конце концов пришел к выводу, что из протогалактического газового облака звездный диск сформироваться может, а вот сфероидальная эллиптическая галактика — нет. Наблюдения показали, что эллиптические галактики вращаются очень медленно и что вся кинетическая энергия их звезд сосредоточена в их хаотическом движении. Чтобы получить такую звездную систему, у протогалактического облака надо было отобрать момент импульса, т. е. замедлить его вращение, а приемлемых физических механизмов для этого в рамках модели монолитного коллапса найти не удавалось.

К 1978 г. Ричард Ларсон решился на принципиальный шаг и резко изменил подход к формированию эллиптических галактик: он принял идею Тоомре об определяющей роли взаимодействий и слияний галактик в их эволюции и предположил, что эллиптическая галактика формируется путем слияния двух дисковых, спиральных. На жаргоне профессионалов этот процесс называют «мержингом», от английского *merge* — поглощать, сливаться.

Рис. 8.2. Пример мержинга, т. е. слияния, демонстрируют эти две спиральные галактики NGC 6050 и IC 1179, известные под общим названием Агр 272. Они находятся в крупном скоплении галактик в созвездии Геркулес на расстоянии 150 Мпк от нас. Снимок получен космическим телескопом «Хаббл» с экспозицией 5 часов.



Сценарий галактического мержинга, как полагал Ларсон, одним махом решает две проблемы. Бурное динамическое событие слияния двух дисков отбирает у обоих момент импульса и «разогревает» получившуюся в итоге звездную систему, сообщая ее звездам хаотические движения (увеличивая дисперсию их пространственных скоростей). Отношение осей получившегося звездного сфероида определяется отношением средних дисперсий скоростей звезд вдоль направлений этих осей. О таких системах говорят, что их форма поддерживается не вращением, а анизотропным хаотическим движением звезд.

Второй проблемой была связь между химическим составом и массой галактики, которую демонстрирует рис. 8.3. Величина $[Z/H]$ — это десятичный логарифм содержания (по массе) металлов к водороду относительно значения этой величины на Солнце, т. е. $[Z/H] = 0$ соответствует солнечному значению металличности (в фотосфере Солнца около 2% металлов), а $[Z/H] = 0,5$ означает, что металличность объекта примерно втрое выше солнечного значения. Величина M_B — это абсолютная звездная величина галактики в фильтре B . Большие черные кружки — галактики скоплений (Virgo, Fornax), маленькие черные кружки — галактики групп, пустые кружки — изолированные галактики, квадрат — центр галактики М31. Как видим, эффекта плотности окружения не заметно: зависимость в плотных группах и вне их примерно одинакова, но она, несомненно, есть: у эллиптических га-

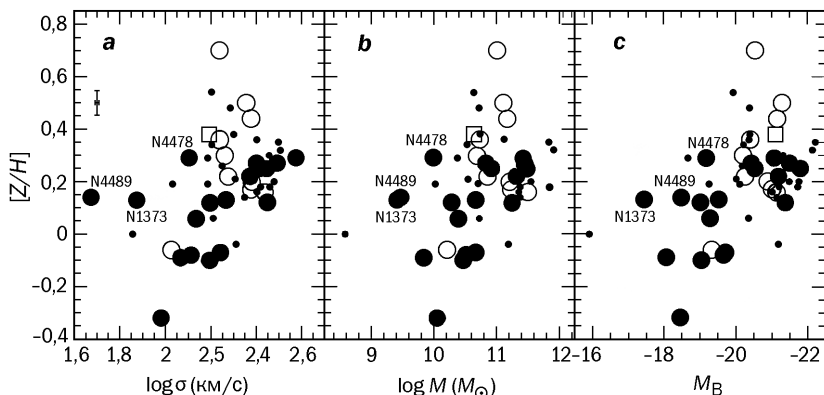


Рис. 8.3. Зависимость металличности звезд в эллиптических галактиках от дисперсии скоростей звезд (а), а также от массы (б) и светимости (с) галактики. Рисунок из работы Trager et al. (2000).

ластик химический состав звезд связан с общей массой звездной системы — чем массивнее эллиптическая галактика, тем выше содержание тяжелых элементов в ее звездах. Новый сценарий Ларсона объяснял такую зависимость, если предполагать, что каждое событие слияния спиральных галактик, содержащих не только звезды, но и газ, сопровождается бурной вспышкой звездообразования — быстрым превращением газа сливающихся галактик в звезды. Эти звезды, точнее, самые массивные из них, должны быстро произвести в своих недрах новые тяжелые элементы, выкинуть их в межзвездную среду и тем самым обеспечить следующим поколениям звезд более высокую металличность. Итак, каждое слияние — это одновременно и увеличение массы всей системы, и повышение металличности звезд эллиптической галактики; требуемая корреляция естественным образом устанавливается.

Так в конце 1970-х гг. перевернулся эволюционный смысл хаббловской последовательности морфологических типов: теперь эволюцию «рисовали» справа налево: сначала образовывались чисто дисковые галактики, а затем уже диски сливались и формировали сфероиды — галактики эллиптические. Эта идея очень понравилась космологам, исследующим общую картину эволюции Вселенной с другой, теоретической стороны. Главная идея современной космологической картины мира — это гравитационное сгущивание темной материи, которая в смысле гравитации доминирует во Вселенной, а барионы (обычный газ) лишь послушно следуют за ней. Темная мате-

рия сначала идет волнами, потом разбивается на комки, затем эти комки коллапсируют (сжимаются до состояния динамического равновесия) и начинают сближаться и сливаться друг с другом под действием все той же гравитации. Слияния играют ключевую роль в формировании крупномасштабной структуры Вселенной и в формировании галактик в рамках концепции иерархического сгущения, которое происходит неизбежно, если Вселенная заполнена темной материей и если эта темная материя ничего другого не может делать, кроме как гравитировать.

Итак, согласно современным представлениям космологов, в ранней Вселенной сначала формируются маленькие темные гало, а в них — карликовые галактики. При формировании темных гало газ, составляющий по массе не более 20% от темной материи, вириализуется, то есть равномерно распределяется по сфероидальному объему темного гало и нагревается до вириальной температуры, обеспечивающей давление, достаточное для приостановки его сжатия. Затем газ постепенно высвечивается, остывает и осаждается в диск, поскольку энергия уходит с излучением, а момент импульса никуда не девается. В газовом диске начинается звездообразование — в центре небольшого темного гало формируется небольшая дисковая галактика. Под действием взаимной гравитации небольшие темные гало продолжают сближаться, группироваться и сливаться. При слиянии двух темных гало их две дисковые галактики тоже сливаются (правда, с некоторой задержкой во времени) и образуют одну эллиптическую. В принципе, если в объеме темных гало еще оставался «беспризорный» горячий газ (а по расчетам он должен там оставаться, поскольку осаждение и звездообразование — довольно неэффективные процессы), то этот газ будет продолжать высвечиваться и остывать, осаждаясь в диск уже вокруг центральной эллиптической галактики. Так, по мысли теоретиков, формировались спиральные галактики ранних типов — дисковые, с большими балджами.

Далее это темное гало, возможно, опять с чем-нибудь сольется; едва успевшая сформироваться спиральная галактика раннего типа вновь примет участие в «большом мерджинге» и породит еще более крупную эллиптическую галактику. В принципе дальше циклы могут повторяться. Такова классическая схема формирования хаббловских морфологических типов галактик, сформулированная космологами в начале 1990-х гг. Расчеты на суперкомпьютерах позволили даже визуализировать этот процесс (Governato F. et al., 2012). Качественно вроде бы все получалось хорошо. Однако современная космология

претендует на то, что теперь это точная, количественная наука: основные космологические параметры определяются с формальной точностью в несколько процентов. В таком случае ключевой вопрос в этом стройном сценарии формирования морфологических типов галактик — его временная шкала.

Общепринятой космологической моделью сейчас является модель с холодной темной материей и Λ -членом в уравнении Эйнштейна, сокращенно Λ CDM- или Λ CDM (от Λ -Cold Dark Matter). В этой модели в рамках концепции иерархического сгущивания все времена зажаты достаточно жестко: например, массивные эллиптические галактики должны формироваться последними, и при этом сравнительно недавно. Все расчеты, все численные модели указывают, что эпоха последних больших слияний, рождающих крупные эллиптические галактики, удалена от нас на красное смещение $z = 0,5\text{--}0,7$, то есть на 5–6 млрд лет в прошлое. Если это слияние сопровождалось вспышкой звездообразования, то мы должны видеть в близких гигантских эллиптических галактиках относительно молодые звезды. На самом деле их там нет. Из близких галактик именно гигантские эллиптические галактики — самые старые звездные системы (наряду с шаровыми скоплениями): для них наблюдается корреляция «масса — возраст звездного населения». Если у эллиптических карликов измеренный средний возраст звезд еще бывает около 5 млрд лет, то у гигантских эллиптических галактик все звезды старше 10 млрд лет, и уж точно никаких вспышек звездообразования они не испытывали после $z = 1$.

Что могут сказать теоретики на это разногласие между теоретическими прогнозами и наблюдениями? В принципе, теоретики — народ изобретательный. Они заявили: пусть гигантские эллиптические галактики образуются слияниями, но не спиральных галактик, а других эллиптических галактик, поменьше, в которых нет газа. Тогда будет «сухой мерджинг», без газа, вспышки звездообразования не произойдет, и все звезды в продукте слияния останутся старыми. Действительно, проблему большого возраста звезд в эллиптических галактиках такой сценарий решает. Правда, тут же появляется проблема с корреляцией «металличность—масса»: если новая галактика получит полный набор своих звезд от галактик-предшественников, имевших меньшую массу, то вместе со средним возрастом звезд продукт слияния унаследует и среднюю металличность звездного населения. В таком сценарии корреляции массы галактики с металличностью вообще не должно быть.

Апофеозом внесения эволюционного смысла в хаббловскую схему морфологических типов галактик стало соединение двух ножек хаббловского «камертона» наклонными перемычками: галактики, имеющие бары, могут их терять и позже приобретать снова; по мнению теоретиков-динамиков, бары являются транзитными (временными) структурами. К этому выводу теоретики пришли на основе численного моделирования, которое показало, что бары зарождаются в центрах галактических дисков под действием разных механизмов динамической эволюции. Можно взять изолированный диск, состоящий на 90% из звезд и на 10% из газа, т. е. достаточно холодный в динамическом смысле, и оставить его «в покое», т. е. в состоянии спокойного вращения. Через немногие сотни миллионов лет в центре такого диска сам собой появится заметный бар — результат развития гравитационной неустойчивости в динамически холодном диске. Можно взять даже вполне устойчивый звездный диск, окруженный стабилизирующим его темным гало, и запустить близкий пролет спутника, небольшого, например с массой в 10% от массы основной галактики. И в этом случае не только во внешних частях диска вытянутся хвосты и спирали, но и в его центре сформируется бар, вращающийся с угловой скоростью прохождения спутника по орбите.

В общем, бары неизбежно формируются в течение жизни дисковых галактик; но оказалось, что они также могут исчезать, «рассасываться». Если в центр галактики «уронить» значительную массу, например в 5% от общей массы галактики (скажем, резко нарастить в модели массу балджа), то эта сильно концентрированная масса «циркуляризует» орбиты звезд в своей достаточно протяженной окрестности — и бар исчезнет. Позже, например после очередного близкого прохождения другой галактики, бар может появиться снова. В результате спиральная галактика будет «путешествовать» между ножками хаббловского «камертона», постепенно наращивая балдж, то есть сдвигаясь к ранним типам.

8.3. Механизмы эволюции галактик

Теоретическая мысль работает в известном смысле независимо от наблюдений и от реальной жизни галактик. То есть результаты наблюдений, конечно, часто служат отправной точкой размышлений теоретиков, но дальше научная мысль творит свой мир, гораздо более стройный и логичный, чем реальная жизнь, мир, заведомо содержащий меньшее число деталей, но большее число связей и закономерностей. На рис. 8.4 приведена схема, сводящая воедино возможные

Глобальная эволюция

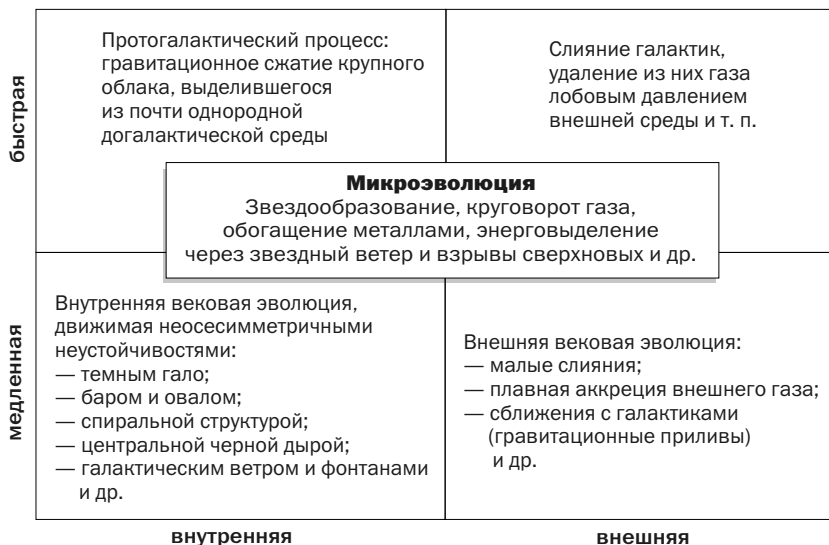


Рис. 8.4. Классификация физических механизмов, управляющих глобальной эволюцией галактик (по Kormendy, Kennicutt, 2004).

механизмы эволюции галактик, придуманные теоретиками — отчасти на основе наблюдательных феноменов, отчасти на основе предсказанных связей между явлениями, определяемых известными физическими силами.

Механизмы расклассифицированы по двум основным характеристикам: по масштабам пространства (внутренние — внешние) и масштабам времени (быстрые — медленные). Скорость механизма оценивается по отношению его характерного времени к двум близким по значению динамическим временам: периоду вращения галактики и ее времени свободного падения, т. е. коллапса. В пределах отдельной галактики быстрые механизмы — это те, которые действуют на временах в несколько сотен миллионов лет; медленные механизмы порождают заметные изменения в галактике лишь за миллиарды лет.

А что такое внутренние и внешние механизмы? Это совсем просто: внутренние механизмы действуют в изолированных галактиках, если такую галактику оставить в покое. А для запуска внешних механизмов необходимы посторонние агенты — соседние галактики или межгалактическая среда. В отдельной рамке в центре схемы показаны «агенты эволюции», действующие постоянно, т. е. имеющие широкий спектр характерных времен. Они сопровождают любые другие

динамические события в жизни галактики, как внутренние, «камерные», так и спровоцированные извне.

Теперь обсудим отдельно каждую группу механизмов. Сначала пройдемся по углам схемы, а позже заглянем в ее центр.

8.3.1. Протогалактический коллапс

Самое простое и быстрое внутреннее событие в жизни галактики — ее рождение в процессе протогалактического коллапса. Идея, лежащая в основе теории гравитационного коллапса, восходит к Ньютону, а основу физической теории этого процесса заложил Джеймс Джинс, исследовавший механизмы формирования звезд и галактик. Именно он нашел соотношение между температурой и плотностью диффузной среды, при которых может начаться выделение из нее и дальнейшее гравитационное сжатие газовых облаков. Сам Джинс не смог уверенно применить свою теорию к наблюдениям (Джинс, 1932), поскольку в начале XX в. почти ничего не было известно о межзвездной среде и тем более — о догалактической. Но во второй половине XX в. была изучена межзвездная среда и развита теория Джинса. Оказалось, что она действительно способна описать рождение звезд и небольших звездных скоплений.

Естественно, если речь зашла о формировании галактик из почти однородной догалактической среды, первое, что пришло в голову теоретикам, — обобщить механизм Джинса на более крупные масштабы, т. е. перейти от облаков с массой порядка 1 массы Солнца ($M_{\odot}$), порождающих при коллапсе звезду, к облакам с массой миллиард или сто миллиардов масс Солнца, из которых при коллапсе и сопутствующей ему фрагментации должна получиться галактика. Такое событие, унаследовывающее эволюционную связь «одно газовое облако — одна галактика», сейчас называют *монолитным* коллапсом.

Две модели монолитного коллапса были выдвинуты и развиты практически одновременно — диссипативная и бездиссипативная. Развитием первой занимался Ричард Ларсон (R. B. Larson), а второй — Ричард Готт (J. R. Gott, III); оба — американские астрофизики. Фактически это были их кандидатские диссертации, но впоследствии эти работы признали классическими трудами. Из названий моделей можно понять, что в процессе бездиссипативного коллапса общая энергия системы сохраняется, а при диссипативном — убывает. Это происходит потому, что в первом случае коллапсирует звездная система, частицы которой — звезды — практически не сталкиваются и не теряют свою механическую энергию (о звездных системах говорят, что они

бесстолкновительны). А во втором случае сжимается система газовых облаков, которые могут сталкиваться, нагреваться, высвечивать тепло, одним словом, терять энергию. Тем не менее надо помнить, что момент импульса, связанный с вращением системы, при коллапсе практически всегда сохраняется: не существует достаточно мощных механизмов его отвода.

В моделях Готта звездообразование протекает до начала коллапса и при этом полностью исчерпывает газ. Следовательно, это сценарий формирования эллиптических галактик. Когда звездная протогалактика обособляется от хаббловского расширения Вселенной и начинает сжиматься под действием самогравитации, вдоль оси вращения она может сжаться сильнее всего, поскольку в этом направлении центробежная сила не противодействует гравитации. Но и вдоль оси вращения максимальное сжатие, соответствующее конечному равновесному («вириализованному») состоянию звездной системы, не может более чем вдвое уменьшить ее начальный радиус: причина кроется именно в сохранении энергии. Финальная плотность упаковки звезд в такой новорожденной галактике получается небольшой — порядка на три меньше реальной средней плотности звезд в близких к нам эллиптических галактиках. Так что сценарий бездиссипативного коллапса пришлось забраковать практически сразу.

Больше повезло модели диссипативного коллапса, предполагающей, что коллапсировало большое газовое облако. Если положить массу такого облака равной массе типичной галактики, порядка $10^{11} M_{\odot}$, то в процессе сжатия оно должно быстро распасться на отдельные сгустки, облака с массами $(10^6 - 10^8) M_{\odot}$. Эти облака начинают сталкиваться между собой, слипаться, терять энергию движения на нагрев, в результате чего образуются звезды. Если исходный момент протогалактики был очень мал, то звезды постепенно оседают к центру; если же исходный момент был значительным, то звезды оседают в диск. В рамках этой модели Ларсон успешно получал быстро вращающиеся спиральные галактики, но не мог получить медленно вращающиеся эллиптические. Поэтому в конце концов он стал сторонником сценария большого слияния (большого мерджинга) для формирования эллиптических галактик.

Позже, когда космологам стало ясно, что главным гравитирующим агентом во Вселенной является темная материя непонятной природы, масса которой на порядок больше массы газа, звезд и вообще всех барионов вместе взятых, сценарий монолитного коллапса стали применять к гало из темной материи. Причем от всей масштабной

картины коллапса первичных флуктуаций плотности в большом интервале масс осталось только формирование темных гало с массами порядка массы Джинса в эпоху, последовавшую сразу после эпохи рекомбинации; а это $(10^6\text{--}10^7) M_\odot$.

Коллапс темных гало — это, конечно, коллапс бездиссипативный; он протекает так быстро, что газ, подчиняясь гравитации темной материи, не успевает высветиться и остыть, а вириализуется вместе с ней и приобретает «вириальную температуру», которая для характерной массы протогалактики превышает 10^5 K. То есть в финале протогалактического коллапса получается сфероид из темной материи, по объему которого равномерно «размазан» горячий газ в количестве от 10 до 20% от общей массы гало. Это теоретические начальные условия для дальнейшего формирования (дисковой) галактики.

8.3.2. Внутренняя вековая эволюция

Термин «вековая эволюция» (secular evolution) относительно недавно появился в области исследования эволюции галактик и еще не вполне утвердился в русскоязычной научной литературе. Этот термин пришел из небесной механики, где понятие «вековой» означает «непериодический, медленно, но постоянно изменяющийся в одном направлении». В небесной механике медленные динамические процессы происходят на масштабах времени в сотни и тысячи лет. В области же изучения галактик «вековая эволюция» подразумевает процессы, приводящие к существенным изменениям звездных систем на масштабах времени в миллиарды лет, что менее чем на порядок отличается от времени жизни Вселенной и, следовательно, от возраста самих галактик.

Механизмов внутренней вековой эволюции галактик теоретики предложили довольно много; некоторые из них перечислены на схеме (рис. 8.4). Радиальное перемещение барионного вещества в диске галактики, в первую очередь газа, возможно, только если существует механизм перераспределения момента импульса. В свою очередь, эффективное перераспределение момента газа и звезд происходит, если в диске нарушается осевая симметрия и орбиты звезд и газовых облаков, представлявших собой в осесимметричном потенциале плоские окружности с центром в центре диска галактики, становятся существенно некруговыми.

Мы уже упоминали, что если холодный звездно-газовый диск оставить в одиночестве и покое, в нем очень быстро развивается бароподобная неустойчивость, а сформировавшийся устойчивый на вре-

менах десятков оборотов галактики бар является отличным местом для обмена моментом между газом и звездами. Во внутренних областях газ теряет момент и вдоль бара стекает в центр галактики. Во внешних областях газ может приобретать момент и уходить за пределы звездного диска, формируя внешний диск или кольцо. В обоих вариантах газ накапливается на определенных расстояниях от центра, уплотняется, в нем инициируется звездообразование и формируется новое молодое звездное население.

Неосесимметричное возмущение (бар), вращаясь как целое — как волна — в дифференциально вращающемся галактическом диске, порождает целую серию резонансов, в которых инкремент неустойчивостей особенно велик (а в теории — и вовсе бесконечен). Так, например, в центре галактики у бара могут работать вертикальные неустойчивости, «выгоняющие» молодые звезды из плоскости диска. Таким механизмом — через звездообразование в кольце на внутреннем линдбладовском резонансе, а потом через раскачку молодых звезд вертикальной неустойчивостью — бар может из вещества диска наращивать балдж — сфероидальную звездную подсистему галактики. Наблюдения показывают, что звездообразование в околоядерных кольцах протекает очень эффективно, и за времена в несколько (от 3 до 5) миллиардов лет может сформироваться новый балдж с массой до миллиарда масс Солнца. Такие вторичные балджи, возникшие из вещества диска и отчасти унаследовавшие динамические характеристики диска, называют «псевдобалджами». По современным представлениям, чуть ли не большинство балджей в ближней Вселенной являются по происхождению псевдобалджами, в том числе и балдж нашей галактики.

Бары — это наиболее эффективные «перераспределители» углового момента, однако примерно такой же эффект, как бары, на крупномасштабное движение газа оказывают и спиральные ветви, и слабые «овальные» искажения осесимметричного потенциала. Любые трехосные структуры возмущают круговое вращение, в первую очередь газа и в более слабой степени — звезд. В конечном итоге это приводит к радиальному перераспределению вещества — к его миграции — на временных масштабах миллиардов лет. Интересно, что темные гало, которые на заре внегалактических исследований (т. е. лет 40 назад) специалисты по звездной динамике представляли себе в виде массивных шаров, необходимых для стабилизации холодных звездно-газовых дисков, теперь в численных моделях эволюции пространственного распределения темной материи обычно получают заметно *трех-*

осными. Это означает, что они не стабилизируют вложенные в них звездно-газовые диски, а, наоборот, приводят к развитию в них неосесимметричных возмущений: гонят по дискам спиральные ветви, «подкручивают» бары и соответственно перераспределяют газ по радиусу.

Второй класс «агентов» внутренней вековой эволюции не перераспределяет момент, а впрыскивает энергию в газовый компонент галактики. Источником энергии могут быть молодые массивные звезды: их звездный ветер вносит в газ кинетическую энергию, а затем эти звезды взрываются как сверхновые и дополнительно нагревают окружающую среду излучением. Другим источником разгона и разогрева газа могут быть джеты и «конусы ионизации» из активных ядер галактик. Все эти «агенты» способны регулировать историю звездообразования галактик: они эффективно разогревают газ и тем самым как минимум локально прекращают звездообразование, а в эпохи особо высокой их активности разогретый газ вообще может покидать галактику, что вызывает глобальную остановку формирования молодых звезд. Действие этих механизмов носит циклический характер с характерным временем порядка десятков или сотен миллионов лет: сначала звездообразование развивается и порождает молодые звезды, которые через некоторое время это же звездообразование и остановят.

Со вспышками звездообразования связывают и усиленное питание центральных черных дыр в галактиках, которое мы наблюдаем как проявление активности ядра. Поэтому в английском языке для остановки звездообразования молодыми звездами и активными ядрами употребляют термин «feedback» — обратная связь. Газ, разогретый молодыми звездами и уходящий из галактики, может застрять в массивном темном гало, смешавшись там с первичным горячим газом; постепенно он остынет и вернется в диск галактики, чтобы снова принять участие в звездообразовании. Характерное время таких циклов — порядка миллиарда лет, поэтому этот эффект также относят к вековой эволюции.

8.3.3. Внешняя вековая эволюция

Это тоже медленные процессы, сопровождающие галактику в неспешном ритме ее жизни, однако они порождены не внутренними свойствами галактики, а ее окружением, которое, вообще говоря, у разных галактик разное: более плотное, менее плотное или совсем пустоватое. Прежде всего, тут работают гравитационные эффекты, связанные с взаимодействием галактик. Мощности современных компьютеров (суперкомпьютеров!) уже хватает, чтобы изучить глобальные про-

явления этих эффектов, чем и занимаются сейчас весьма интенсивно теоретики-«модельеры».

Результаты таковы. Если в процессе моделирования мимо дисковой галактики прошла другая галактика сравнимой массы, да еще на небольшом расстоянии в десятки парсеков, да еще с небольшой скоростью — не более сотни-другой километров в секунду, — то в диске модельной галактики развиваются приливные эффекты: внешние части диска «тянутся» за возмущителем спокойствия, образуя при сильном взаимодействии «хвосты», «мосты» и приливные спирали, а в центре потревоженного диска формируется бар со всеми вытекающими отсюда последствиями, описанными в предыдущем разделе. Красивое американское слово *harassment* (приставание) употребляют сейчас как раз для таких парных отношений случайно или неслучайно сблизившихся галактик.

Крайний случай приливного взаимодействия — слияние галактик, когда «возмущитель спокойствия» не смог уйти от той, которую он потревожил. Слияния галактик подразделяют на большие (major) и малые (minor); условная граница между большими и малыми слияниями проходит по соотношению масс 1 : 5. Большие слияния разрушают звездные диски сливающихся галактик; это бурные события, упомянутые в верхнем правом углу нашей схемы (рис. 8.4). А малые слияния — как правило, это падения спутников на хозяйскую галактику — не разрушают звездный диск целиком, хотя и «греют» его, увеличивая в нем хаотические скорости звезд и газа. Упавший где-то на краю диска спутник под действием динамического трения «спиралит» к центру системы, теряя по пути (в основном под действием приливных сил) свои внешние части. При этом звездный диск «хозяина» не только приобретает вещество упавшего на него карлика, но и увеличивает дисперсию скоростей (т. е. хаотическое движение) своих собственных звезд по отношению к скорости упорядоченного вращения диска. От этого диск становится толще.

Отдельное малое слияние, если масса упавшего спутника была меньше 10% массы «хозяина», оставляет не очень заметные следы, но у любой большой галактики спутник, как правило, не один, и они падают в диск один за другим, скажем, раз в миллиард лет. Поэтому в схеме глобальной эволюции (рис. 8.4) малый мержинг рассматривается как медленный, вековой процесс: речь идет о сериях малых мержингов, которые постоянно греют звездный диск хозяйской галактики и снабжают его внешним материалом, как звездным, так и газовым, на протяжении миллиардов лет.

Снабжение диска галактики внешним газом на протяжении миллиардов лет — этот процесс часто называют «плавной аккрецией» — вообще отдельный и очень важный вопрос. Дело в том, что если оценить, надолго ли собственных запасов газа у близких спиральных галактик хватит для текущего в них звездообразования, т. е. поделить нынешнюю массу газа в диске на темп звездообразования, то в среднем получится всего 2–3 млрд лет. А ведь возраст самых старых звезд в диске нашей Галактики — около 9–10 млрд лет. Получается, что мы живем в некий выделенный момент времени: у нас на глазах заканчиваются запасы газа и завершается звездообразование в дисках спиральных галактик. Но это еще полдела. Если посмотреть на спиральные галактики вблизи красного смещения $z = 1$, то и там получается такая же картина: в ту эпоху запасов газа тоже хватало на 2–3 млрд лет тогдашнего звездообразования! Напрашивается вывод, что в диски спиральных галактик непрерывно добавляется газ извне. Более того, создается впечатление, что темп исчерпания газа на формирование молодых звезд примерно равен темпу аккреции газа извне; по крайней мере, среднее количество газа в дисках галактик не меняется с красным смещением, то есть не эволюционирует в последние 6–8 млрд лет.

Далее мы увидим, что и картину химической эволюции спиральных галактик, в частности и нашей галактики, невозможно построить без предположения о непрерывном притоке в диск галактики газа, бедного тяжелыми элементами. Все говорит о том, что продолжительная плавная аккреция холодного газа извне — это необходимое условие эволюции спиральных галактик. Проблема в том, что до сих пор не удается установить источник этого холодного газа и увидеть процесс его аккреции «живьем».

Когда космологи только-только сформулировали свою концепцию коллапса темных гало и вириализации барионов внутри них, они сказали: «Так вот же источник постоянной аккреции газа в диск!» Первичный, вириализованный в гало газ должен потихоньку излучать в рентгеновском диапазоне и от этого остывать, а остывая, он должен опускаться на диск галактики. Идея хорошая и красивая, но до сих пор не удается путем наблюдений зарегистрировать рентгеновские газовые гало вокруг массивных спиральных галактик. В скоплениях галактик рентгеновский газ виден; во многих группах галактик рентгеновский газ виден; вокруг самых массивных эллиптических галактик рентгеновские гало видны... а вокруг таких же массивных спиральных галактик рентгеновских гало нет. Правда, за послед-

ний год с помощью очень чувствительных, очень глубоких рентгеновских наблюдений удалось увидеть излучение горячего газа вокруг двух или трех спиральных галактик, но мощность этого излучения составляет лишь немногие проценты от того, что предсказывали космологические теории и что нужно иметь, чтобы внешней аккрецией обеспечить звездообразование в дисках этих галактик.

Таким образом, аккреция внешнего газа очень нужна: как агент внешней вековой эволюции она совершенно необходима. Но пока источник газа не найден, трудно оценить место аккреции, ее влияние, ее масштабы и зависимость от окружения галактики. Пока это область догадок.

8.3.4. Внешняя быстрая (бурная) эволюция

Вообще слияния галактик как единичные события — процесс быстрый, он завершается полностью примерно за 1 млрд лет. Слияния двух галактик сравнимых масс — это бурный процесс, полностью перекраивающий структуру обеих галактик. Расчеты показывают, что слияние двух типичных спиральных галактик с холодными дисками, в которых доминирует упорядоченное вращение, приводит в итоге к формированию одного звездного сфероида, в котором упорядоченного вращения почти нет, а вся кинетическая энергия звезд заключена в их хаотическом движении.

Радиальный профиль поверхностной яркости в таких смоделированных продуктах большого мерджинга очень похож на де-вокулёровский, так что в слиянии двух спиральных галактик действительно рождается типичная эллиптическая галактика. При этом звездная система испытывает бурную релаксацию, так что звезды полностью перемешиваются по объему, и если в исходных галактиках и существовали какие-то радиальные градиенты, например градиент металличности звездных населений, то в финальном продукте мерджинга они размываются. Расчеты показывают, что эллиптическую галактику с градиентом металличности круче, чем 0,3 dex per dex (убывание в два раза на протяжении увеличения расстояния от центра на порядок), невозможно построить в модели большого мерджинга.

Если в сливающихся галактиках был газ — а в типичных спиральных галактиках примерно 5% массы диска содержится в холодном газе, — то в процессе большого слияния основной газ, в сумме несколько миллиардов солнечных масс, скапливается в самом центре финального продукта, внутри радиуса меньше 1 кпк. Поэтому там ожидается мощная короткая вспышка звездообразования, длительно-

стью около 100 млн лет, после которой остается плотное звездное ядро, а иногда, если взаимные ориентации моментов импульса изначально были благоприятны, формируется компактный холодный диск. Обратный эффект от этой вспышки звездообразования добавляет энергии в оставшийся газовый компонент, и остатки газа вымываются из получившейся сфероидальной галактики на периферию ее темного гало (вот они, рентгеновские гало эллиптических галактик!) В итоге получается сфероидальная медленно вращающаяся звездная система без газа, но, возможно, с относительно молодым ядром. Таким образом, при диссипативном мерджинге по возрасту звездного населения в центре эллиптической галактики можно датировать момент слияния.

Другой быстрый процесс, связанный с попаданием галактики в плотное окружение, — удаление холодного газа из ее диска под действием напора горячей межгалактической среды: гидродинамические механизмы действуют на временных масштабах всего десятки миллионов лет. В скоплениях галактик, массы которых достигают (10^{14} – 10^{15}) $M_{\odot}$, большая часть барионов находится не в самих галактиках, а в горячей газе между ними. Фактически это не просто газ, а полностью ионизованная плазма — источник рентгеновского излучения. Частицы межгалактической среды — электроны, протоны, ядра атомов — движутся с теми же вириальными скоростями, что и сами галактики ($\sim 10^3$ км/с), а значит, имеют температуру в десятки и сотни миллионов кельвинов.

Особенно высоки температура и плотность межгалактической среды в центральной части скопления. Если в этот «горячий бассейн» с периферии скопления влетает спиральная галактика, имеющая собственный холодный газ в диске, то горячий межгалактический газ начинает взаимодействовать с холодным газом диска галактики. Это астрофизики (в числе первых были Джеймс Ганн и Ричард Готт) поняли сразу, как только рентгеновские обзоры обнаружили горячий газ в скоплениях, т. е. в начале 1970-х гг. С тех пор эти идеи только развиваются и просчитываются; появились и немногочисленные пока прямые наблюдательные подтверждения такого взаимодействия. Горячий газ может обжимать и испарять холодный газ в диске неподвижной галактики — это статический эффект. А если галактика движется сквозь горячий газ, он будет сдувать ее газовый диск лобовым давлением (P): этот динамический эффект по-английски называется *ram pressure*; его эффективность зависит не только от плотности межгалактической среды (), но и от скорости движения галактики сквозь

нее (v), причем если от плотности зависимость линейная, то от скорости — квадратичная: $P = v^2$.

Наблюдательными подтверждениями влияния горячего межгалактического газа на газовые диски галактик в первую очередь считается в среднем меньшее содержание нейтрального водорода в спиральных галактиках скоплений по сравнению с такими же по массе и типу спиральными галактиками поля. Кроме этого, получено несколько впечатляющих карт радиоизлучения галактик в скоплении Virgo, явно намекающих на действие динамического напора межгалактического газа. На одной из таких карт (рис. 8.5) мы видим практически «с ребра» галактику NGC 4402 типа Sc, которая, судя по внешним признакам, испытывает лобовое давление набегающего на нее горячего межгалактического газа, сквозь который она летит. Распределение радиоизлучения на этих картах показано в виде эквиденсит — линий, соединяющих точки с одинаковой поверхностной яркостью. Газовый слой в диске галактики (HI), а также связанная с ним пыль (видна как полоса повышенного показателя цвета $B-R$ на нижней картинке), заметно искривлены. Края диска «сдуты» сильнее, поскольку в них ниже поверхностная (в проекции на диск) плотность газа. Также несимметричным выглядит и распределение поверхностной яркости синхротронного радиоконтинуума, вероятно связанного с магнитным полем диска галактики. Множество деталей (рис. 4 цветной вкладки) указывает на поток межгалактического газа, набегающий на эту галактику с юго-востока (на рисунках — снизу вверх и вправо).

Пример галактики NGC 4402 вовсе не уникален. В том же скоплении Virgo среди дисковых галактик, ориентированных к нам ребром, легко найти и другие подобные примеры. На рис. 8.6 показана галактика NGC 4522 типа Scd, внешние признаки которой также указывают на сильное лобовое давление набегающего на нее горячего межгалактического газа. Газовый слой в диске галактики (HI) заметно искривлен. Несимметричным выглядит и распределение поверхностной яркости эмиссионной линии H α , указывающей области текущего звездообразования: молодые звезды формируются вне основного диска галактики, в газе, «сдутом» лобовым давлением межгалактической среды.

По-видимому, такие галактики впервые пролетают через центральную область скопления: края их газовых дисков загибаются в сторону, противоположную предполагаемому направлению движения галактики, явно под действием лобового давления межгалактической среды. При этом в центральной части газового диска галактики

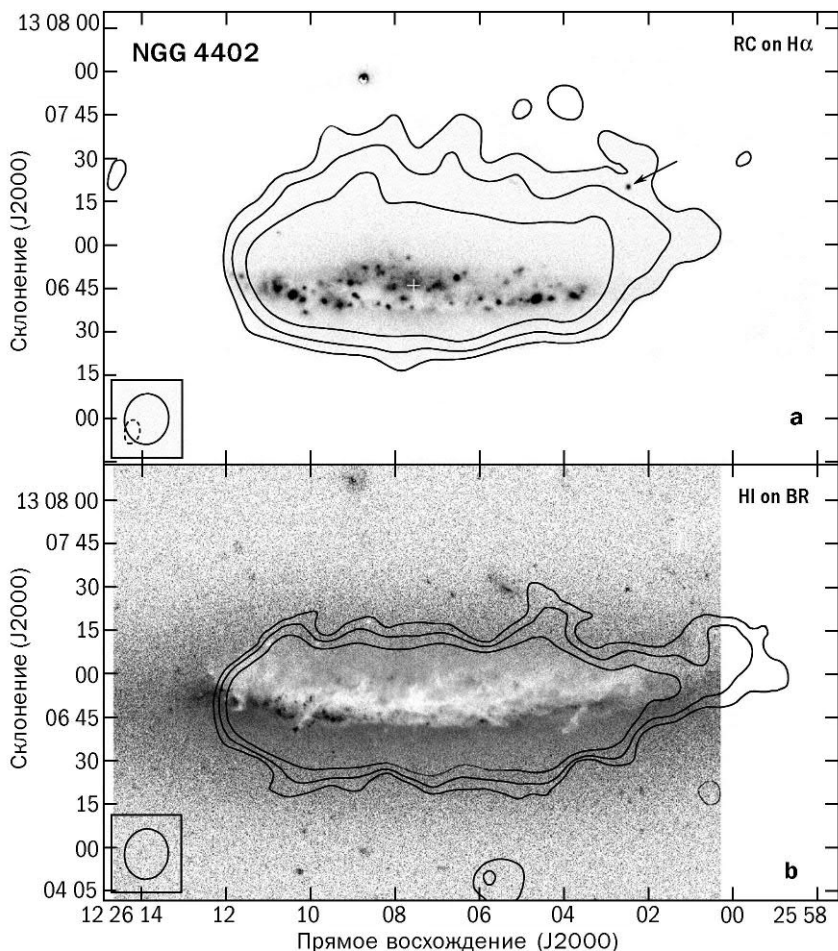


Рис. 8.5. Галактика NGC 4402, наблюдаемая недалеко от центра скопления Virgo: *a* — эквиденситы излучения в радиоконтинууме 1,4 ГГц наложены на оптическое изображение (негатив) в линии H; стрелкой указана область HII, расположенная высоко над плоскостью галактики; *b* — эквиденситы излучения нейтрального водорода (HI) наложены на оптическое изображение в голубом цвете (негатив B-R). Из работы: Crawl et al. // Astron. J. 2005. Vol. 130. P. 65–72.

усиливается звездообразование; расчеты показывают, что лобовое давление горячей среды, удаляя газ из внешней половины газового диска, не может удалить центральную часть газового диска, а только сжимает ее. В результате звездообразование в центрах таких спиральных галактик может кратковременно усиливаться в несколько раз, что

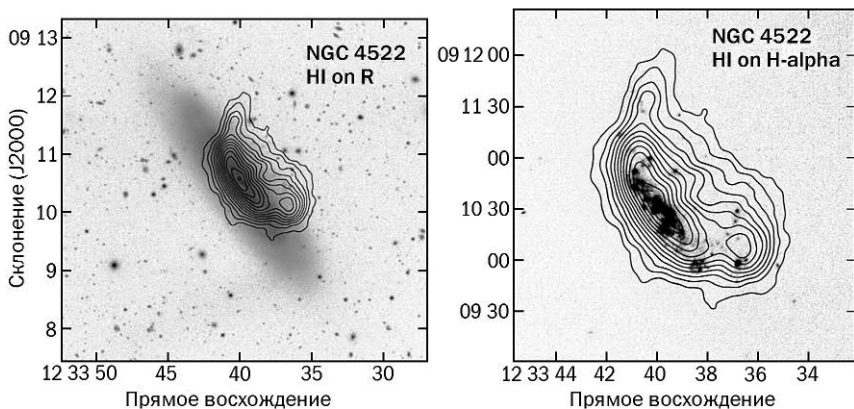


Рис. 8.6. Галактика NGC 4522, наблюдаемая недалеко от центра скопления Virgo. Слева: эквиденситы излучения нейтрального водорода (HI) наложены на оптическое негативное изображение в красных лучах (фильтр R). Справа: эквиденситы излучения нейтрального водорода (HI) наложены на оптическое негативное изображение в линии H α . Из работы: Roediger E. // Astron. Nachr. 2009. Vol. 330. P. 888–898.

явно видно у галактики NGC 4402 по избыточному количеству молодых звездных скоплений у южного и юго-восточного краев диска, а также у NGC 4522 во всей внутренней области диска. Вспышка звездообразования в центральной области дисковой галактики в дальнейшем может вызвать наращивание балджа, что приведет к изменению внешнего вида галактики в сторону более ранних морфологических типов.

8.3.5. Микроэволюция: звездообразование

Звезды образуются из газа — путем сжатия и фрагментации газового облака под действием самогравитации, как учил нас великий Джеймс Джинс. Поэтому логично было бы ожидать зависимости темпа звездообразования от количества газа: чем больше газа — тем больше должно рождаться молодых звезд. Руководствуясь этой идеей, Мартен Шмидт в 1959 г. подсчитал количество массивных, а значит, заведомо молодых ОВ-звезд в тех близких к Солнцу областях Галактики, где была измерена плотность межзвездного нейтрального (атомарного) водорода, и сравнил эти две характеристики — *объемную* плотность межзвездного водорода n_{H} и темп звездообразования SFR (star formation rate), т. е. суммарную массу молодых звезд, родившихся в единице объема пространства за единицу времени. Шмидт обнаружил

тесную связь между этими характеристиками, выраженную квадратичной зависимостью: $SFR \propto n_{\text{HI}}^2$.

В дальнейшем зависимость темпа звездообразования от количества газа проверяли уже на других галактиках. В отличие от исследования нашей галактики, в которой всегда остается большая неопределенность с расстояниями (следовательно, и с констатацией физической связи между молодыми звездами и конкретным газовым облаком), в других галактиках локализация областей звездообразования в областях повышенной плотности газа не вызывает сомнений. Классическим исследованием на эту тему стала серия работ Роберта Кенниката с соавторами. Они определяли локальную интенсивность звездообразования в различных областях дисков спиральных галактик по потоку излучения в эмиссионной линии водорода H α , возбуждаемой, как известно, звездами массивнее 10 $M_{\odot}$ (то есть абсолютно молодыми), и сравнивали ее с *поверхностной* плотностью водорода (Σ_{H}) в проекции на картинную плоскость («плоскость» неба). Зависимость была обнаружена, причем особенно явная в том случае, если брать суммарную плотность атомарного и молекулярного водорода. Но показатель степени у этой зависимости оказался поменьше, чем в работе Шмидта: $SFR \propto \Sigma_{\text{HI} + \text{H}_2}^{1.4}$. Последнюю формулу стали называть законом Кенниката–Шмидта, хотя у одного из них в формуле фигурирует объемная плотность газа, а у другого — поверхностная, и показатели степени у них разные...

Закон Кенниката–Шмидта — это чисто эмпирическая зависимость. Попытки осмыслить ее с точки зрения физики звездообразования подвели исследователей к тому, чтобы все-таки разделить плотности молекулярного и нейтрального водорода: ведь в нашей галактике мы непосредственно наблюдаем, как звезды формируются внутри молекулярных облаков, поэтому связь темпа звездообразования с плотностью молекулярного водорода, по логике вещей, должна быть более тесной. Другое дело, что факторы, превращающие атомарный водород в молекулярный, еще не до конца поняты: связь между локальной плотностью атомарного и молекулярного водорода может зависеть от свойств галактики и даже от ее окружения. Современные работы, в которых исследуется связь между *отдельно* атомарным и *отдельно* молекулярным газом и звездообразованием, показывают, что, как и ожидалось, корреляция темпа звездообразования с плотностью молекулярного газа выше, чем атомарного, но степень этой зависимости не так высока, как считалось ранее: темп звездообразования пропорционален *первой* степени плотности молекулярного газа: $SFR \propto \Sigma_{\text{H}_2}$.

Очевидно, показатель степени «1» превращается в «1,4» при переходе от плотности молекулярного газа к суммарной плотности молекулярного и атомарного газа потому, что где-то в этой зависимости еще замешана физика превращения атомарного газа в молекулярный, которая может быть связана с дополнительной стимуляцией процесса звездообразования. Например, ударные волны, возбужденные первыми из родившихся звезд, стимулируют переход атомарного газа в молекулярный, а того — в звезды.

Дополнительным условием проявления зависимости Кенниката—Шмидта является наличие так называемого порога плотности газа, ниже которого звездообразование вообще не идет, даже если газ есть. Этот порог — около $7 M_{\odot}$ на квадратный парсек — обнаружил Кенникат, который определял интенсивность звездообразования по потоку в эмиссионной линии H, которая, как было сказано, возбуждается лишь самыми массивными звездами ($M > 10 M_{\odot}$). Однако после работы Кенниката космический телескоп GALEX провел обзор галактик в ультрафиолетовых лучах, что позволило измерить интенсивность звездообразования в различных частях этих галактик (в УФ-излучение дают вклад даже звезды массой от 4 до $10 M_{\odot}$). Выяснилось, что звездообразование идет в самых неожиданных местах — например, на дальних окраинах галактических дисков, где вовсе нет (не обнаружено) молекулярного газа, а виден только нейтральный водород с плотностью ниже порога Кенниката. Тот же самый «уход» под порог Кенниката был обнаружен и в недавнем обзоре звездообразования в карликовых неправильных галактиках. Вопрос: не является ли мода звездообразования в газе низкой плотности существенно отличной по физике от моды звездообразования в плотном газе? Ответа пока нет.

Не вполне ясно и то, могут ли внешние факторы стимулировать звездообразование. С одной стороны, гравитационное или гидродинамическое взаимодействие должно сжимать газ и таким образом провоцировать усиление звездообразования. С другой стороны, гравитационные эффекты динамически греют газ, а гидродинамическое давление может вообще удалить плотный и холодный газ из диска галактики; так что звездообразование, если оно шло, может даже прекратиться под внешним воздействием.

Статистика наблюдательных данных так же неоднозначна, как и теоретические аргументы. Единственное, что надежно установлено: в очень плотном окружении, например в центрах скоплений галактик, звездообразование действительно подавлено. С другой стороны, мно-

гочисленные попытки заметить усиление звездообразования, например в парах галактик сходных масс, где гравитационные приливы существенны, приводят к слабopоложительному результату только для очень тесных пар, где расстояние между галактиками (в проекции) меньше 30 кпк. Это довольно странно: мы же знаем, что гравитация — дальнедействующая сила...

8.3.6. Микроэволюция: изменение химического состава

В наследство от Большого взрыва нам достались только самые легкие химические элементы: водород (75% по массе), гелий (около 25%) и совсем чуть-чуть дейтерия, лития и бериллия. Вся остальная таблица Менделеева была синтезирована в ядерных реакциях за последующие 13,8 млрд лет, причем всю эту продукцию, вероятно, произвели звезды, поскольку все наблюдаемые нами природные реакторы ядерного синтеза сейчас связаны именно с ними. Теория химической эволюции галактик разработана детально и покоится на могучем фундаменте ядерной физики, снабдившей астрохимиков темпами и условиями протекания различных реакций, сечения которых измерены очень точно в лабораторных экспериментах.

На основной стадии эволюции всех звезд — на главной последовательности — в звездах «горит» водород, превращаясь в гелий-4. В конце концов в центре звезды образуется гелиевое ядро, а водород продолжает гореть в слоевом источнике вокруг плотного ядра; на этом этапе звезда покидает главную последовательность, устремляясь, если она маломассивная, в гиганты, а если массивная — то в сверхгиганты. На определенной стадии эволюции — на вершине ветви гигантов — в ядре загорается гелий; он постепенно превращается в углерод ($3\,{}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \gamma$), затем в кислород (${}^{12}_6\text{C} + \text{He} \rightarrow \text{O} + \gamma$), затем — в целый ряд химических элементов вплоть до титана (${}^{44}_{22}\text{Ti}$), атомная масса ядер которых кратна четырем. Последовательный синтез таким механизмом далее невозможен, поскольку более тяжелые элементы с массой, кратной четырем, начиная уже с титана, несмотря на большую энергию связи их ядер, оказываются радиоактивными, т. е. подвержены распаду. Но есть обходные пути: «проскочив» чуть дальше, можно получить нестабильные изотопы более тяжелых элементов, которые при распаде дают устойчивые изобары. Например, хром ${}^{48}_{24}\text{Cr}$ распадается в стабильный изотоп титана ${}^{48}_{22}\text{Ti}$.

Элементы C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca и Ti, учитывая их происхождение, называют альфа-элементами, поскольку они образуются из гелия, ядра которого, как известно, называют альфа-частицами (азот образу-

ется из углерода и кислорода при их взаимодействии с протонами). Новые элементы накапливаются в центрах массивных звезд, пока те живы и эволюционируют. После смерти звезды-родителя и выброса ее вещества при взрыве сверхновой типа II эти элементы поступают в окружающую среду и позже входят в состав звезд следующего поколения. В центрах массивных звезд, в процессе горения гелия, затем углерода, кислорода и т. д., образуются элементы вплоть до «железного пика», а всё, что тяжелее железа и никеля, формируется в процессе захвата нейтронов — либо медленного (s-процесс), либо быстрого (r-процесс).

Самая популярная сейчас идея о локализации процесса захвата нейтронов предполагает, что медленный захват происходит в звездах небольших масс на стадии асимптотической ветви гигантов, когда в звезде горит слоевой источник. На этом этапе в центре звезды располагается углеродное ядро, вокруг него горит гелий, а ближе к поверхности горит водород, и вся эта конструкция настолько неустойчива, что непрерывно судорожно перемешивается. В относительно близкие к поверхности звезды «карманы» из центра попадает богатый нейтронами углерод-13 и снабжает медленными нейтронами (например, так: $^{13}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + n$) все реакции, в которых образуются элементы с атомным весом от 60 до 200. А быстрый захват нейтронов происходит при взрывах сверхновых типа II. Сверхновые типа Ia производят почти исключительно радиоактивный никель, который затем распадается в железо: «конечный продукт» такого взрыва — половина солнечной массы чистого железа на одну сверхновую типа Ia.

Из-за того, что разные элементы рождаются в звездах разной массы, которые эволюционируют с разной скоростью (т. е. выбрасывают вновь созданные элементы через разные промежутки времени), в разных моделях химической эволюции — прежде всего в моделях с разными историями звездообразования — могут получаться разные соотношения обилия химических элементов. Самая популярная сейчас мера длительности эпохи звездообразования — соотношение обилий магния (или кислорода) и железа. Альфа-элементы, в число которых входят кислород и магний, производятся массивными звездами ($M > 10 M_{\odot}$), которые живут всего 10 млн лет. Это означает, что вновь синтезированные альфа-элементы поступят в «общее пользование», т. е. в межзвездную среду, всего через 10 млн лет после начала вспышки звездообразования, когда массивные звезды дружно вспыхнут как сверхновые II типа. По сравнению со временем жизни галактики 10 млн лет — это практически мгновение. Поэтому для расчета эволюции альфа-элементов подходит приближение «мгновенного возвра-

та»: можно считать, что новое поколение массивных звезд лишь только образовалось и в то же мгновение выдало новую свежесинтезированную порцию альфа-элементов.

Совсем иное дело — железо или азот, которые синтезируются в основном звездами средних масс. Как мы знаем, основной производитель железа — сверхновые типа Ia. Это двойные звездные системы, где один из компонентов — белый карлик; он-то и взрывается как сверхновая, притянув к себе вещество с соседней звезды. Белый карлик — конечная стадия эволюции звезды с начальной массой менее $8 M_{\odot}$. А поскольку маломассивных звезд больше, чем массивных, предками белых карликов в большинстве случаев бывают относительно маломассивные звезды. Потому интенсивное рождение белых карликов происходит лишь через несколько миллиардов лет после начала звездообразования. Поэтому основная доля взрывов сверхновых типа Ia происходит только через 2–3 млрд лет после начала вспышки звездообразования. Если же процесс звездообразования к тому моменту в данной области уже закончился, что весьма вероятно, то новорожденное железо не войдет в состав звезд следующих поколений.

Получается, что если вспышка звездообразования длилась, например, 1 млрд лет, вновь синтезированный магний успел войти в молодые звезды, а вновь синтезированное железо не успело. От этой вспышки остается поколение звезд, в которых магния в 2–3 раза больше по отношению к железу, чем в атмосфере нашего Солнца. Ведь солнечное соотношение элементов характерно для длительного непрерывного звездообразования в течение 8–10 млрд лет — такая уж история рождения звезд в диске нашей Галактики. А вот в гигантских эллиптических галактиках логарифмическое отношение $[Mg/Fe] = 0,3-0,5$, т. е. в 2–3 раза больше солнечного. Это означает, что звезды гигантских эллиптических галактик родились в короткой вспышке звездообразования, продолжавшейся менее 1 млрд лет.

Ныне модели химической эволюции галактик хорошо разработаны. Рафинированные модели требуют детального численного расчета, но есть и более простые модели, допускающие аналитическое решение. Например, еще в середине 1960-х гг. была предложена простая модель эволюции галактики, в которой химический состав межзвездного газа и молодых звезд описывается единственной переменной — металличностью, т. е. относительным содержанием суммы всех элементов тяжелее гелия. Поскольку тяжелые элементы производятся в большем количестве, чем потребляются, ясно, что эта переменная со временем должна только возрастать. Как и положено про-

стой модели, она основывается на нескольких упрощающих допущениях:

- замкнутость (closed box): полная масса вещества в изучаемой области пространства сохраняется; вещество в нее не втекает и не вытекает;
- нулевые начальные условия: в начальный момент времени металличность газа равна нулю, а звезд вообще нет, т. е. эволюция стар-тует с газа первичного химического состава;
- однородность: газ постоянно хорошо перемешивается по всему объему, поэтому все звезды, рождающиеся в разных частях пространства в один и тот же момент времени, имеют одинаковую металличность, характерную в этот момент для газа системы;
- приближение «мгновенного возврата»: поскольку тяжелые элементы производятся в основном массивными звездами, то считается, что только что образовавшееся поколение звезд тут же выбрасывает синтезированные в них тяжелые элементы;
- постоянная во времени начальная функция масс звезд. Задавая солпитерову начальную функцию масс звезд ($dN/dM \propto M^{-2,35}$) и предполагая, что звезды с начальной массой до $8 M_{\odot}$ оставляют после себя белый карлик, а более массивные — нейтронную звезду, получаем долю массы каждого поколения звезд, навсегда «запертую» в маломассивных звездах и темных остатках эволюции массивных звезд: 80%.

Обозначения:

$S(t)$ — общая масса (относительная) всех звезд, родившихся к моменту t ;

$\mu(t)$ — относительная масса газа в системе в данный момент t ;

$\alpha = 0,8$ — доля массы каждого поколения, запертая в долгоживущих объектах; $\beta = 1 - \alpha = 0,2$ — доля массы каждого поколения, мгновенно возвращаемая в межзвездную среду в ходе эволюции;

p — доля массы каждого поколения, преобразованная в новые тяжелые элементы, выброшенные затем наружу; p / p_0 — относительный выход («yield») тяжелых элементов; согласно самым общим прикидкам, $p = 0,01-0,02$.

Закон звездообразования Кенниката—Шмидта: $dS/dt = A\mu^n$; тогда начальное характерное время звездообразования $\tau_0 = (\alpha A)^{-1}$.

Модель химической эволюции галактики всегда включает в себя совместное решение двух уравнений сохранения: уравнения сохранения общей массы и уравнения сохранения массы тяжелых элементов (или одного из них). В «простой» модели решаем эти уравнения аналитически. Итак, уравнение сохранения массы:

$$\mu = 1 - \alpha S,$$

$$d\mu = -\alpha dS,$$

$$\frac{d}{dt} \ln \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} = -\frac{dS}{dt}.$$

Теперь перейдем к уравнению баланса относительной массы тяжелых элементов в газе ($Z\mu$): убыль — ушли в новое поколение звезд вместе с газом; прибыль — выброс старых элементов, вошедших в звезды в предыдущем акте звездообразования вместе с газом, плюс вновь синтезированные тяжелые элементы:

$$d(Z\mu) = p dS + Z(\beta - p) dS - Z dS,$$

$$\frac{d(Z\mu)}{dS} = p(1 - Z) - Z,$$

$$\frac{dZ + Z d\mu}{dS} = Z - p(1 - Z),$$

$$\frac{dZ + Z dS}{dS} = Z - p(1 - Z),$$

$$\frac{dZ}{dS} = p(1 - Z).$$

Делаем в левой части подстановку из первого уравнения для $\alpha dS/\mu$ и получаем:

$$\frac{dZ}{d \ln \frac{1}{\mu}} = p(1 - Z) - p,$$

$$Z = p \ln \frac{1}{\mu}.$$

независимо от показателя степени n в законе Шмидта! Если положить $n = 1$, то в «простой» модели металличность звездной системы линейно растет со временем, а после полного исчерпания газа средняя металличность звезд $Z = p$. Вот потому «выход» тяжелых элементов и оказался так близок к солнечной металличности $Z_{\odot} = 0,02$.

Понятно, что многие допущения простой модели далеки от реальности. Например, допущение мгновенного возврата справедливо только в отношении эволюции химических элементов, синтезируемых в са-

мых массивных звездах: время жизни таких звезд пренебрежимо мало по сравнению с возрастом галактик или, что еще важнее, по сравнению с динамическим временем массивных звездных систем. Действительно, эти звезды «выплывают» вновь синтезированные элементы практически мгновенно после своего формирования. Таким образом, приближением мгновенного возврата можно пользоваться, если рассматривается эволюция обилия магния или кислорода. Однако уже в отношении азота это приближение несправедливо, поскольку он формируется в звездах сравнительно небольшой массы (от 3 до $8 M_{\odot}$) на поздних стадиях их эволюции, т. е. спустя от $3 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^7$ лет после их рождения, что вполне сопоставимо с динамическим временем Галактики ($\sim 10^8$ лет). А уж когда речь идет о железе, основным поставщиком которого служат сверхновые типа Ia (характерное время от образования «предшественника» до взрыва от 1 до 3 млрд лет), то приближение мгновенного возврата дает совершенно нереалистичную картину эволюции. Таким образом, элементарное сопоставление длительности жизни источников синтеза элементов указывает, что необходимо пересмотреть допущение мгновенного возврата.

Немного сложнее обстоит дело с приближением «замкнутой системы». В самом деле, если рассматривать целиком галактику, которая к тому же не является взаимодействующей, почему бы ей не быть замкнутой? Поначалу модели химической эволюции, даже численные, а не только аналитические, пытались развивать в рамках приближения замкнутости системы, и только очевидные неудачи такого подхода при попытках объяснить наблюдательные данные заставили «модельеров» отказаться от этого приближения.

Действительно, замкнутость системы, как показывает простая модель, приводит к тому, что современная металличность галактики однозначно связана с относительным количеством газа в ней. Когда газ полностью исчерпывается, средняя металличность звезд в галактике однозначно приходит к значению «выхода», а поскольку «выход» примерно равен $Z_{\odot}$, это означает, что все галактики, исчерпавшие газ, должны иметь одну и ту же, а именно солнечную, металличность. Но как тогда быть с корреляцией «светимость—металличность» для эллиптических галактик?

Еще более потрясающий факт: хотя из самых общих соображений содержание тяжелых элементов должно со временем расти в любой звездообразующей галактике, в нашей галактике отсутствует корреляция «возраст—металличность» у звезд тонкого диска! Только отменив приближение «замкнутой системы», можно побороть это

противоречие. Для нашей галактики успешной моделью химической эволюции, объясняющей почти постоянную металличность звезд тонкого диска на протяжении всей его эволюции (так называемый парадокс G-карликов), оказалась модель с постоянным «плавным» притоком извне газа, относительно бедного тяжелыми элементами. Эта добавка чистого газа, но не тяжелых элементов, компенсирует звездный нуклеосинтез в диске, постоянно «разбавляя» тяжелые элементы и сохраняя их концентрацию в межзвездной среде почти постоянной.

8.4. Спектрофотометрическая эволюция звездных систем

История звездообразования галактики оставляет свой след в ее интегральных цветах и интегральном спектре. Звезды разной массы, разного возраста и, вероятно, разного химического состава складывают свои спектры в общую «копилку» — в интегральный (общий) спектр своей галактики, в котором можно выделить характерные детали, намекающие нам на историю происхождения и эволюции этой звездной системы. Поэтому один из самых эффективных методов исследования эволюции галактик по материалам детальных наблюдений самых близких из них — это анализ их интегральных спектров с помощью моделей эволюционного синтеза.

Придумала этот метод американский астрофизик Беатрис Тинсли (Beatrice Tinsley, 1941–1981), когда училась в аспирантуре у Жерара де Вокулёра. Такое вовсе не редкость с талантливыми аспирантами: шеф ставит одну задачу для диссертации, а аспирант, вникнув в суть дела, обнаруживает, что задача не решается или, по крайней мере, не решается в рамках предложенных шефом подходов. И вместо того, чтобы «делать, как говорят», аспирант вдруг изобретает совершенно новый подход, который в итоге применяет к совершенно другим задачам.

Так было и в истории с эволюционным синтезом. Де Вокулёр хотел, чтобы аспирантка оценила параметр замедления расширения Вселенной по суммарным подсчетам галактик до определенной звездной величины, а аспирантка обнаружила, что неизвестная пока спектрофотометрическая эволюция галактик в течение последних 10 млрд лет полностью поглощает и замыкает космологические эффекты. И Беатрис Тинсли придумала метод эволюционного синтеза интегральных спектров, который позволяет смоделировать спектр галактики на основе заданных эволюционных параметров ее звездного населения. Она же первая и применила этот метод к близким галактикам разных морфо-



Рис. 8.7. Беатрис Тинсли.

логических типов. Это были все те же золотые 1970-е годы; именно тогда впервые астрономы много узнали о происхождении и эволюции галактик по их интегральным цветам и спектрам.

Основная идея эволюционного синтеза состоит в том, что сначала создается электронная библиотека спектральной светимости реальных звезд (L) различной начальной массы, начального химического состава и возраста, а затем эти величины суммируют по определенному алгоритму с целью воспроизвести спектральную светимость наблюдаемой галактики (L_{gal}). Разумеется, этот алгоритм дол-

жен иметь теоретическое обоснование, т. е. он должен опираться на наше представление о том, какие звезды и в каком количестве формируются на каждом этапе эволюции галактики и как эти звезды в ходе своей индивидуальной эволюции изменяют свой спектр и светимость. Если в результате этой работы удастся воспроизвести наблюдаемый спектр галактики, значит, есть шанс, что мы правильно представляем историю жизни этой звездной системы. Формально это выглядит так:

$$L_{gal} = \int_0^{t_{gal}} \int_{M_{min}}^{M_{max}} L_*(M, t) N_*(M, t) dM dt,$$

где $N(M, t)$ — количество звезд начальной массы M и возраста t . Верхний предел интегрирования по возрастам звезд — это, естественно, возраст галактики (t_{gal}): тут мы считаем, что галактика образовалась тогда, когда в ней родились самые первые звезды. Это не вполне вписывается в «иерархическую концепцию»: там возраст галактики начинает отсчитываться с момента, когда она приобрела больше половины окончательного количества своих звезд, но метод эволюционного синтеза был сформулирован гораздо раньше, чем возникла иерархическая концепция.

Пределы интегрирования по массам звезд обычно берутся до некоторой степени произвольно, например: $M_{\min} = 0,1 M_{\odot}$ и $M_{\max} = (60-100) M_{\odot}$; как показал опыт, на результаты моделирования этот выбор сильно не влияет. Что касается L , (M, t) , т. е. спектральной светимости звезды массы M и возраста t , то она рассчитывается из теории эволюции звезд, поэтому сам метод и называется эволюционным синтезом. Теория эволюции звезд обеспечивает расчет эволюционного трека звезды массы M на диаграмме $(L_{\text{bol}}, T_{\text{eff}})$, если задан начальный химический состав звезды, (X, Y, Z) ; где X — относительное (по массе) содержание водорода, Y — содержание гелия и Z — содержание всех химических элементов тяжелее гелия, которые, как мы знаем, астрономы для краткости называют просто «металлами». Солнечный химический состав с точностью до 1% таков: $X_{\odot} = 0,73$; $Y_{\odot} = 0,25$; $Z_{\odot} = 0,02$. У большинства звезд $Z \leq Z_{\odot}$. Параметр Z , будучи самым маленьким из трех, тем не менее оказывает основное влияние на эволюцию звезды, так как контролирует прозрачность ее атмосферы.

В целом эволюция светимости и температуры (цвета) звезд хорошо известна: 90% жизни, пока в ядре горит водород, звезда проводит на главной последовательности, очень медленно и в целом незначительно увеличивая свою светимость и температуру. Затем, когда образуется гелиевое ядро и водород горит уже вокруг него (в слоевом источнике), звезда довольно быстро поднимается вдоль ветви гигантов. Достигнув ее вершины, в момент загорания гелия в ядре («гелиевая вспышка»), звезда сбрасывает верхние слои атмосферы и спускается на горизонтальную ветвь. Если звезда маломассивная и/или бедная металлами, то она попадает на голубую (более горячую) часть горизонтальной ветви, а на красную ее часть попадают звезды более массивные и/или с большим содержанием металлов.

Дальнейшие стадии эволюции — асимптотическая ветвь гигантов, пост-асимптотическая и протопланетарная стадии — наступают по мере загорания и исчерпания все более тяжелых элементов в ядре звезды и протекают очень быстро. Конечный продукт эволюции звезды зависит от ее начальной массы. При начальной массе менее $8 M_{\odot}$, учитывая последующие потери вещества, звезда превращается в белый карлик массой $0,6-0,7 M_{\odot}$. При начальной массе звезды более $8 M_{\odot}$ она превращается (также после значительных потерь вещества) в нейтронную звезду массой около $1,4 M_{\odot}$. А самые крупные звезды массой более $40-60 M_{\odot}$, вполне возможно, в конце жизни коллапсируют в черные дыры.

Вклад тех или иных стадий эволюции звезд в интегральную болометрическую светимость звездной системы (галактики) определяется балансом между светимостью звезды на этой стадии и длительностью ее пребывания на ней. Переход от болометрической светимости звезд, которая берется из теоретических расчетов эволюционных треков, к наблюдаемой величине — монохроматической светимости, соответствующей конкретной длине волны в спектре или конкретному спектральному диапазону (фотометрической полосе), осуществляется через значение эффективной температуры поверхности звезды (T_{eff}) и зависящих от нее болометрических поправок. Начальная металличность звезд, определяющая систему эволюционных треков для некоторого дискретного набора начальных звездных масс, является одним из главных параметров модели эволюционного синтеза интегральной светимости галактики. Как правило, начальная металличность фиксируется для звездных поколений разных возрастов. Мы же помним, хотя и не перестаем этому удивляться, что модели с фиксированной металличностью лучше соответствуют наблюдаемым спектрам галактик — как спиральных, так и эллиптических, — чем модели, в которых металличность растет со временем. В нашей галактике это также проявляется в виде известного парадокса G-карликов. Очевидно, это общее, широко распространенное свойство галактик.

Другие главные параметры модели «защиты» в нормирующем коэффициенте $N(M, t)$ — числе звезд массы M и возраста t в галактике. Обычно при моделировании переменные разделяют: $N(M, t) = IMF(M) \cdot SFR(\tau)$, где $IMF(M)$ — начальная функция масс (Initial Mass Function) звезд, т. е. распределение звезд по массам в каждом вновь рождающемся поколении, а $SFR(\tau)$ — темп звездообразования (Star Formation Rate) в галактике, когда с момента ее рождения прошло τ лет, где $\tau = t_{\text{gal}} - t$. Такое разделение переменных предполагает, что IMF не эволюционирует со временем; это упрощающее предположение. Что касается наших эмпирических представлений об IMF , то у них счастливая судьба: они практически не менялись последние 50 лет. Эдвин Солпитер (E. E. Salpeter) измерил IMF в 1955 г. по относительно небольшой выборке звезд в окрестностях Солнца в интервале масс от 1 до $10 M_{\odot}$; у него получился степенной закон $dN/dM \propto M^{-2.35}$. Как ни пытались с тех пор на больших выборках и более рафинированными методами уточнить этот результат, он устоял практически в исходном виде. Похоже, закон Солпитера имеет в основе какую-то фундаментальную физику звездообразования. В самом общем слу-

чае при эволюционном синтезе используют $IMF \propto M^{-\alpha}$, где α — параметр модели.

Что касается глобальной истории звездообразования, SFR , то исторически сложилось так, что ее параметризуют экспонентой: $SFR \propto \exp(-\tau/\tau_0)$, где τ_0 — характерное время трансформации газа в звезды (параметр модели). Почему именно экспонентой? В самой простой модели, если система замкнутая, газ протогалактики постепенно исчерпывается, переходя в звезды, и из физического здравого смысла следует, что интенсивность звездообразования в галактике должна монотонно убывать со временем. Закон Кенниката—Шмидта «советует» считать темп звездообразования пропорциональным примерно первой степени поверхностной плотности газа. Если упростить и вместо плотности газа подставить его полную массу (M_g), что правомерно в замкнутой системе, то получим:

$$\frac{dM_g}{dt} = -SFR = -\frac{M_g}{\tau_0}.$$

Это уравнение интегрируется аналитически: $M_g = M_{tot} \exp(-\tau/\tau_0)$, поэтому

$$SFR = \frac{M_{tot}}{\tau_0} e^{-\tau/\tau_0},$$

отсюда и экспоненциальный закон убывания глобальной интенсивности звездообразования в моделях галактик. На самом деле, как показала практика моделирования, точный вид функции $SFR(\tau)$ не важен, а важно отношение современного темпа звездообразования в галактике к среднему за время ее жизни, а также характерное время формирования звездного населения галактики τ_0 . Существуют такие галактики, в которых современный темп звездообразования превышает средний; такие системы называют галактиками со «вспышкой звездообразования», по-английски «star burst». Предельный случай мгновенного образования всех звезд в галактике моделируется проще всего — без интегрирования по возрастам звезд. Такие простейшие модели получили устойчивое сокращенное название SSP, которое разные авторы расшифровывают по-разному: одни считают, что SSP — это Simple Stellar Population, а другие — что это Single Stellar Population.

Первые модели Беатрис Тинсли были еще крайне несовершенны: эволюционные треки звезд были тогда рассчитаны только до основания ветви гигантов, поэтому в своей самой первой работе Тинсли к теоретическим изохронам возраста 12 млрд лет была вынуждена

«пристегивать» наблюдаемую ветвь гигантов старых рассеянных скоплений диска Галактики: NGC 188, M67 и др. Теперь-то мы знаем, что самые старые рассеянные скопления намного моложе 12 млрд лет, но у Тинсли не было иного выхода: в ее моделях был зафиксирован солнечный химический состав, и ветви гигантов шаровых скоплений ей негодились.

Тем не менее, несмотря на недостатки первых моделей, Тинсли сразу же сделала несколько эпохальных открытий. Так, на двухцветной диаграмме ($U-B$, $B-V$) распределение цветов близких галактик самых разных морфологических типов, представляющее собой довольно узкую полосу, совпало с модельной последовательностью, полученной при всех фиксированных параметрах модели (включая возраст галактик 12 млрд лет), кроме параметра темпа звездообразования τ_0 . Тинсли немедленно сделала вывод, что все галактики вокруг нас имеют примерно одинаковый древний возраст и различаются лишь современным темпом звездообразования: красный цвет эллиптических и линзовидных галактик получается при мощной начальной вспышке звездообразования, практически затухшего к нашей эпохе ($\tau_0 = 1$ млрд лет), а голубой цвет галактик самых поздних морфологических типов (Sd–Sm и Irr) получается в том случае, если звездообразование шло с примерно постоянной невысокой интенсивностью в течение всего времени жизни галактики и сохранилось практически на том же уровне до наших дней ($\tau_0 \rightarrow \infty$).

Цвета спиральных галактик более ранних типов успешно моделируются при промежуточных значениях τ_0 : для типа Sa берут $\tau_0 = 3$ млрд лет, для Sb — 5 млрд лет, а для Sc — 10 млрд лет. Считается, что в нашей галактике, которая по всем приметам имеет поздний тип и небольшой бар (SBbc) и история звездообразования которой восстанавливается прямым подсчетом числа звезд различного возраста, темп звездообразования (сглаженный на масштабах в несколько сотен миллионов лет) был почти постоянным последние 8 млрд лет. То есть для нашей галактики действительно $\tau_0 = 10$ млрд лет.

Цвет каждой галактики в первую очередь указывает на долю молодых звезд среди ее звездного населения. К сожалению, есть еще и «вторая очередь» — металличность: из-за математического вырождения эффектов возраста и металличности в моделях эволюционного синтеза шаровые скопления имеют такие же UBV -цвета, как и Sc-галактики. Хотя в шаровых скоплениях возраст всех звезд более 10 млрд лет, металличность у них в 100 раз меньше солнечной, а в Sc-галактиках, наоборот, много молодых звезд с солнечной металличностью. Именно поэто-

му столь разные звездные населения имеют почти одинаковые цвета. Эту проблему нужно иметь в виду.

Интересно, что на диаграмме «цвет—светимость» все галактики формируют два пересекающихся массива: «красную последовательность», содержащую эллиптические галактики и все другие галактики без звездообразования, и «голубое облако», содержащее галактики со звездообразованием. Между этими двумя структурами — провал: в так

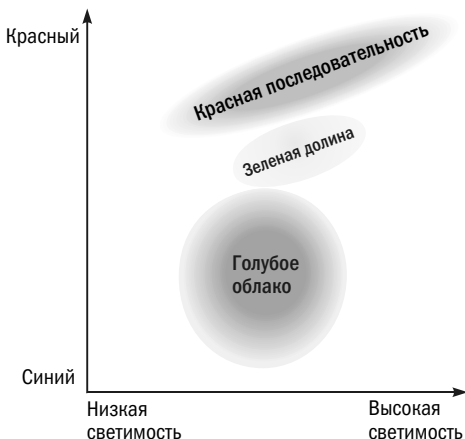


Рис. 8.8. Распределение галактик на плоскости «цвет—светимость».

называемой «зеленой долине» галактик мало. С тех пор, как по материалам массовых фотометрических обзоров неба последнего десятилетия, охвативших многие тысячи галактик, были выявлены «красная последовательность» и «голубое облако», не прекращаются споры об эволюционном смысле этой диаграммы. Перемещаются ли отдельные галактики между «красной последовательностью» и «голубым облаком»? Если да, то в каком направлении — от голубых к красным или наоборот? И означает ли малое количество галактик в «зеленой долине», что перемещение галактик между «красной последовательностью» и «голубым облаком» происходит очень быстро?

8.5. Последние данные и свежие идеи

8.5.1. Карликовые неправильные и сфероидальные галактики

Неправильные галактики — это население на красном смещении $z = 0$ с самым большим количеством молодых звезд; это самые голубые галактики вокруг нас. Но это и самые маломассивные галактики, и газ в них составляет несколько десятков процентов от общей барионной массы. Парадокс: галактики с самым интенсивным в данный момент звездообразованием очень неэффективно формировали звезды в течение всей своей жизни. Газа в них много, он возбужден ультрафиолетовым излучением массивных звезд. Поэтому массовые измерения химического состава неправильных галактик — это измерения химического состава их газа, прежде всего содержания в нем кислорода.

Зная содержание кислорода в газе и общую массу газа в галактике, можно вычислить эффективный выход синтеза кислорода в звездах (p_{eff}) по формуле из модели простой химической эволюции:

$$Z = p_{\text{eff}} \ln(1/\mu),$$

где Z — массовая доля искомого элемента (кислорода) в газе и μ — массовая доля газа в барионном веществе галактики. Сравнив полученное из наблюдений значение p_{eff} с теоретическим предсказанием расчета эволюции массивных звезд, мы увидим, что в среднем эффективный выход кислорода в неправильных галактиках понижен относительно теоретического. Что может понижать выход синтеза кислорода из массивных звезд? Есть два варианта ответа: виноват либо постоянный приток (infall) в галактику газа, бедного кислородом, либо отток (outflow) из галактики газа, обогащенного кислородом. Последний феномен называют «обогащенным галактическим ветром». Он может возникать, например, при массовых вспышках сверхновых, когда сбрасываемые ими оболочки обладают такой кинетической энергией, что легко преодолевают гравитацию галактики, уходят в межгалактическую среду и уносят с собой вновь синтезированный кислород.

Можно ли сделать выбор между этими двумя сценариями? В обзоре Лизы ван Зее и Марты Хайнес 2006 г. на основе наблюдений содержания кислорода в большой выборке неправильных галактик построена интересная диаграмма (рис. 8.9) — $\log(\text{O}/\text{H})$ от $\log[\ln(M_{\text{baryon}}/M_{\text{gas}})]$, т. е. зависимость $\log Z$ для кислорода от $\log[\ln 1/\mu]$. Понятно, что если бы все происходило согласно простой модели химической эволюции, то в данных координатах получилась бы прямая линия с наклоном 1 и свободным членом, равным логарифму эффективного выхода. У ван Зее и Хайнес получилось вытянутое облако точек, ограниченное двумя прямыми: одна, проходящая примерно через треть всех точек, соответствует теоретическому выходу кислорода; другая смещена вниз на 0,6 dex. То есть треть всех неправильных галактик эволюционирует по сценарию замкнутой системы, а остальные имеют в 3–4 раза меньший эффективный выход. И вот что важно: из той же самой картинки можно оценить, в каких именно галактиках понижен выход кислорода: в тех, где много газа, или в тех, где его меньше? Оказывается, в галактиках, где газ составляет 40% всей массы, выход кислорода понижен, а там, где все 90%, — выход кислорода нормальный. Эта статистика однозначно указывает, что в неправильных галактиках эффективный выход кислорода пони-

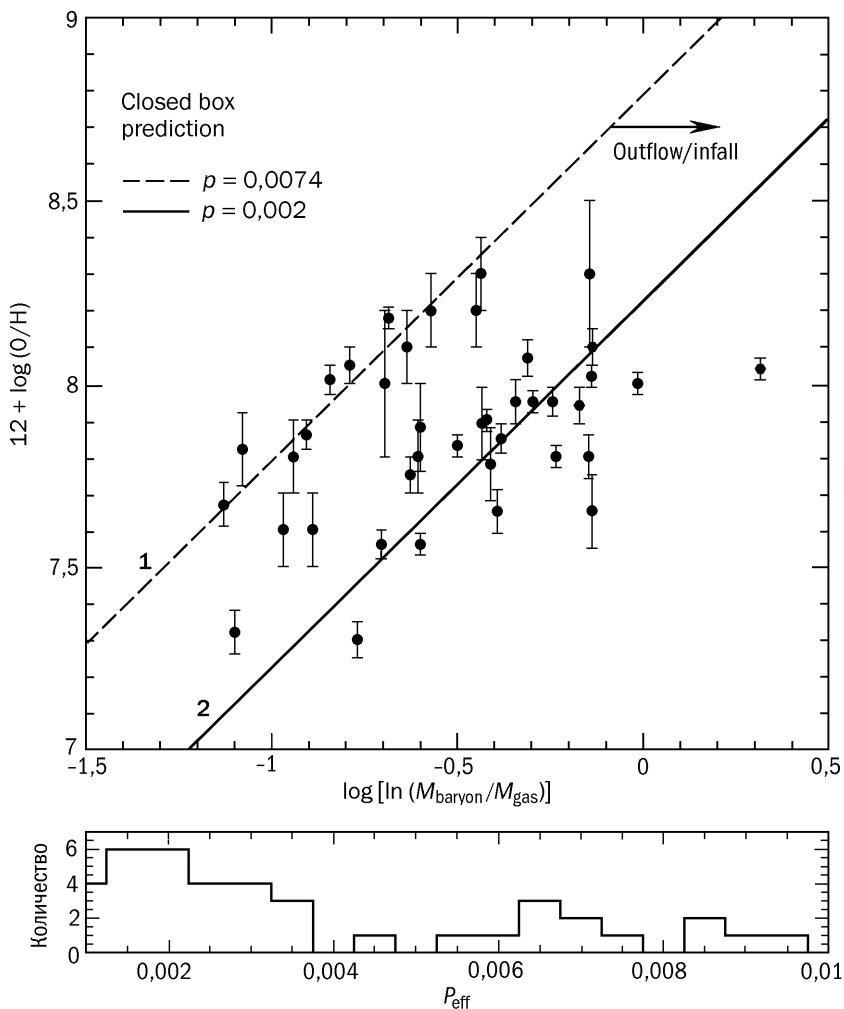


Рис. 8.9. Сравнение содержания межзвездного газа (M_{gas}) относительно полной барионной массы галактики (M_{baryon}) и обилия кислорода относительно водорода (O/H) для карликовых неправильных галактик (из статьи ван Зее и Хайнес, 2006). Точки с «усами» ошибок – наблюдательные данные. 1 – прогноз простой модели химической эволюции, в которой использован теоретически рассчитанный «выход» кислорода при эволюции массивных звезд ($p_{\text{eff}} = 0,0074$); 2 – тот же прогноз, но произвольно сдвинутый до значения $p_{\text{eff}} = 0,002$ так, чтобы «накрыть» наиболее плотную часть распределения наблюдаемых точек. Причиной сдвига может быть как отток газа, богатого кислородом, так и приток газа, бедного кислородом. На нижней панели показано распределение галактик по значению p_{eff} .

жается «обогащенным галактическим ветром»: только он способен одновременно понизить выход кислорода и уменьшить общую массу газа в галактике. В случае аккреции извне все было бы наоборот — пониженный выход кислорода сопровождался бы повышенным содержанием газа, который все время добавлялся бы в галактику. То есть, в отличие от более массивных спиральных галактик, эволюция неправильных галактик проходит в основном под влиянием ухода из галактики газа, разогретого и выброшенного массивными звездами в процессе вспышки звездообразования.

В отличие от неправильных галактик, карликовые сфероидальные галактики вообще лишены газа. Их относительно голубой цвет с самого начала пытались объяснить не наличием молодых звезд, а низкой металличностью старых. Из-за отсутствия звездообразования и сфероидальной формы их считали маленькими родственниками эллиптических галактик, хотя, между прочим, у гигантских эллиптических и карликовых сфероидальных галактик разная форма радиальных профилей поверхностной яркости: вокулёровский закон у первых и экспоненциальный — у вторых. К тому же у них разное «масштабное соотношение» (scaling relation): у эллиптических галактик-гигантов чем выше светимость, тем меньше средняя поверхностная яркость, а у карликов — наоборот.

Несмотря на это, сначала все исследователи старались подобрать для двух этих типов сфероидальных галактик общий сценарий формирования — нечто вроде монолитного коллапса протогалактического облака. Действительно, в рамках модели монолитного коллапса с отрицательной обратной связью (новорожденные звезды разогревают газ и этим подавляют звездообразование) удавалось объяснить, почему чем массивнее сфероидальная галактика, тем богаче металлами ее звезды. Объяснение выглядело так: когда внутри сфероидальной галактики начинается звездообразование, первое же поколение сверхновых нагревает газ. Если галактика массивная, она сможет своей гравитацией удержать нагретый газ, поэтому после первой волны сверхновых и последующего остывания газа звездообразование будет продолжаться, и будет продолжаться синтез тяжелых элементов. Если же галактика маломассивная, то гравитационная потенциальная яма в ней неглубокая, и первый же нагрев газа звездным ветром и взрывами сверхновых приведет к уходу газа из галактики и окончательному завершению формирования звезд.

Итак, по логике вещей, чем меньше галактика, тем раньше в ней должно прекратиться звездообразование, а значит, не сможет воз-

никнуть поколение звезд, заметно обогащенных тяжелыми элементами, синтезированными в их предках. Так может установиться корреляция масса—металличность. Однако последние подробные данные о химическом составе и возрастах звезд в карликовых сфероидальных галактиках, членах нашей Местной группы, нарушили стройность этой картины. Оказалось, что периоды основного звездообразования в карликовых сфероидальных галактиках длились очень долго: от 2–5 млрд лет у далеких и относительно изолированных членов Местной группы (Cetus, Tucana) до 8–12 млрд лет у близких спутников нашей галактики (Fornax, Carina). Напомним, что у гигантских эллиптических галактик все их звезды образовались менее чем за 1 млрд лет! Как видим, все оказалось наоборот: чем массивнее сфероидальная галактика, тем меньше времени в ней продолжалось звездообразование.

С возрастом меняется и химический состав индивидуальных звезд в карликовых сфероидальных галактиках: их металличность увеличивается — медленно, но при этом куда быстрее, чем в диске нашей галактики. С ростом металличности падает отношение обилий альфа-элементов и железа; в конце основной эпохи звездообразования в карликовых сфероидальных галактиках уже формируются звезды с солнечным соотношением элементов. Это означает, что в этих карликовых галактиках звездообразование почему-то не прекращается после первой волны взрывов сверхновых — «обратная связь» почему-то не срабатывает, газ не уходит, по крайней мере не уходит далеко. В некоторых галактиках звезды продолжали рождаться еще миллиард лет назад.

А почему рождение звезд там все-таки прекращается, почему сейчас мы не видим газа в карликовых сфероидальных галактиках? Похоже, что газ покидает карликовые галактики не под влиянием взрывов сверхновых, а в результате приливного гравитационного эффекта. Когда спутник приближается к массивной галактике-хозяину или когда карликовая галактика поля входит в массивную группу и становится ее членом, гравитационные силы способны ободраť газ с периферии карликовой галактики. А если вокруг хозяйской галактики или в группе галактик есть еще и горячая газовая среда, то сработает и лобовое давление. Похоже, что у спутников нашей галактики нет газа по той же причине, почему его нет у галактик в центре скопления Virgo: эффект плотности окружения.

Кстати, карликовые эллиптические галактики скопления Virgo при ближайшем рассмотрении оказались значительно моложе, чем

гигантские эллиптические галактики того же скопления, да и среднее соотношение магния и железа в их звездах — солнечное. Для объяснения их происхождения сейчас разрабатывается сценарий обдира-ния барионного вещества — как газа, так и звезд — со спиральных галактик поздних типов при их первом прохождении через центр скопления. При этом потеря ими барионной массы может составлять до 99%. Так что карликовые эллиптические галактики по своему происхождению могут быть вовсе и не эллиптическими...

8.5.2. Эллиптические галактики

Идея о том, что эллиптические галактики сформировались путем большого мерджинга, плодотворно работала 30 лет, стимулируя попытки объяснить хаотическую кинематику звезд в объектах этого класса. Но ныне, похоже, эта идея исчерпала свой потенциал и должна уступить место другому сценарию. Сразу несколько свежих наблюдательных фактов противоречат большому мерджингу как доминирующему механизму формирования гигантских эллиптических галактик.

Ранее мы уже отмечали противоречивость выбора между «сухим» и «мокрым» вариантами большого мерджинга. При сухом мерджинге, то есть при слиянии двух *уже эллиптических* галактик, сохраняется старый возраст звездного населения, но зато не возникает известная из наблюдений зависимость «масса—металличность»: ведь при увеличении массы вдвое продукт мерджинга сохраняет металличность галактик-родителей. А при «мокрых» слияниях с участием газа неизбежна вспышка звездообразования и омоложение звездного населения, которое не наблюдается в реальных близких к нам гигантских эллиптических галактиках.

Впрочем, у этого сценария есть и более тяжелые проблемы. Существуют прямые наблюдательные противоречия между предсказаниями сценария большого мерджинга и свойствами близких эллиптических галактик. В прежние годы свойства звездных населений определялись из наблюдений только лишь ярких центральных областей галактик. Но в последнее время повысилась точность определения параметров звездного населения на больших расстояниях (R) от центров эллиптических галактик и выяснилось, что градиенты металличности вдоль радиуса, для которых модели предсказывают в целом линейную зависимость от $\log R$, на самом деле весьма нелинейны. В центральных частях галактик, внутри примерно половины эффективного радиуса, градиенты крутые, а во внешних частях — пологие, во мно-

гих случаях практически нулевые. Эллиптическая галактика как бы состоит из двух частей — внутренней и внешней, имеющих разное происхождение.

Дело в том, что при большом мерджинге радиальные градиенты свойств звездного населения замыкаются: звезды разных галактик, жившие на разных расстояниях от их центров, сильно перемешиваются в конечном конгломерате. Расчеты показывают, что градиенты металличности круче чем $0,3 \text{ dex per dex}$ (т. е. вдвое на протяжении одного порядка по R , например между $R = 5$ и $R = 50$) не могут возникнуть в продукте большого мерджинга. Если наблюдаемый градиент круче, значит, галактика заведомо не испытывала больших слияний на протяжении времени, сравнимого с возрастом ее звездного населения. Простой пример: наливая молоко в стакан с крепким чаем, вы не получите резкой границы между белой и темной жидкостями.

Разделение галактики на две радиальные зоны, характеризующиеся разным градиентом металличности, как бы намекает на двухстадийный процесс формирования современных эллиптических галактик. В нашей совместной с бельгийским астрономом Мартином Баесом статье (Baes et al., 2007) предложен новый сценарий: центральная часть эллиптической галактики формируется монолитным коллапсом на ранней стадии эволюции, на красных смещениях $z > 2$, что объясняет крутые внутренние градиенты металличности, а позже на эту «затравку» падают малые спутники; так постепенный процесс множественных малых слияний формирует внешние части гигантской эллиптической галактики.

Последующие наблюдательные обзоры эллиптических галактик на $z = 1,5\text{--}2,5$ позволили другим исследователям независимо прийти к точно такой же картине эволюции эллиптических галактик. Оказалось, что гигантские эллиптические галактики в эпоху $z = 1,5\text{--}2,5$ имели очень маленький размер и очень высокую плотность звезд: их характерный размер был примерно в 6 раз меньше, а средняя плотность звезд в сотни раз больше чем у эллиптических галактик такой же массы в нашу эпоху ($z = 0$). Поскольку речь идет об *очень* массивных галактиках ($M > 10^{11} M_{\odot}$ только в виде звезд), то механизм большого мерджинга к этим объектам применять нельзя: хотя большой мерджинг и «раздувает» звездные системы, радиус при этом увеличивается пропорционально массе. Если бы существовавшие при $z = 2$ компактные эллиптические галактики начали сливаться друг с другом в режиме «равный с равным», то при $z = 0$ среди объектов с правильными размерами мы имели бы огромное количество галактик с

более массивным звездным компонентом, чем $10^{12} M_{\odot}$. Но такого во-круг нас просто нет. В поисках механизма, который может сильно увеличить радиус звездной системы при умеренном росте ее массы, теоретики остановились на малом мерджинге: при множественном слипании небольших рыхлых систем радиус конгломерата растет как квадрат массы, и тогда к эпохе $z = 0$ эволюция сходится к «правильному» масштабному соотношению.

Идею, что с помощью малого мерджинга эллиптические галактики надстраивают свои внешние части, поддержали наблюдения далеких галактик, изображения которых удалось получить с высоким пространственным разрешением. Оказалось, что если заглянуть в центральные области далеких галактик, ограниченные радиусом в 1 кпк, то выяснится, что как раз *центральная* плотность эллиптических галактик проэволюционировала не так уж и сильно: между эпохами $z = 2$ и $z = 0$ она уменьшилась всего в 2–3 раза, а не на два порядка, как средняя звездная плотность внутри эффективного радиуса этих галактик. Отсюда естественным образом рождается картина двух этапов формирования эллиптических галактик: сначала, в эпоху $z > 2$, возникли компактные плотные «зародыши», которые в дальнейшем послужили основой центральных областей галактик, а затем, поглощая летавшие вокруг них мелкие спутники, эллиптические галактики уменьшали свою плотность и увеличивали радиус, надстраивая свои внешние части. Расчеты показывают, что для «правильной» эволюции типичной массивной эллиптической галактике достаточно за последние 8 млрд лет «уронить» на себя 8 ± 2 спутников, в 10 раз менее массивных по сравнению с «хозяином».

8.4.3. Дискосые галактики

Спиральные и линзовидные галактики — безусловные родственники: они обладают сходной структурой. И у тех и у других есть крупномасштабные звездные диски, а в их центрах — сфероидальные балджи. Радиальный профиль поверхностной яркости $I(r)$ и у тех и у других в диске экспоненциальный [$I(r) \propto \exp(-r/r_e)$], а в балдже — сериковский, т. е. предложенный аргентинским астрономом Хосе Луисом Сериком (Sérsic J. L.) в виде зависимости $I(r) \propto \exp[-(r/r_e)^{1/n}]$, со средним показателем степени $n = 2$. В чем же тогда различие между ними? В дисках линзовидных галактик, в отличие от спиральных, как правило, нет газа и, следовательно, нет звездообразования. Кроме этого, есть разница в типичном месте обитания этих галактик: спиральные обычно присутствуют «в поле», т. е. там, где галактики располагаются

относительно разреженно, а линзовидные составляют большинство в богатых группах и в скоплениях галактик.

В попытке эволюционно связать эти два типа галактик мысль исследователей до сих пор работала в одном направлении: давайте уберем газ из диска спиральной галактики, тогда звездообразование прекратится и чисто звездный диск динамически разогреется; так из спиральной галактики с тонким голубым диском получится линзовидная галактика с толстым красным диском. Линзовидные галактики доминируют в плотном окружении? Отлично: значит, газ уходит из дисков галактик под действием окружения. Эта простая логика эксплуатировалась последовательно и настойчиво последние три десятка лет; сценарий формирования линзовидных галактик — чуть ли не единственное, что не изменилось существенно за последние десятилетия.

Действительно, если вы посмотрите на правую часть схемы факторов эволюции (рис. 8.4), то заметите, что многие внешние процессы, как быстрые, так и медленные, были «придуманы» теоретиками для объяснения свойств линзовидных галактик. Если спиральную галактику с холодным газом в диске «уронить» в богатую группу или в скопление галактик с горячей межзвездной средой, то лобовое давление этой среды удалит холодный газ из внешних частей диска летящей спирали, а гравитационные приливы от пролетающих мимо галактик возмутят движение как остатков газа в диске, так и сам звездный диск, и систему окружающих его галактик-спутников. (Это напоминает приливное возмущение кометного облака Оорта звездами, пролетающими мимо Солнечной системы.) В результате значительная часть газа, оставшегося в диске, упадет в его центр и «сгорит» в короткой, но эффективной вспышке звездообразования, а звездный диск, лишенный газа, разогреется и станет устойчивым относительно спиральных возмущений плотности: спиральные рукава исчезнут, а спутники быстро попадут на родительскую галактику, еще более разогревая ее звездный диск.

Кроме того, в плотном окружении линзовидных галактик не может быть внешней плавной аккреции на них холодного газа: внешние холодные потоки не выживают в горячей межгалактической среде, испаряются, а собственные внешние резервуары холодного газа, если спиральная галактика таковыми обладала, будут сорваны с нее гравитационными приливами от общего потенциала скопления и от отдельных соседних галактик.

Этот сценарий, казалось бы, получил твердое наблюдательное обоснование, когда в 1990-е гг. с помощью космического телескопа

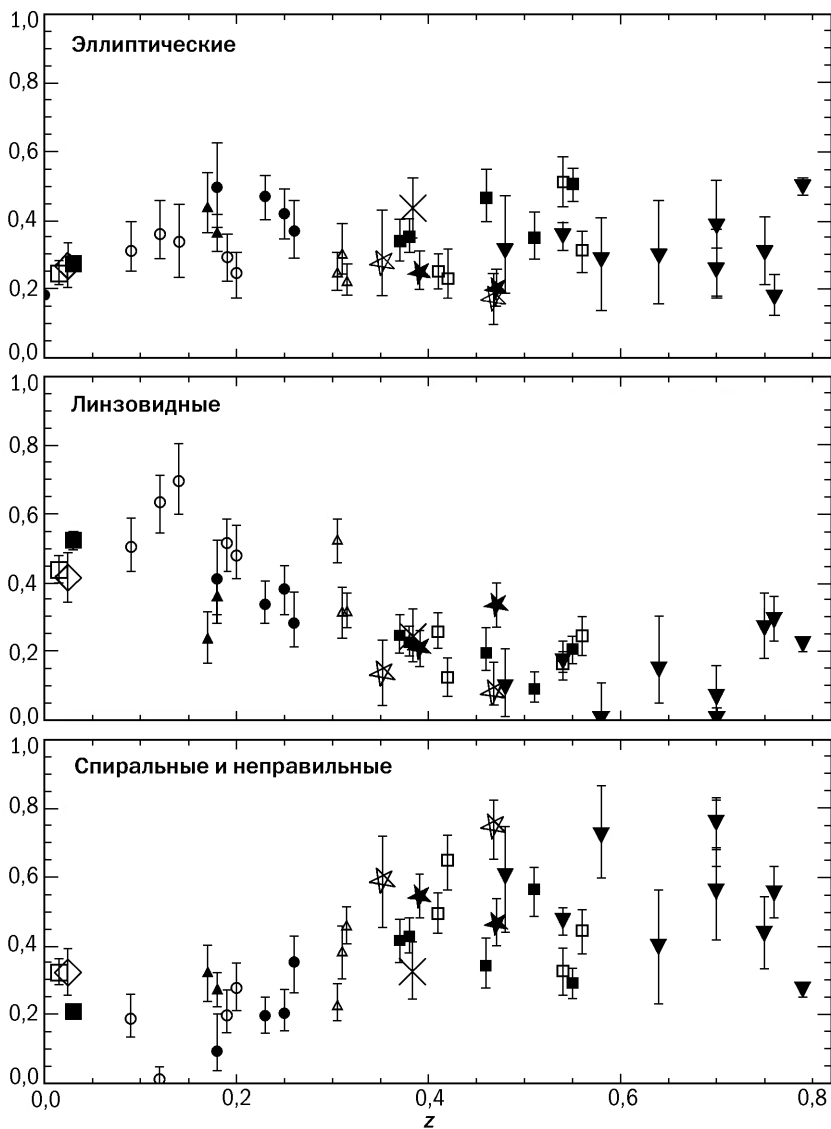


Рис. 8.10. Доля галактик различного морфологического типа в скоплениях и группах на разных красных смещениях (z) по данным разных обзоров. На основе рисунка из статьи Wilman et al., 2009.

«Хаббл» был проведен обзор морфологических типов галактик в скоплениях на разных красных смещениях, вплоть до $z = 0,8$. Это проделала команда знаменитого исследователя скоплений Алана Дреслера

(А. Dressler), который еще в 1980 г. впервые убедительно установил связь «морфология — плотность окружения» в близких скоплениях галактик. Когда команда Дреслера проклассифицировала галактики в далеких скоплениях так же, как она это делала ранее в близких скоплениях (т. е. глядя на фотографии глазом!), оказалось, что при красном смещении $z = 0,4$ резко меняется доминирующий тип галактик в скоплениях. В то время как при $z < 0,4$ в скоплениях доминируют линзовидные галактики, составляя 50–60% всего населения, при $z > 0,5$ большинство в скоплениях составляют спиральные галактики, а доля линзовидных падает до 15–20%, как в поле. При этом доля эллиптических галактик в скоплениях остается постоянной, около 30%, во всем исследованном диапазоне z .

Обнаружив, что со временем доли спиральных и линзовидных галактик в скоплениях изменяются в противофазе, исследователи уверились, что они видят момент массового превращения спиральных галактик в линзовидные. Причем происходит это именно тогда, когда начинают (по общепринятому космологическому сценарию) уплотняться и обособляться массивные скопления галактик, а спиральные галактики поля в большом количестве притягиваются к этим скоплениям и падают в их массивные темные гало. В те годы ключевым термином в описании эволюции дисковых галактик стало слово *quenching* (гашение, закалка), намекающее на принудительное прекращение звездообразования. С помощью *quenching*'а стали не только описывать формирование линзовидных галактик, но и механизм перехода галактик на диаграмме «цвет—светимость» из «голубого облака» на «красную последовательность» — именно в таком направлении, а никак не в обратном! Все специалисты в те годы пытались выяснить, когда, где и под действием каких именно физических механизмов этот «*quenching*» происходит в реальной Вселенной.

Красное смещение $z = 0,4$ — это момент 4 млрд лет назад. Если справедлив описанный выше сценарий, то в близких к нам (т. е. современных) линзовидных галактиках всего 4 млрд лет назад еще шло звездообразование. Следовательно, в дисках этих галактик мы должны обнаружить звезды промежуточного возраста. Именно это и надо было сделать в первую очередь для проверки идеи *quenching*'а. Мы это и сделали с помощью спектральных наблюдений на 6-метровом телескопе САО РАН. Одновременно с нами более обширную выборку линзовидных галактик изучили и наши западные коллеги, проделавшие фотометрические измерения в широком спектральном диапазоне — от голубых лучей в фильтре B до ближнего инфракрасного диа-

пазона в фильтрах H (1,6 км) и K_s (2,2 мкм). Приложив метод эволюционного синтеза к спектрам и к оптическим и инфракрасным цветам внешних областей дисков близких линзовидных галактик, мы одновременно обнаружили, что у многих из этих галактик диски старые: средний возраст их звезд превышает 10 млрд лет. Этому возрасту соответствует красное смещение $z = 2$, так что при $z = 0,5$ в этих дисках совершенно точно не шло крупномасштабное звездообразование! Стройный сценарий превращения спиральных галактик в линзовидные рассыпался на глазах...

Ничего страшного. Просто нужно попытаться сформулировать новый сценарий эволюции, который учтет все новые наблюдательные данные. Например, почему все решили, что спиральные галактики, доминирующие в скоплениях при $z > 0,5$, позже превратились именно в линзовидные? Между прочим, примерно в этот период, при $z < 0,7$, в скоплениях начинает активно достраиваться маломассивный «хвост» красной последовательности — до этого момента красными были только массивные галактики. Нельзя ли предположить, что спиральные галактики, активно обдираемые в скоплениях всеми внешними механизмами воздействия, превращались именно в сфероидальные карлики, а никак не в гигантские линзовидные галактики? Сфероидальных карликов в скоплениях тоже очень много, и для них тоже сейчас сформулирован сценарий происхождения из галактик поздних типов, а свойства их звездных населений, например солнечное отношение магния к железу, куда больше подходят для этого сценария, чем свойства звездных населений линзовидных галактик.

Как всегда, самая подробная и содержательная информация о возможных путях эволюции дисковых галактик может быть найдена в нашей собственной галактике. У нас существуют тонкий звездный диск и толстый звездный диск. Молодые звезды есть только в тонком диске, однако самые старые звезды тонкого диска имеют возраст 9–10 млрд лет. У тех звезд тонкого диска, которые имеют полную металличность, близкую к солнечной, отношение альфа-элементов к железу тоже солнечное — они сформировались в течение длительного периода примерно постоянной интенсивности звездообразования. В звездах толстого диска отношение альфа-элементов к железу не солнечное даже в звездах с общим обилием тяжелых элементов, близким к солнечному; оно соответствует короткой эпохе формирования этой звездной структуры, а возраст звезд в толстом диске — 12–13 млрд лет.

Такие особенности химического состава и такое соотношение возрастов звездных структур укладываются в сценарий, согласно ко-

торому первым быстро сформировался толстый звездный диск. Потом был перерыв в звездообразовании, в течение примерно 2–3 млрд лет, а затем звездообразование возобновилось, в результате чего постепенно сформировался тонкий диск. Но это означает, что наша Галактика 11–12 млрд лет назад, в эпоху $z > 2$, была линзовидной! Наблюдения на $z > 2$ показывают, что там/тогда звездообразование идет в геометрически толстых дисках — из-за того, что турбулентность в газовом компоненте очень велика. Если поделить наблюдаемое в дисковых галактиках при $z > 2$ содержание газа на их же темп звездообразования, то получится время исчерпания газа (и прекращения звездообразования) всего несколько сотен миллионов лет. Вот она, короткая и мощная вспышка звездообразования в толстом диске! После нее должна остаться линзовидная галактика — с толстым звездным диском без звездообразования.

А еще через несколько миллиардов лет эта галактика может получить приток холодного газа извне, начать формировать тонкий диск и... стать спиральной. А может не получить притока холодного газа извне — и тогда останется линзовидной. Надо ли напоминать, что самые большие проблемы с притоком холодного газа извне будут как раз в плотном окружении, где газодинамические и гравитационные эффекты обдирают газовые резервуары и греют холодный газ на «подлете» к галактике? Потому в современных скоплениях так мало галактик спиральных и так много галактик линзовидных...

Время покажет, насколько этот новый сценарий жизнеспособен. Главное — продолжать исследования, ведь это так интересно!

Литература

- Джинс Дж. Вселенная вокруг нас. Л.; М.: ГТТИ. 1932.
- Baes M., Sil'chenko O. K., Moiseev A. V., Manakova E. A. Metallicity and age gradients in round elliptical galaxies // *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 467. P. 991–1001.
- Barnes J. E., Hernquist L. Dynamics of interacting galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1992. Vol. 30. P. 705. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Barnes/frames.html>.
- Blanton M. R., Moustakas J. Physical properties and environments of nearby galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 47. P. 159. arXiv:0908.3017.
- Gott J. R. III, Recent theories of galaxy formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1977. Vol. 15. P. 235.
- Governato F. et al., 2012. <http://apod.nasa.gov/apod/ap120717.html>;
<http://www.astro.washington.edu/users/fabio/movies.html>;
<http://www.youtube.com/watch?v=h9za1CP9ImA>.

- Kennicutt R. C. Star formation in galaxies along the Hubble sequence // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1998. Vol. 36. P. 189. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept02/Kennicutt/frames.html>.
- Kormendy J., Kennicutt R. C. Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 42. P. 603. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March10/Kormendy/frames.html>.
- Matteucci F. Chemical evolution of the Milky Way and its satellites // *Lectures of the 37th Saas-Fee Advanced Course of the Swiss Society for Astrophysics and Astronomy*. 2008. arXiv:0804.1492.
- Renzini A. Stellar population diagnostics of elliptical galaxy formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2006. Vol. 44. P. 141. arXiv:astro-ph/0603479.
- Sandage A. Classification and stellar content of galaxies obtained from direct photography // *Galaxies and the Universe*. Eds A. Sandage, M. Sandage, J. Kristian, 1975. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sandage/frames.html>.
- Tolstoy E., Hill V., Tosi M. Star-formation histories, abundances, and kinematics of dwarf galaxies in the Local Group // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 47. P. 371. <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March11/Tolstoy/frames.html>.
- Trager S. C., Faber S. M., Worthey G., González J. J. The Stellar Population Histories of Early-Type Galaxies. II. Controlling Parameters of the Stellar Populations // *Astron. J.* 2000. Vol. 120. P. 165.
- Van der Kruit P. C., Freeman K. C. Galaxy Disks // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 49. P. 301. arXiv:1101.1771.
- Van Zee L., Haynes M. P. Oxygen and Nitrogen in Isolated Dwarf Irregular Galaxies // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 636. P. 214.
- Wilman D. J., Oemler A., Mulchaey J. S., McGee S. L., Balogh M. L., Bower R. G. Morphological Composition of $z \sim 0.4$ Groups: The Site of S0 Formation // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 692. P. 298.





АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК И КВАЗАРЫ

Б. В. Комберг, С. В. Репин

9.1. Первые 10 лет эры квазаров

9.1.1. До квазаров

Как нередко бывает в науке, между открытием феномена и пониманием его места в ряду других явлений может пройти не одно десятилетие. Так случилось и с обнаружением активности ядер галактик, которая наблюдалась еще в начале XX в., когда и само существование других галактик не было доказано. Например, фотографируя туманные объекты из каталога Мессье, американский астроном Гебер Кёртис получил в 1916 г. изображение туманности М87, которая, как теперь известно, является гигантской эллиптической галактикой и располагается в центральной части скопления галактик в Деве. На этом снимке почти столетней давности видна узкая струя, распадающаяся на отдельные пятна и выходящая прямо из центра галактики (современные фото см. на рис. 9.3 и 9.4).

А еще раньше, начиная с 1908 г., Эдвард Фэт (Е. А. Fath, США) наблюдал объекты с эмиссионными линиями в спектре, к числу которых относятся, как выяснилось через 35 лет, и некоторые спиральные галактики со звездоподобными ядрами. С начала 1940-х гг. их подробно исследовал Карл Сейферт (США). Он нашел около дюжины галактик, в спектре ядер которых присутствуют очень широкие линии излучения: H , H , $[O III]$ и др. Если ширину этих линий интерпретировать как эффект Доплера, она свидетельствует о движении горячих облаков газа в ядрах этих галактик со скоростями тысячи и даже десятки тысяч километров в секунду. Естественно, за галактиками с такими необычными спектрами закрепилось название «сейфертовских».

В 1936–1940 гг. Фриц Цвикки и Милтон Хьюмасон провели обзор высокоширотных площадок неба до 15^m и обнаружили много голубых звездочек, принадлежащих популяции бедных металлами карликовых звезд короны нашей Галактики. Они заметили, что число таких



Рис. 9.1. Карл Кинан Сейферт (1911–1960).

звезд сильно возрастает при уменьшении их светимости, и планировали провести более глубокий обзор (до 20^m). Впоследствии выяснилось, что среди этих «звездочек» были голубые компактные галактики, сейфертовские галактики и даже один очень близкий квазар (HZ 46, $z = 0,045$).

С середины 1950-х гг. к оптическим данным об активных галактиках стали добавляться результаты радиоастрономических наблюдений. В 1950 г. Дж. Болтон отождествил два источника радиоизлучения с Крабовидной туманностью в Тельце и галактикой NGC 5128 в Кентавре, а в 1954 г. Вальтер Бааде и Ру-

дольф Минковский (США) отождествили некоторые яркие дискретные радиоисточники с близкими галактиками в созвездиях Лебедь и Дева. Эти объекты получили обозначения соответственно Taurus A, Centaurus A, Cygnus A и Virgo A. Буква «А» говорит здесь о том, что источник является самым радиоярким в указанном созвездии. С обнаружением этих объектов в астрономию вошло понятие «радиогалактика», т. е. галактика, мощность радиоизлучения которой сравнима с мощностью ее оптического излучения.

В том же году по просьбе известного астрофизика И. С. Шкловского московский астроном П. Н. Холопов (ГАИШ) предпринял поиск оптического аналога радиоисточника в Печи (For A) и отождествил его с яркой эллиптической галактикой (рис. 11 цветной вкладки). Так как все эти галактики выглядели в той или иной степени пекулярными (нетипичными), сначала исследователи решили, что их мощное радиоизлучение обусловлено столкновениями с другими галактиками. Позже от этой гипотезы отказались, но, как выясняется, зря, так как эта гипотеза, уже на другом уровне понимания проблемы, вновь была востребована: оказалось, что столкновение галактик способствует появлению активности в их ядрах.

Директор Бюраканской обсерватории в Армении Виктор Амазаспovich Амбарцумян, собрав воедино все известные к середине 1950-х гг. факты о необычных свойствах ядер некоторых галактик, выступил на XI Сольвеевском конгрессе 1958 г. с докладом, в котором предположил существование в природе особых «D-тел», ответственных за актив-

ность ядер галактик. При этом он допускал, что и сами галактики рождаются в результате взрывов таких D-тел. По предложению Амбарцумяна искать незвездное излучение D-тел надо было в голубой части спектра. Причем сначала речь шла о D-телах в звездах, а не в ядрах галактик.

Поиск голубых галактик начал мексиканский астроном Гильермо Аро в 1954 г., а в 1960 г. с большим размахом к этой работе приступил сотрудник Бюраканской обсерватории Бениамин Егишевич Маркарян. Он начал систематический поиск галактик, у которых цвет не соответствовал их морфологическому типу, с целью последующего изучения их спектров. Так были найдены галактики с голубыми избытками цвета; теперь их называют «маркаряновскими». Среди них оказалось около 10% сейфертовских галактик, а остальные — галактики со вспышками звездообразования, что само по себе тоже очень интересно.

Оставляя в стороне взгляды Амбарцумяна на природу активности ядер галактик и их роль в процессе формирования самих галактик, следует подчеркнуть, что его работы, безусловно, привлекли внимание астрономов к проблеме активности ядер. Поэтому к моменту обнаружения квазаров (1963 г.) — этих самых мощных, самых компактных и чрезвычайно далеких объектов Метагалактики — уже была подготовлена база для их включения в популяцию, получившую название *галактик с активными ядрами*. Собственно источники активности в таких галактиках обычно называют *активными ядрами галактик* (АЯГ) или *активными галактическими ядрами* (АГЯ), по-английски AGN (active galactic nuclei).

9.1.2. Открытие квазаров и их свойства

Отождествление некоторых компактных радиоисточников с оптическими квазизвездными объектами считается одним из самых замечательных открытий современной наблюдательной астрономии. На фотографиях, полученных с большими телескопами, эти объекты выглядят всего лишь как слабые звездообразные изображения, однако они



Рис. 9.2. Академик В. А. Амбарцумян (1908–1996).

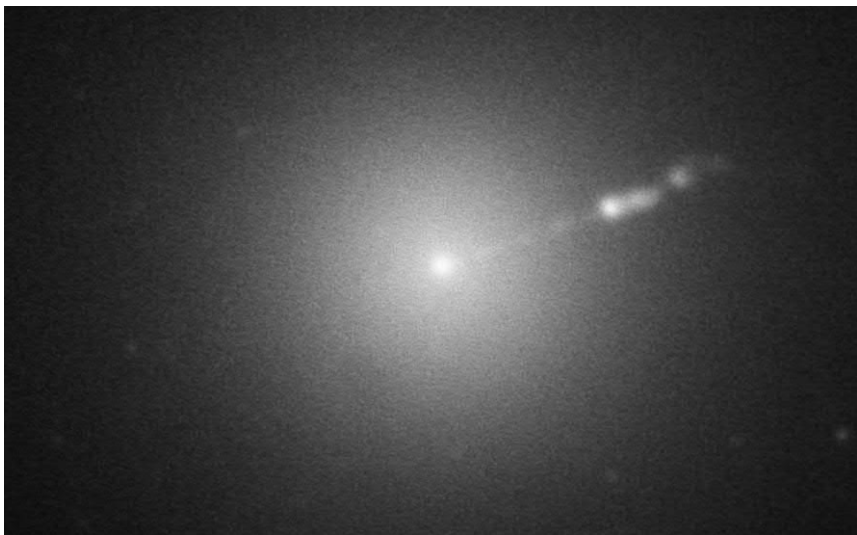


Рис. 9.3. Один из лучших наземных снимков ядра гигантской эллиптической галактики M87 (она же NGC 4486, она же радиогалактика Vir A), расположенной в центре скопления галактик в Деве (Virgo). Виден оптический выброс (джет), выходящий из центра ядра и протянувшийся почти на 2 кпк. Радиус самой галактики — около 150 кпк. Фото: Обсерватория Subaru (Япония).

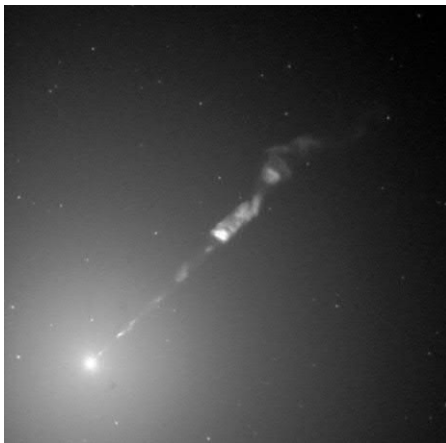


Рис. 9.4. Наиболее четкое изображение струи, выброшенной из ядра галактики M87, получено космическим телескопом «Хаббл» в феврале 1998 г. Светлые точки — шаровые звездные скопления, принадлежащие этой галактике.

излучают огромное количество энергии в радиодиапазоне. Первым названием, данным этим странным объектам, было *квазизвездные радиоисточники* (quasi-stellar radio source), часто сокращавшееся до *квазизвездных источников* (QSS) или *квазаров* (quasar). Позже установили, что существуют многочисленные звездообразные объекты, по своим оптическим свойствам подобные квазизвездным радиоисточникам, но без заметного радиоизлучения. Их называли по-разному: квазизвездными объектами, голубыми звездными объектами или квазизвездными галактика-

ми. В наши дни нередко используют название *квазизвездные объекты* (QSO) для всех этих источников независимо от того, испускают они радиоизлучение или нет.

История обнаружения квазаров поучительна как с точки зрения преодоления догм (ранее считалось, что все внегалактические объекты должны наблюдаться в виде протяженных образований — галактик), так и в качестве яркой иллюстрации выдающейся роли радиоастрономии в обнаружении активных объектов. Правда, сначала обнаруженные радиоисточники считались «радиозвездами» нашей Галактики, которые светят за счет синхротронного механизма — спиралеобразного движения электронов в магнитном поле звезды (Alfvén, Herlofson, 1950). Позже, когда стало ясно, что в межзвездной среде галактик напряженность магнитного поля может достигать 10^{-6} Гс, идея о синхротронном излучении была перенесена и на внегалактические радиоисточники.

В 1953 г. И. С. Шкловский высказал блестящую идею о синхротронной природе излучения Крабовидной туманности в широком диапазоне спектра — от радио до рентгена. Идея подтвердилась, когда была обнаружена поляризация оптического излучения туманности (В. Л. Гинзбург, И. М. Гордон). Позже выяснилось, что не только Краб, но и другие остатки взрыва сверхновых в основном светятся за счет движения электронов в магнитном поле. В 1954 г. Шкловский распространил эту гипотезу на природу излучения в выбросе из ядра галактики М87. И это тоже оказалось верно: Вальтер Бааде обнаружил поляризацию света от выброса в М87. На основе теории синхротронного излучения Шкловский оценил величину магнитного поля и энергию релятивистских электронов, ответственных за излучение радиогалактик. В 1962 г. он пришел к выводу, что далекие молодые галактики, переживающие первую вспышку звездообразования, должны быть очень яркими в оптике и радио из-за высокой частоты вспышек сверхновых звезд в них. Оставался всего один шаг до предсказания существования квазаров. Этот шаг был сделан наблюдателями.

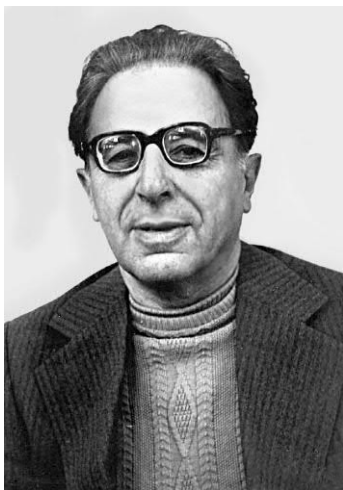


Рис. 9.5. Член-корреспондент АН СССР Иосиф Самуилович Шкловский (1916–1985).



Рис. 9.6. Квазар 3C 273 (отмечен в центре кадра), один из самых ярких и близких к нам. Тем не менее на оптической фотографии с расстояния 749 Мпк он выглядит как звездная звезда 13^m . Фото: Anthony Ayiomamitis.

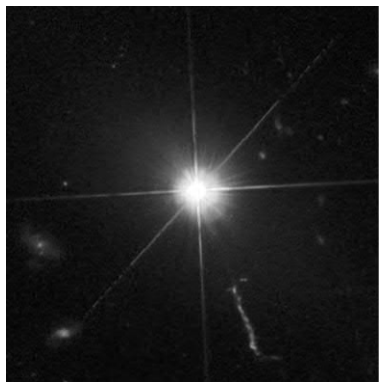


Рис. 9.7. Крупномасштабные снимки квазара 3C 273. Выброшенная из его центра струя протянулась почти на 60 кпк (угловая протяженность $23''$). Оптическое фото (слева) получено телескопом «Хаббл»; рентгеновское изображение — спутником «Чандра» (NASA).

Дело в том, что к концу 1950-х гг. многие дискретные радиоисточники оставались неотожествленными и все еще считались «радиозвездами»; для проверки этого предположения требовались точные координаты радиоисточников, чтобы попытаться отождествить их с известными звездами. Радиотелескопы тех лет давали очень размытую картинку, поэтому применялись «обходные маневры». Весьма эффективным оказался метод покрытия Луной: небесная механика позволяет точно вычислить положение лунного края в любой момент времени. Наблюдая несколько раз, в какие моменты радиоисточник скрывался за диском Луны, удается довольно аккуратно определить его координаты. Как только в начале 1960-х гг. австралийские радиоастрономы, применив метод покрытия Луной, стали получать точные координаты радиоисточников из наиболее полного в тот момент Третьего кембриджского радиокаталога (3С), сразу же удалось отождествить некоторые из них с оптическими объектами. В частности, на месте источника 3С 273 оказалась голубая звездочка весьма умеренного блеска ($m_v = 12,9$) с узким и длинным клочковатым выбросом (рис. 9.6 и 9.7).

Расшифровать спектр этой звезды удалось не сразу: в нем было лишь несколько широких эмиссионных линий на совершенно непривычных местах. Ключ к разгадке спектров квазаров нашел американский астроном Мартин Шмидт: он догадался, что 4 линии из 6 в спектре объекта 3С 273 принадлежат водороду и являются обычной серией Бальмера (H_α , H_β , H_γ и H_δ), смещенной в красную область на одинаковую величину $z = 0,158$. Это могло означать только одно — объект 3С 273 является внегалактическим, и линии в его спектре испытали космологическое красное смещение $z = 0,158$. Вскоре удалось определить красные смещения и для других отождествленных к этому времени квазизвездных радиоисточников: 3С 48, 3С 196, 3С 286. И каждый раз подтверждался вывод Шмидта о внегалактической природе этих квазаров.

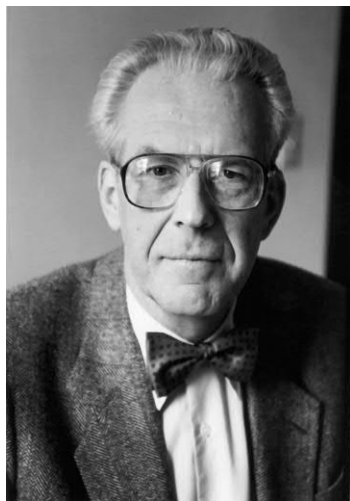


Рис. 9.8. Первооткрыватель радиоквазаров, ученик Яна Оорта, американский астроном Мартин Шмидт.



Рис. 9.9. Аллан Сэндидж (1926–2010) — первооткрыватель радиоспокойных квазаров.

В 1965 г. Аллан Сэндидж (США) обнаружил, что существуют и практически не излучающие в радиодиапазоне, «радиотихие» квазары — так называемые квазизвездные галактики (КЗГ, квазаги, QSG), причем их число на единицу площади неба заметно (в 50 раз) превышает число радиоквазаров. Вместе эти два типа получили название *квазизвездных объектов* (QSO, КЗО).

Обнаружение квазаров поставило перед астрофизиками вопрос об их природе. Прежде всего нужно было понять, находятся ли квазары в недрах галактик, или это «голые ядра», из которых рождаются галактики, как полагал Амбарцумян, или же некоторые из них выброшены с очень большими скоростями из центральных областей близких галактик, как предполагали Дж. Бербидж и Х. Арп. Разгадать эту загадку удалось только через 10 лет, когда Дж. Кристиан убедительно показал, что вокруг всех относительно близких квазаров ($z < 0,5$) видны протяженные области типичного для звездных галактик цвета. Иными словами, квазары находятся в недрах «хозяйских галактик» (рис. 9.11 и 9.12). Когда были получены спектры этих галактик и измерены красные смещения их линий, стало окончательно ясно, что это не случайные совпадения: скорости удаления квазаров и их хозяй-

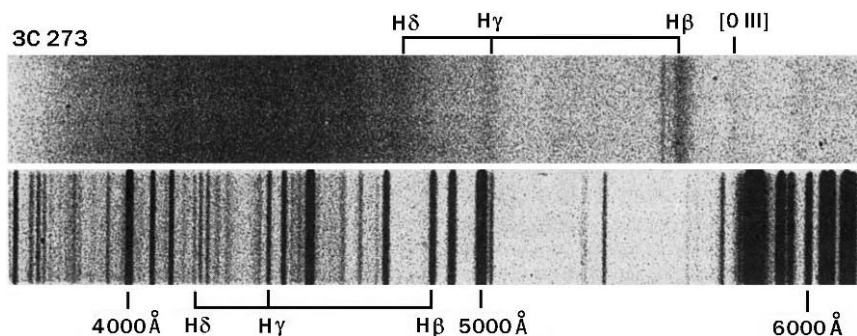


Рис. 9.10. Спектр квазара 3С 273 и под ним лабораторный спектр сравнения. В спектре квазара наиболее заметны линии излучения водорода $H\delta$, $H\gamma$, $H\beta$ (изображение негативное, поэтому линии темные). В лабораторном спектре отмечено положение тех же линий: красное смещение составляет $z = 0,158$.

ских галактик оказались одинаковыми. Следовательно, квазары связаны с ядрами массивных галактик, причем «радиогромкие» квазары располагаются в ядрах гигантских эллиптических галактик, а «радиотихие» — в ядрах либо спиральных, либо эллиптических галактик, часто со следами взаимодействия с соседями.

Квазары превосходят по светимости свои хозяйские галактики порой в сотни и даже более раз, хотя их размеры в тысячи и сотни тысяч раз меньше, чем у галактик. Это привело Шкловского к предположению, что квазары могут оказаться сильно переменными в оптике на временах порядка нескольких лет. И такая переменность действительно была обнаружена, впервые все у того же 3С 273. Это открытие в 1963 г. сделали молодые московские астрономы Ю. Н. Ефремов и А. С. Шаров, воспользовавшись снимками неба, накопленными за много лет в фототеке ГАИШ. А еще через два года ученик Шкловского Г. Б. Шоломицкий обнаружил переменность радиопотока от квазара СТА-102 с периодом около 100 суток, вызвав переполох в средствах массовой информации по поводу «братьев по разуму». Кривая блеска объекта СТА-102 была даже воспроизведена в газете «Правда». Однако результат был не слишком надежным, так что Шоломицкий даже не включил его в докторскую диссертацию.

9.1.3. Первые модели квазаров

Астрономическое сообщество с энтузиазмом встретило открытие такой необычной межгалактической популяции, как квазары, поскольку это обещало прорыв в понимании природы активных ядер галактик и в десятки раз расширяло границы наблюдаемой части Вселен-

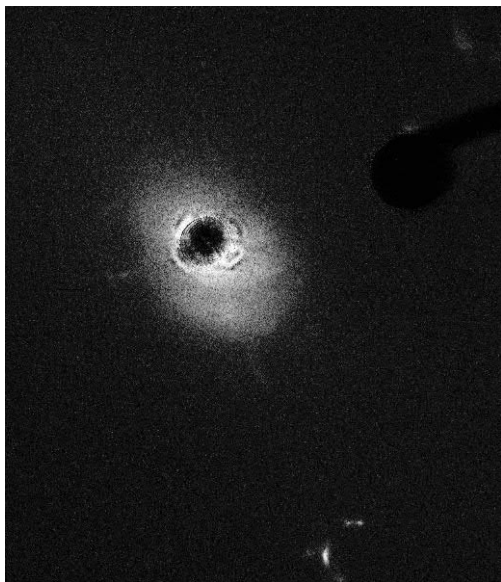


Рис. 9.11. Хозяйская галактика квазара 3С 273, сфотографированная космическим телескопом «Хаббл». Яркая центральная область галактики, где располагается сам квазар, закрыта экраном звездного коронографа. Только так удастся заметить внешние области галактики, которые по яркости значительно уступают ее активному ядру с квазаром.

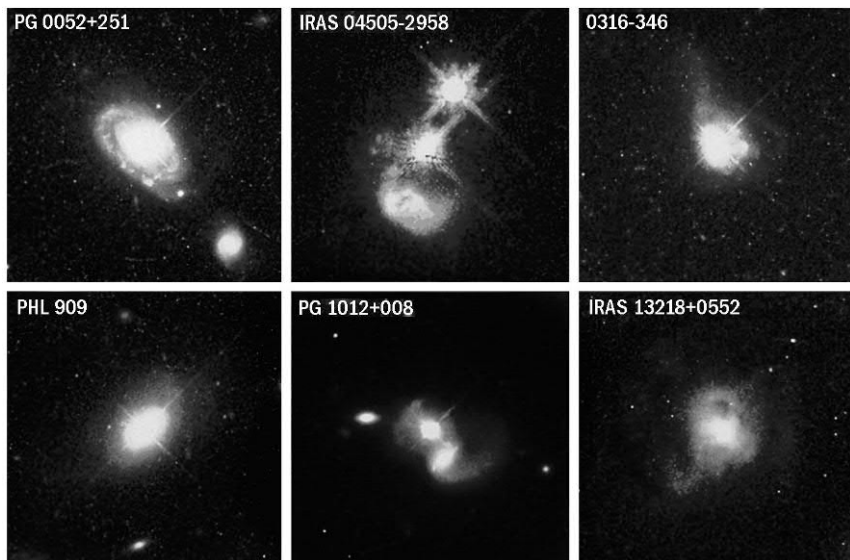


Рис. 9.12 Хозяйские галактики нескольких квазаров, удаленных от нас на 400–900 Мпк. Некоторые из них – обычные спиральные (слева сверху) или эллиптические (слева внизу) галактики. Другие – результат столкновения и слияния двух галактик (в центре сверху и внизу, справа внизу). Приливный «хвост» у квазара 0316-346 (вверху справа) указывает на то, что рядом с этой галактикой недавно пролетела другая. Фото: «Хаббл», NASA.

ной — Метагалактики. Теоретики, не теряя времени, начали предлагать различные гипотезы о природе квазаров, стремясь объяснить их наблюдаемые свойства. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков (1964 г.) дали нижнюю оценку массы квазара, исходя из предположения, что она не может быть меньше массы (M), необходимой для гравитационного удержания плазмы, подверженной давлению излучения самого квазара, — это так называемый *эддингтоновский предел* светимости (в сферически симметричной модели):

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4 \, G M m_p c}{\tau} = 1,38 \cdot 10^{31} (M/M_{\odot}) \text{ Вт} = 3,3 \cdot 10^4 L_{\odot} (M/M_{\odot}),$$

где m_p — масса протона, c — скорость света, G — гравитационная постоянная, τ — томсоновское сечение электрона. Предполагается, что гравитация притягивает массивные протоны, а излучение отталкивает плазму в основном путем томсоновского рассеяния квантов на электронах. Нижней границей оптической светимости квазаров принято считать абсолютную звездную величину $M_B = -23^m$, что соответствует оптической светимости очень крупных галактик. При нормальном спектре это дает болометрическую (полную) светимость около 10^{38} Вт. Отсюда следует вывод о минимальной массе квазара: $M > 10^7 M_{\odot}$.

В 1964 г. ведущие теоретики — В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, С. И. Сыроватский и др. — начали обсуждать возможные механизмы оптического излучения квазаров. И. С. Шкловский (1965 г.) высказал предположение, что за активность в ядрах сейфертовских галактик ответственны «мини-квазары». Широко обсуждался вопрос о возможной временной шкале столь мощного энерговыделения квазаров. Большинство исследователей пришло к выводу, что характерное время жизни квазара в его активной стадии вряд ли превышает 10^7 лет. Это следует из энергетических соображений: за 10^7 лет средний квазар высвечивает $E \sim 10^{54}$ Дж, что соответствует полной переработке в энергию $M = E/c^2 \sim 10^7 M_{\odot}$, то есть значительной доли его массы. Такое же характерное время получается из сопоставления пространственных плотностей числа квазаров и числа ярких галактик, если считать, что они генетически связаны.

На первый взгляд, 10^7 лет — небольшое время для межгалактического объекта; всего лишь $1/20$ периода оборота нашей Галактики. Но и такое относительно небольшое время оказалось слишком продолжительным для некоторых гипотез о физической природе квазаров. Вот некоторые из них.

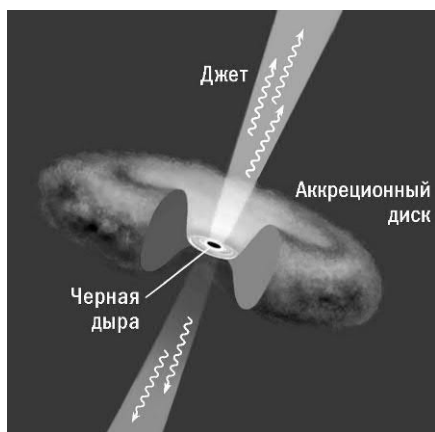


Рис. 9.13. Квазар в модели черной дыры с аккреционным диском и джетом.

$E \sim Mc^2$. Поэтому жизнь сверхзвезды ограничена кельвиновской стадией, т. е. стадией гравитационного коллапса. Во-вторых, звезды с массами более $10^3 M_{\odot}$ очень неустойчивы: время их жизни $\sim 10^4$ лет. Пытаясь спасти модель, Я. Б. Зельдович с сотрудниками рассмотрели возможность стабилизировать сверхзвезду ее быстрым вращением. Но и при этом не удавалось продлить ее жизнь более чем до 10^6 лет.

Модель сверхзвезды пытались усложнить, представляя ее в виде «магнетоида», гравитационному сжатию в котором противостоит давление крупномасштабного турбулентного магнитного поля (В. Л. Гинзбург, Д. Лэйзер, Л. М. Озерной, Н. С. Кардашев). Для нее предлагался внешний источник энергии в виде ударных волн от пролетающих сквозь нее нормальных звезд галактического ядра (Э. Я. Вильковский). Дольше других продержалась модель массивной вращающейся сверхзвезды — массивного пульсара, который может сформироваться из замагниченного аккреционного диска (Х. Соррел, Л. М. Озерной, В. В. Усов).

Некоторое время изучалась модель плотного звездного скопления, основная энергия в котором выделяется за счет столкновений звезд. Но этот процесс не давал необходимой мощности излучения. Позже обратили внимание, что отдельные всплески яркости квазаров по энергии близки к взрывам сверхновых ($\sim 10^{45}$ Дж), и это привлекло внимание к модели компактного звездного скопления с частыми вспышками сверхновых (Дж. Бербидж, В. Камерон, С. Колгейт). В качестве экзотических источников энергии квазаров рассматрива-

Одной из первых была модель квазара в виде чрезвычайно массивной «сверхзвезды», предложенная в 1963 г. Ф. Хойлом и У. Фаулером, но у нее оказалось много недостатков. Во-первых, источник энергии звезд не очень эффективен: в термоядерных реакциях в энергию превращается лишь около 1% массы ($E = \Delta Mc^2$, $0,01 Mc^2$). С самого начала было ясно, что в массивных объектах гравитация эффективнее ядерных реакций: при гравитационном коллапсе выделяется энергия

лись даже задержавшиеся в своем расширении участки Вселенной — белые дыры (И. Д. Новиков). Но и эта модель не смогла объяснить относительно большое время жизни квазара.

Пожалуй, единственной выжившей на сегодняшний день моделью активного ядра галактики, и в том числе квазара, осталась модель массивной черной дыры с аккреционным диском (Д. Линден-Белл; М. Рис, Дж. Прингл). Со временем у этой модели (рис. 9.13) появился ряд модификаций. Например, в некоторых работах рассматривалась модель с двойной черной дырой (Б. В. Комберг, Н. Рус, М. Гаскелл) или учитывалось присутствие внешнего магнитного поля (Р. Блендфорд, А. Знайек и др.).

Итак, что же стало известно о свойствах квазаров к настоящему времени, т. е. спустя почти 50 лет после их открытия?

9.2. Квазары: 50 лет спустя

9.2.1. Немного статистики

Сейчас по косвенным признакам (в основном по цвету) насчитываются сотни тысяч кандидатов в квазары, а надежно, по измеренным красным смещениям, их выявлено около 100 000. Выяснилось, что диапазон красных смещений квазаров простирается от $z = 0,04$ (тот самый HZ 46), что соответствует расстоянию всего лишь 200 Мпк, до $z \sim 6-7$, что соответствует космологической эпохе, отстоящей менее

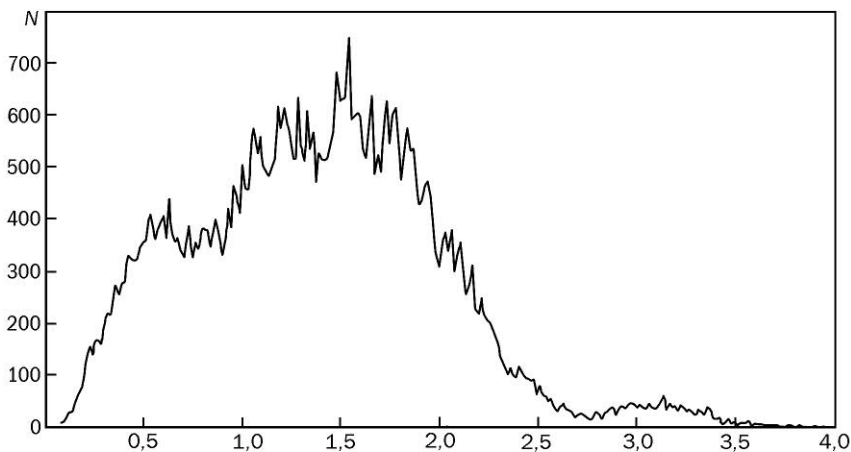


Рис. 9.14 Распределение 65 000 квазаров по их красному смещению (z). По вертикальной оси — число квазаров в интервале $z = 0,01$. График построен по данным Слоановского обзора неба (SDSS).

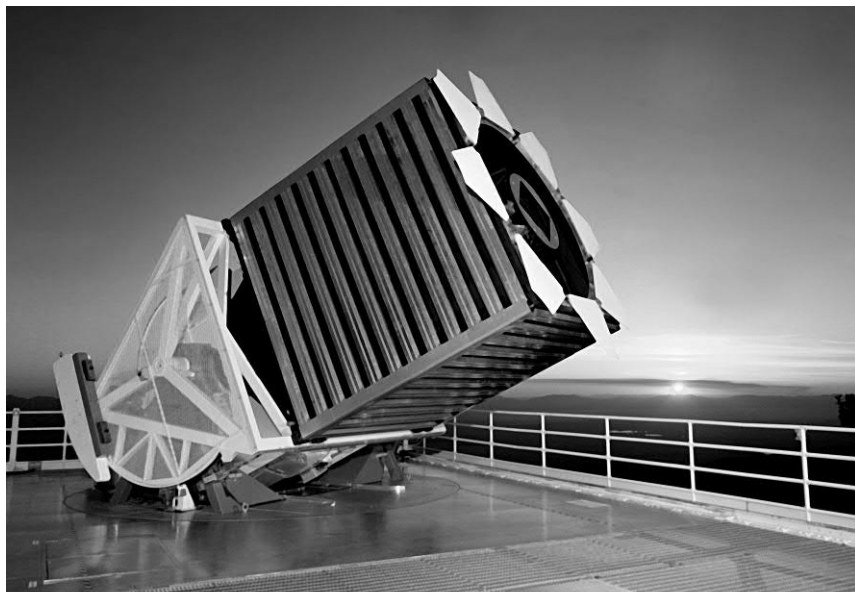


Рис. 9.15. Специализированный 2,5-метровый широкоугольный телескоп Фонда Слоана (Alfred P. Sloan Foundation) в обсерватории Апаче Пойнт (шт. Нью Мексико). С его помощью в 2000–2005 гг. был проведен Слоановский многоцветный и спектральный обзор северного неба.

чем на 1 млрд лет от «начала времен», т. е. от Большого взрыва (рис. 9.14 и 9.32). Видимые звездные величины квазаров заключены в диапазоне от 13^m до 24^m с максимумом при $m_V = 19$; их абсолютные звездные величины лежат в интервале от -23^m (по определению) до -32^m с максимумом при $M_V = -27$. Для сравнения: у нашей галактики и у Туманности Андромеды $M_V = -21$. Это означает, что средний квазар в оптическом диапазоне в сотни раз ярче нормальных галактик, а квазары-чемпионы сияют как десятки тысяч галактик!

Квазары распределены в пространстве несравненно реже, чем яркие галактики: в то время как вблизи нас одна крупная галактика в среднем приходится на несколько кубических мегапарсеков, один яркий квазар в среднем приходится примерно на миллиард кубических мегапарсеков. Правда, с увеличением красного смещения пространственная плотность квазаров возрастает, и при $z = 2-3$ один квазар уже можно найти в миллионе кубических мегапарсеков (рис. 9.16). При этом речь идет, разумеется, об объемах сопутствующего пространства, в котором физический размер «парсека» убывает в прошлое как $(1+z)$ для учета расширения Вселенной. В таких координатах паде-

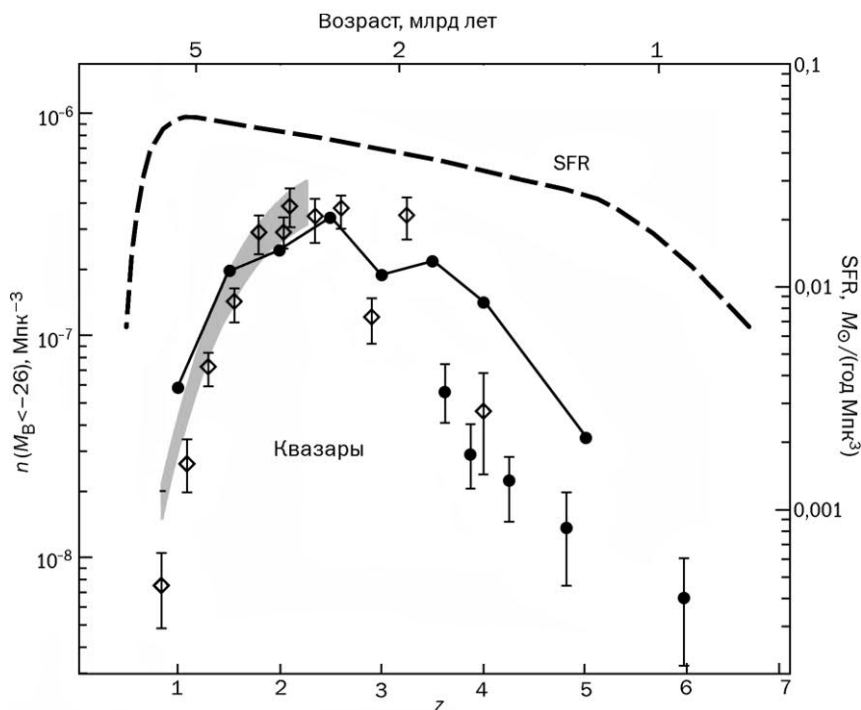


Рис. 9.16. Эволюция пространственной плотности квазаров с M_B менее -26^m в сопутствующем пространстве. Значки «усами» — результат наблюдений по различным обзорам. Точки, соединенные линии, и серая полоса — результат моделирования в предположении времени жизни квазаров $2 \cdot 10^7$ лет (Di Matteo и др., 2003). Для сравнения штриховой линией показана эволюция средней по сопутствующему пространству интенсивности звездообразования (star formation rate, SFR) в галактиках (Schaerer и др., 2007).

ние плотности квазаров в нашу эпоху связано с их реальным «отключением», а не с эффектом космологического расширения мира.

По-видимому, максимум пространственной плотности квазаров достигается при $z \approx 2-3$ одновременно с максимумом темпа формирования массивных галактик, расположенных в центральных областях богатых скоплений. Таким образом, по квазарам можно отслеживать крупномасштабную структуру Вселенной (т. е. распределение скоплений галактик) на очень больших расстояниях, где ее наблюдение по самим галактикам затруднено по причине их недостаточной яркости. Правда, при этом картина крупномасштабной структуры получается не такой подробной, как при ее выявлении по близким галактикам. Дело в том, что время жизни квазара в тысячи раз меньше времени

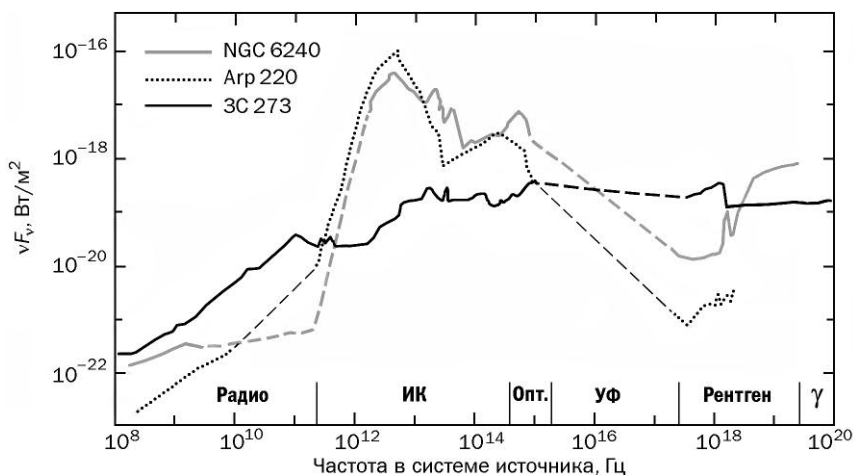


Рис. 9.17. Распределение энергии в спектре квазара 3C 273, галактики с активным ядром NGC 6240 и галактики со вспышкой звездообразования Arp 220. Штриховой линией показана интерполяция спектров в тех областях, где нет наблюдений (Mainieri и др., 2005).

существования звездных систем, которое определяется длительно-стью эволюции звезд. Поэтому по квазарам выделяются лишь отдельные «узлы» крупномасштабной структуры. В частности, по ним найдены очень далекие сверхскопления галактик, которые наблюдаются как большие группы из десятков квазаров в областях размером в десятки мегапарсеков.

Хотя на снимках квазары выглядят как звезды, впечатление это обманчивое: по мощности излучения (10^{38} – 10^{41} Вт) они превосходят типичные звезды в 10^{12} – 10^{15} раз! То же и с цветом: по своим оптическим цветам ($U-B$, $B-V$) квазары напоминают молодые горячие звезды, но в действительности их непрерывный спектр совершенно не похож на спектр звезды. Непрерывный спектр квазара в очень широком диапазоне частот (от радио- до гамма-) имеет степенной вид ($F \propto \nu^{-\alpha}$, при $\alpha \approx 0,7-1,0$) и обусловлен синхротронным излучением релятивистских электронов с добавкой на высокоэнергичном хвосте излучения за счет обратного эффекта Комптона, при котором кванты получают дополнительную энергию, рассеиваясь на быстрых электронах. На это нетепловое излучение наложены два широких тепловых горба: с максимумом на частоте $\approx 3 \cdot 10^{12}$ Гц от нагретой пыли и с вторым максимумом на $\gtrsim 10^{16}$ Гц от горячей плазмы околоядерного диска (рис. 9.17). Наиболее изученными участками в спектрах кваза-

ров являются радио- и оптический диапазоны, хотя в последние годы многие квазары обнаруживаются и в рентгене.

9.2.2. Радиогромкие и радиотихие квазары

По светимости в радиодиапазоне квазары и радиогалактики традиционно делят на *радиогромкие* и *радиотихие*. Границей между ними считается спектральная мощность излучения всего объекта в целом, с окружающими ядро протяженными областями, на частоте 5 ГГц, равная 10^{25} Вт/Гц:

$$P_{5\text{GHz}}^{\text{tot}} < 10^{25} \text{ Вт/Гц} \text{ — радиотихие (радиоспокойные);}$$

$$P_{5\text{GHz}}^{\text{tot}} > 10^{25} \text{ Вт/Гц} \text{ — радиогромкие.}$$

Впрочем, в последние годы стали обнаруживать и объекты промежуточного типа. Используя системы апертурного синтеза с угловым разрешением в секунды дуги, получили радиоизображения квазаров, в общих чертах похожие на изображения радиогалактик. На них выделяются: ядра с плоским спектром ($\alpha < 0,5$), узкие струйные, часто односторонние выбросы — джеты (jet) с более крутым спектром ($\alpha \geq 0,7$) и протяженные структуры — «пузыри», или «уши» (lobe), с еще более крутым спектром ($\alpha > 1$). Изображения, полученные интерферометрами со сверхдлинной базой, имеющие угловое разрешение вплоть до долей угловой микросекунды (milliarcsecond, $1 \text{ mas} = 0,001$), показали, что центральные радиоисточники квазаров состоят из до сих пор не разрешенных слабопеременных ядер и вылетающих из них отдельных компактных радиокомпонентов, нередко движущихся с наблюдаемой сверхсветовой скоростью ($v_{\text{набл}} > c$). Это не противоречит физике: если излучающий объект движется к наблюдателю с субсветовой скоростью ($v < c$) под малым углом к лучу зрения, то наблюдаемая в картинной плоскости скорость может быть сколь угодно большой:

$$v_{\text{набл}} = \frac{v \sin \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta}.$$

Например, при $v = 0,95 c$ и $\theta = 20^\circ$ наблюдаемая скорость источника составляет $v_{\text{набл}} = 3,2 c$. Вылетающие из ядра радиокомпоненты обычно движутся по винтовой траектории и теряют яркость в течение нескольких лет. Появление каждого нового компонента сопровождается всплеском радиоизлучения, которому предшествует оптическая вспышка.

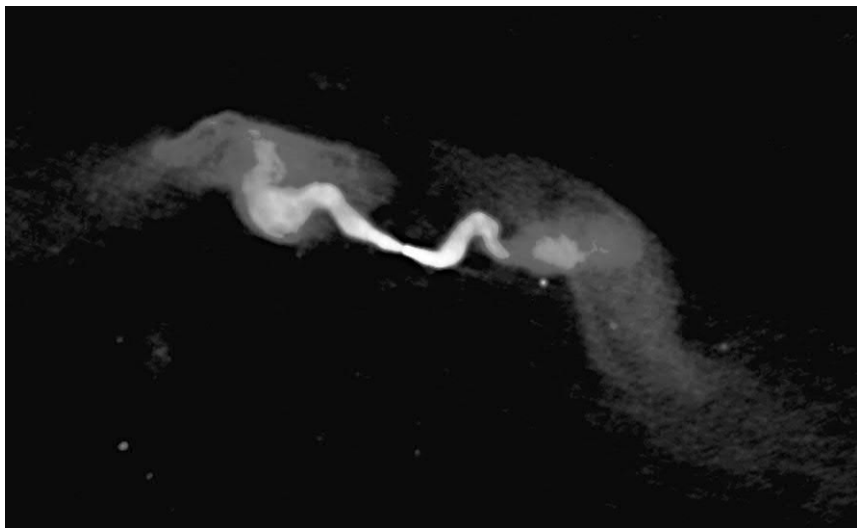


Рис. 9.18. Радиогалактика 3C 31 с двумя протяженными компонентами, яркость которых уменьшается по мере удаления от ядра (тип FRI).



Рис. 9.19. Радиогалактика Лебедь А с узкими джетами и протяженными компонентами, на внешних краях которых видны горячие пятна (тип FRII).

Чем выше частотный диапазон наблюдений, тем более короткие временные изменения присутствуют в кривых блеска квазаров. Если в радиодиапазоне существенное изменение потока происходит за месяцы и годы, то в оптике это могут быть недели, а в рентгене — дни и часы. Впрочем, у очень компактных источников даже в радиодиапазоне видны суточные изменения. Интересно, что изменения интенсивности сначала возникают в рентгене, затем в оптике и лишь че-

рез месяцы — в радио. Причины кратковременной вспышечной переменности в ядрах галактик не совсем ясны. У исследователей на этот счет нет единого мнения. Разумеется, физические причины переменности в разных диапазонах спектра могут быть разными. Ясно только, что сам феномен переменности связан с процессами неустойчивости либо в аккреционном диске, либо в потоке релятивистских частиц, образующих выбросы (джеты), а возможно, и там и там. Не последнюю роль в процессах, ответственных за переменность, может играть пересоединение магнитных полей, а также ударные волны, на фронтах которых в выбросах может происходить ускорение излучающих частиц.

Иногда переменность носит квазипериодический характер с характерными временами в годы или десятки лет. Пока не совсем ясно, с чем это связано. За периодические изменения наблюдаемого потока может быть ответственна прецессия окооядерного газового диска, которая, в свою очередь, приводит к прецессии релятивистских выбросов, ускоряющихся по оси диска (см. рис. 14 цветной вкладки). Другой причиной этого может быть двойственность ядра галактики, т. е. присутствие в нем относительно тесной пары массивных черных дыр, которые со временем сближаются и должны слиться. Наблюдать это было бы особенно интересно тем астрофизикам, кто занят поиском гравитационных волн.

Остановимся еще на вопросе о радиоморфологии галактик с активными ядрами. В 1974 г. Фанаров (B. L. Fanaroff) и Райли (J. M. Riley) предложили простое деление радиогромких объектов по внешнему виду их протяженных радиоструктур. В качестве параметра для деления они взяли отношение расстояния между ярчайшими областями с двух сторон от активного ядра галактики или квазара к полному размеру радиоисточника, измеренному по самым внешним его контурам (компактный источник в центре галактики в расчет не принимался). Если это отношение меньше 0,5, объект отнесли к типу I, если больше чем 0,5 — к типу II. Теперь эти типы принято обозначать как FRI и FR II. Характерный вид радиоисточников этих двух типов показан на рис. 9.18 и 9.19. Оказалось, что принадлежность источника к тому или иному типу связана с мощностью его радиоизлучения: объекты низкой мощности имеют структуру типа FRI, как у радиогалактики 3C 31 (NGC 383), а мощные объекты имеют структуру типа FR II, как у радиогалактики Лебедь А (Cygnus A, см. рис. 12 и 13 цветной вкладки). Пограничное значение спектральной мощности излучения на частоте 178 МГц составляет примерно $2 \cdot 10^{25}$ Вт/(Гц · ср).

Позже было показано, что граница радиомощности между этими двумя типами сама растет с ростом оптической светимости хозяйской галактики (а последняя очевидно связана с массой центральной черной дыры). Так как радиоквазары имеют высокие радиосветимости, то они, как правило, имеют радиоморфологию типа FR II. Наблюдения показали, что при не очень больших красных смещениях ($z < 0,5$) источники типа FR II избегают областей, занятых богатыми скоплениями галактик, — там встречаются лишь источники типа FR I. Однако при $z > 0,5$ это уже не так. Складывается впечатление, что вид протяженной радиоструктуры активного ядра галактики зависит, во-первых, от мощности самого ядра в радиодиапазоне, а во-вторых, от плотности межгалактической среды в скоплении галактик. Относительно молодые и мощные источники (в первую очередь это радиогромкие квазары) могут выглядеть как FR II даже в богатых скоплениях. Но по мере ослабления активности ядра газ в скоплении начинает тормозить протяженные радиокомпоненты и даже может поджимать их к центру скопления, т. е. к хозяйской галактике, превращая тип радиоисточника в FR I. Получается, что радиоисточники типа FR I связаны с более старыми объектами, чем источники типа FR II. Косвенно об этом свидетельствует тот факт, что массы черных дыр в ядрах FR I больше, чем в ядрах FR II. Кроме того, далекие (более молодые) скопления имеют в своих центральных областях менее плотный газ, поэтому там могут наблюдаться FR II. А в более близких к нам (т. е. более старых) скоплениях, у которых плотность газа в центре со временем возрастает, наблюдаются уже только источники типа FR I. И в них нет радиоквазаров, так как из-за своей короткой шкалы активности квазары там уже «прогорели», превратившись в более спокойные радиогалактики.

Обсуждая свойства квазаров, мы уже отмечали, что мощными радиоисточниками являются лишь 10% из них. Эти радиогромкие квазары по своим радиосвойствам почти не отличаются от радиогалактик, если отвлечься от их ядер. По радиоизображениям практически невозможно сказать, является источник радиогалактикой или квазаром. Поэтому не исключено, что радиогалактики — это просто старые квазары, у которых ослабла активность ядра, а протяженные радиокомпоненты еще доживают свой более долгий век. Их медленное затухание объясняется тем, что излучают они за счет синхротронного механизма, а энергия электронов и напряженность магнитного поля в протяженных компонентах заметно меньше, чем в ядрах, поэтому и темп потери энергии ниже.

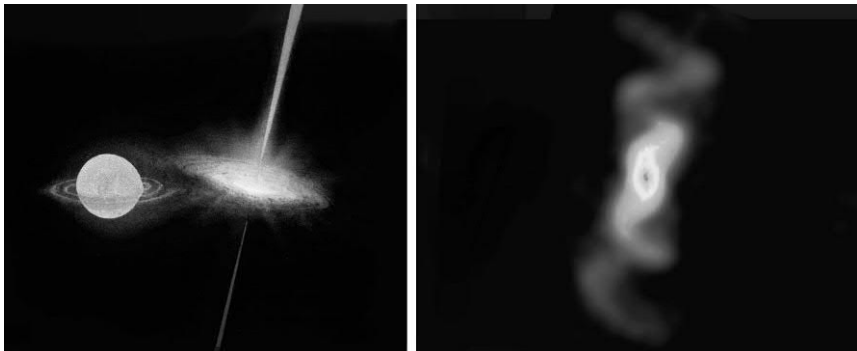


Рис. 9.20. Микроквазар SS 433 (слева, рисунок художника) — затменная двойная звездная система в нашей галактике, на расстоянии 6 кпк от Солнца в созвездии Орел. Один из ее компонентов — нормальная массивная звезда, второй — нейтронная звезда или черная дыра, окруженная аккреционным диском, вдоль оси которого выбрасываются плазменные струи со скоростью 0,26 с. Прецессия диска приводит к тому, что струи закручиваются штопором, как это видно на радиоизображении справа, полученном в 2004 г. системой апертурного синтеза VLA (Blundell & Bowler, NRAO/AUI/NSF).

Интересно, что у радиотихих квазаров в диапазоне метровых волн часто наблюдаются «старые» протяженные радиокомпоненты. Это наводит на мысль, что и такие квазары когда-то были радиогромкими. К такому выводу подталкивают и наблюдения так называемых *микроквазаров*, обнаруженных Феликсом Мирабелем в 1992 г. Это двойные звездные системы (нормальная звезда + черная дыра или нейтронная звезда), которые по внешнему проявлению своей активности очень напоминают миниатюрные квазары (рис. 9.20), хотя массы их черных дыр (или нейтронных звезд) в десятки миллионов раз меньше, чем у квазаров. Естественно, это во столько же раз уменьшает их мощность, а также временные и пространственные масштабы. Поэтому все процессы в микроквазарах происходят прямо на глазах, за десятки минут. Наблюдая их, можно проследить, как изменяются радиосвойства микроквазара в зависимости от темпа аккреции вещества со звезды-компаньона.

В квазарах, которые связаны с массивными черными дырами, эти переходные процессы от сильного радиоизлучения к слабому могут занимать тысячи лет и, естественно, не могут быть отслежены на масштабах десятков лет. Поэтому мы и воспринимаем данный квазар либо как радиогромкий, либо как радиотихий. На самом деле это просто разные состояния одного и того же объекта, в котором фаза *радио* примерно в 10 раз короче, чем фаза *нерадио*. Интересно, что в

микроквазарах временное соотношение этих фаз примерно такое же. Фаза переходного состояния — от радио к нерадио и наоборот — у микроквазаров характеризуется сильной переменностью. Не исключено, что это может наблюдаться и у настоящих квазаров. Тогда вполне естественно предположить, что в этом переходном состоянии квазары проявляют себя как объекты типа BL Lacertae, для которых характерна быстрая переменность.

По современным представлениям, активность ядер галактик связана с аккрецией вещества на сверхмассивную черную дыру ($M_{\text{BH}} = 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$). Вокруг нее при этом формируется аккреционный диск, в котором под действием взаимного трения слоев происходит превращение гравитационной энергии падающего вещества в кинетическую и тепловую энергию, которая в итоге покидает диск в виде излучения и потока быстрых частиц — джета. То же самое происходит и в микроквазарах, связанных с компактными объектами звездной массы. Правда, в легких звездных системах аккреционные диски светят в рентгеновском диапазоне, а в массивных квазарах они излучают в основном ультрафиолет. Причина в том, что существует простая физическая связь между массой черной дыры (M_{BH}) и характерной температурой ее аккреционного диска (T_d). Основная часть энергии выделяется вблизи внутреннего края диска, который располагается на расстоянии около $3r_g$ от черной дыры (это радиус последней устойчивой орбиты). Ширина этой области тоже порядка r_g . Поэтому площадь горячей области диска $\sim r_g^2 M_{\text{BH}}^2$. Мощность излучения из этой области, согласно закону Стефана—Больцмана, $L \sim r_g^2 T_d^4 M_{\text{BH}}^2$. Обычно это излучение составляет заметную долю эддингтоновской светимости источника: $L \sim L_{\text{Edd}} M_{\text{BH}}$. Отсюда и получается зависимость характерной температуры ее аккреционного диска от массы черной дыры: $T_d^4 \sim 1/M_{\text{BH}}$. Как видим, у массивных дыр диски холоднее. Точная теория дает такую связь:

$$T_d = 2 \cdot 10^7 \text{ K } (M_{\text{BH}}/M_{\odot})^{-1/4}.$$

Если падающее на диск вещество замагничено, то его кинетическая энергия может непосредственно конвертироваться в электромагнитную. Дело в том, что при подходе к центру диска замагниченная плазма вращается все быстрее, при этом диск становится генератором магнитодипольного излучения, а ядро галактики можно рассматривать как своеобразный гигантский пульсар, подобный быстро вращающейся нейтронной звезде-радиопульсару. Ситуация еще больше усложняется, если принять во внимание, что и сама массивная чер-

ная дыра должна вращаться и своим вращающимся гравитационным полем добавочно увлекать замагниченную окружающую плазму. При этом возникает так называемое магнитодинамическое излучение Блендфорда—Знайека, аналогичное магнитодипольному излучению от шарика радиусом R с магнитным дипольным полем B и угловой скоростью вращения :

$$L \sim \frac{B^2}{c^3} R^6 + \frac{B^2}{c^3} R^4 R^2.$$

Вблизи горизонта событий черной дыры $R \sim r_g = 2GM_{\text{ВН}}/c^2$, а скорость движения близка к скорости света. Поэтому вместо линейной скорости вращения R можно подставить скорость света. В результате мы увидим, что $L \sim B^2 M_{\text{ВН}}^2$. Напряженность магнитного поля и его распределение в аккреционном диске известны плохо. Обычно усредненное на размере $\sim 10^{13}$ м поле считают равным $\sim 10^3$ – 10^4 Гс. Важно, что магнитодипольная светимость растет как квадрат массы черной дыры, а ее критическая (эддингтоновская) светимость — всего лишь как первая степень массы. Поэтому с ростом массы черной дыры роль давления излучения в окружающем ее веществе возрастает (любопытно, что аналогичная зависимость характерна и для нормальных звезд).

Ясно, что энерговыделение в окрестности массивной черной дыры связано с динамикой аккреционного диска, которая определяется не только массой дыры, но также эффективной вязкостью диска (— параметр вязкости по Н. И. Шакуре и Р. А. Сюняеву) и темпом аккреции, выраженным в эддингтоновских единицах ($\dot{m} = \dot{M}/\dot{M}_{\text{edd}}$). При высоком темпе аккреции ($\dot{m} \geq a^2$) вещество медленно продвигается по радиусу диска и поэтому плотно его заполняет. Диск похож на фотосферу звезды — его излучение имеет тепловой характер. А при высокой вязкости ($a^2 \geq \dot{m}$) вещество быстро движется к центру диска, поэтому плотность его мала, и кулоновское взаимодействие не успевает передавать выделившуюся тепловую энергию от ионов электронам. В результате электроны оказываются значительно холоднее ионов, и диск плохо охлаждается, поскольку все механизмы излучения связаны с движением электронов. Выделяющаяся в таком диске механическая энергия недостаточно эффективно перерабатывается в излучение и вместе с ионами перемещается вдоль диска к его центру. Такой режим аккреции называют адвекцией. При этом центральная область диска сильно нагревается, образуя горячую корону и создавая условия для возникновения быстрого оттекающего ветра. В за-

магнитном ветре может происходить ускорение заряженных частиц до высоких (релятивистских) энергий; такие частицы способны генерировать синхротронное излучение. При этом объект становится радиогромким.

Таким образом, темп аккреции вещества на черную дыру может управлять процессами излучения от околоядерной области аккреционного диска, меняя тип активности, а значит, и тип активного ядра галактики. Такой вывод в рамках представления об активном ядре как аккрецирующей сверхмассивной черной дыре вносит существенные коррективы в «унифицированную схему» активных ядер галактик. Сама же эта схема выглядит сегодня так: активное ядро с выбросом под углом $> 75^\circ$ к лучу зрения представляется нам радиогалактикой, под углом $< 45^\circ$ — квазаром, а при $< 30^\circ$ — лацертидой (т. е. объектом типа BL Lac). Действительно, часть свойств активного ядра может зависеть от ориентации, так как вокруг аккреционного диска может существовать гораздо более толстый газово-пылевой тор, который способен перехватывать излучение активного ядра и, перерабатывая его на пыли, трансформировать в инфракрасный диапазон. По этому признаку все активные ядра делят на два типа: объекты I типа развернуты к наблюдателю плашмя, а II типа — ребром. От ориентации должны зависеть и ширины разрешенных линий излучения, которые формируются в газовых облаках диска, вращающихся по кеплеровским орбитам.

На основании такой модели делаются оценки массы черных дыр в центрах галактик, в том числе в квазарах. Остановимся на этом вопросе подробнее.

9.2.3. Эмиссионные линии в спектрах квазаров

Характерной особенностью активных ядер галактик, в том числе квазаров, является присутствие в их спектрах сильных и широких разрешенных линий излучения, в которых порой заключено до 10% от потока в непрерывном спектре. Заметим, что именно излучение в непрерывном спектре поддерживает ионизацию и возбуждение атомов в окружающих ядро плотных газовых облаках, а часть этой энергии покидает ядро в виде эмиссии в линиях. Причем наблюдения показали, что изменения в интенсивности и профилях широких линий происходят с задержкой в десятки дней после изменения в интенсивности непрерывного излучения ядра. По этой задержке можно оценить расстояние до области формирования широких линий (10^{15} – 10^{16} см). Ширины крыльев линий достигают десятков тысяч километров в се-

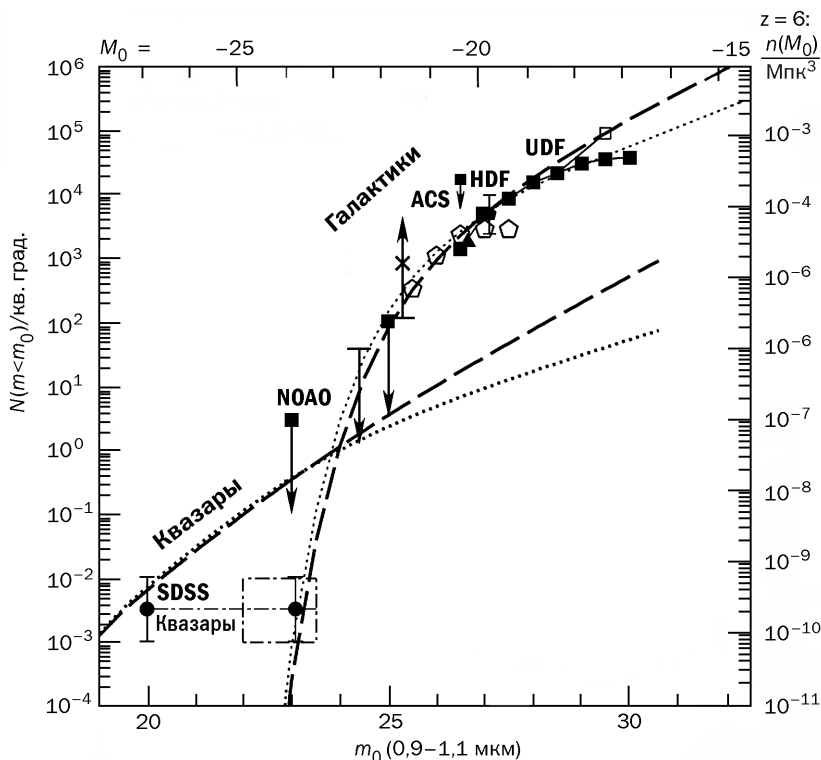


Рис. 9.21. Интегральная функция светимости квазаров и галактик с интенсивным звездообразованием на красных смещениях $z = 5,5$ – $6,5$. Значками показаны наблюдения: наземные (SDSS, NOAO) и космические с телескопом «Хаббл» (ACS, HDF, UDF). Линиями показаны модели при $\Omega_m = 0,27$ и $\Omega = 0,73$. Здесь m_0 – видимая звездная величина в ближнем ИК-диапазоне, M_0 – абсолютная звездная величина при $z = 6$. Показано количество объектов (N) со звездной величиной меньше указанной и их пространственная плотность при $z = 6$ (R. A. Windhorst и др., 2008).

кунду, что свидетельствует о присутствии вблизи активного ядра, в области размером < 1 пк, мощного газового истечения, возможно, коллимированного в виде двух диаметрально противоположащих конусов.

В более протяженной области (~ 100 пк) формируются более узкие запрещенные спектральные линии с ширинами в тысячи километров в секунду, интенсивность которых хорошо коррелирует с интенсивностью радиоизлучения ядра. Более того, область их появления часто совпадает с радиоизотопами. Среди квазаров есть объекты, в спектрах которых не наблюдается линий излучения; именно их

называют *лацертидами* в честь прототипа — BL Lacertae. Судя по всему, линии в их спектрах отсутствуют не потому, что в лацертидах мало газа или низка интенсивность возбуждающего излучения, а просто потому, что линии «замыты» мощным континуумом. Это подтверждается тем фактом, что в минимуме блеска у лацертид часто появляются линии в спектре, а с другой стороны, у квазаров в максимуме блеска линии исчезают.

Считается, что у лацертид ось радиовыброса направлена в среднем под меньшими углами к лучу нашего зрения, чем у квазаров. Именно на учете ориентации окооядерного диска к лучу зрения основана, как мы знаем, «унифицированная схема». Однако эта схема совершенно не учитывает возможных эволюционных изменений в свойствах активных ядер галактик. Например, не исключено, что со временем квазар может превращаться в радиогалактику, а квазизвездная галактика — в галактику Сейферта. Косвенно эта возможность подтверждается плавным переходом их функций светимости друг в друга. Напомним, что функция светимости — это зависимость пространственной плотности объектов в единичном интервале светимости от самой светимости. Функции светимости указанных типов активных галактик плавно переходят друг в друга, как в оптике, так и в радиодиапазоне (рис. 9.21).

9.3. Квазары как инструмент для изучения Метагалактики

Благодаря исключительной яркости квазаров, позволяющей наблюдать их с предельно больших расстояний, у астрономов появилась надежда, используя квазары в качестве «стандартной свечи» или «стандартной линейки», наконец-то оценить параметры модели Вселенной — ее среднюю плотность, константу Хаббла и др. Однако этой надежде не суждено было сбыться. Квазары оказались очень разнообразны как по своей светимости, так и по своим размерам, например, в радиодиапазоне. Поэтому использовать их в качестве космологического стандарта практически невозможно. Например, на рис. 9.22 показана зависимость $m(z)$ для квазаров, которую трудно назвать хаббловской зависимостью по причине сильного разброса точек. Совсем иной вид имеет аналогичная диаграмма (рис. 9.23) для самых ярких членов скоплений галактик (обычно это гигантские эллиптические радиогалактики), по которой хорошо прослеживается космологическая зависимость скорости (z) от расстояния (m).

Как видим, на роль стандартной свечи квазары явно не годятся. Но зато они оказались незаменимы для других целей. Во-первых, са-

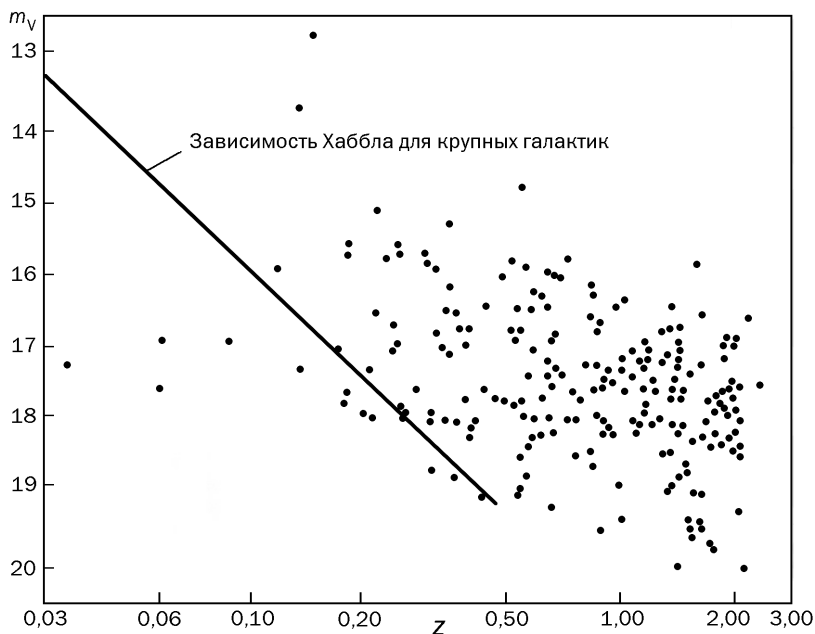


Рис. 9.22. Диаграмма Хаббла для квазаров.

мо их обнаружение на очень больших z стало свидетельством раннего формирования объектов во Вселенной, а наличие в спектрах квазаров линий тяжелых элементов говорит о еще более раннем формировании звезд, обогативших среду металлами. Во-вторых, оказалось очень удобным использовать квазары как своеобразные «щупы Вселенной», которые просвечивают полупрозрачные объекты — галактики, облака межгалактического газа, — лежащие на луче зрения от них до нас.

9.3.1. Линии поглощения в спектрах квазаров

После обнаружения в 1965 г. квазара 3С 9, имеющего $z \approx 2$, и отождествления в его спектре ультрафиолетовой линии Ly α нейтрального водорода (121,6 нм), которая из-за большого красного смещения сдвинулась в оптический диапазон, наблюдаемый с Земли, появилась возможность для оценки плотности нейтрального водорода в межгалактической среде. Этим сразу же попытались воспользоваться Дж. Ганн и Б. Петерсон, но их ждало разочарование. Они смогли определить лишь верхний предел средней плотности холодного межгалактического газа, $n(\text{H I}) < 10^{-11} \text{ см}^{-3}$, так как заметного подав-

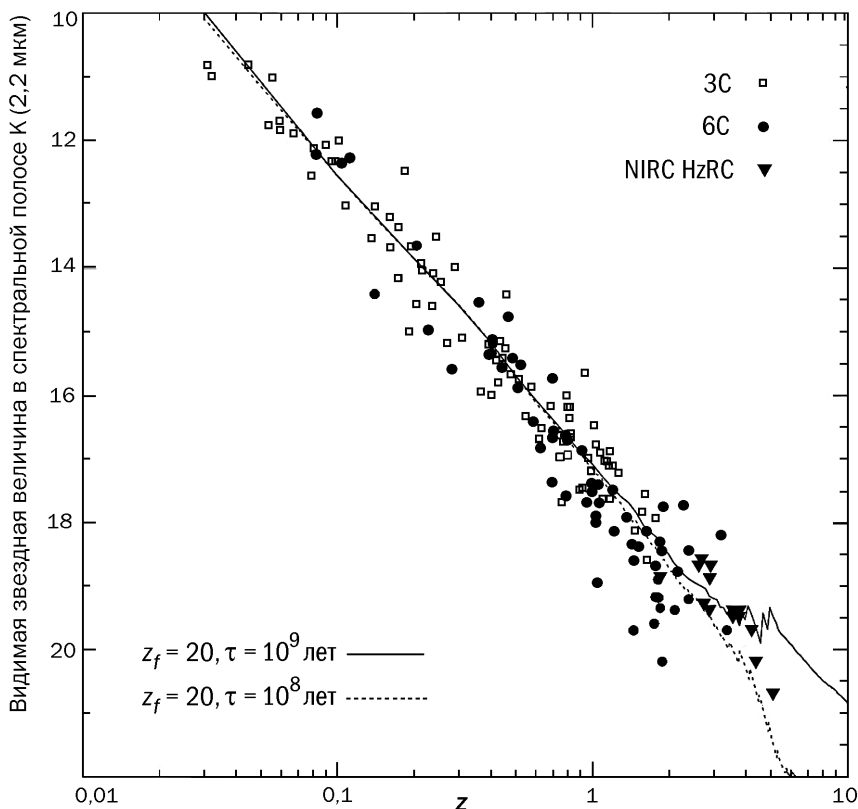


Рис. 9.23. Диаграмма Хаббла для радиогалактик из каталогов 3C, 6C и NIRC HzRG, обычно представляющих ярчайшие галактики в скоплениях. Линиями показаны две модели эволюции яркости галактики, в которой происходит единственная вспышка звездообразования при $z_f = 20$ продолжительностью 10^9 или 10^8 лет. При моделировании принято $H_0 = 65$ км/(с · Мпк), $\Omega_0 = 0,3$; $\Omega_\Lambda = 0$. По данным W. van Breugel и др., 1999.

ления яркости синего крыла линии излучения Ly и следующего за ним континуума они не обнаружили. И лишь через три десятилетия, когда были открыты квазары с $z_{\text{em}} > 5$, эффект Ганна–Петерсона в их спектрах был зафиксирован. Это говорит о том, что на ранних этапах эволюции Метагалактики была эпоха вторичной ионизации, когда после эпохи рекомбинации ($z \approx 1400$) и последовавшей за ней темной эпохи охлаждающегося газа нейтральный водород вновь оказался сильно ионизован при $z \approx 3-4$. Поэтому при $z < 3$ излучение квазаров почти не поглощается в линиях нейтрального водорода, поскольку его в межгалактическом пространстве осталось

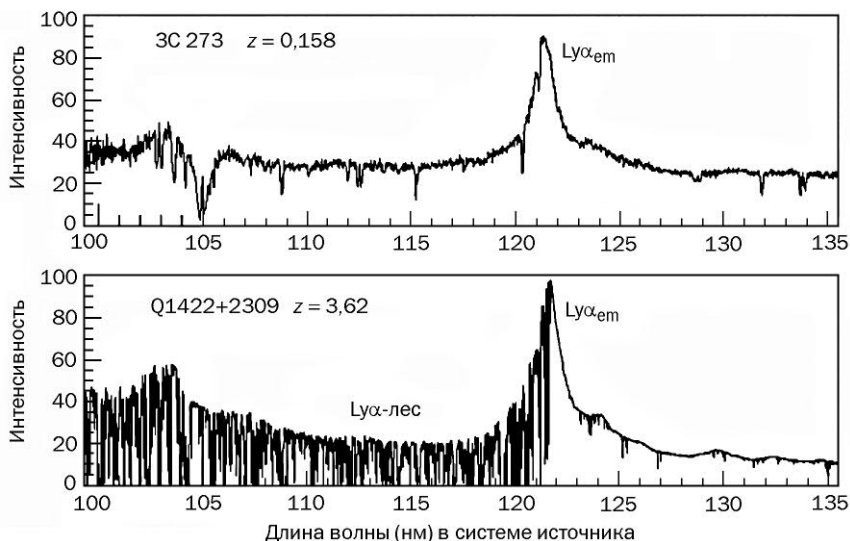


Рис. 9.24. Типичные спектры относительно близкого ($z = 0,158$) и значительно более далекого ($z = 3,62$) квазаров. Отдельные линии поглощения Ly в спектре далекого квазара превращаются в «густой лес».

мало. Только при $z > z_{\text{ион}}$ (т. е. до эпохи вторичной ионизации) оптическая толщина нейтрального водорода достаточна для поглощения квантов синего крыла линии Ly, имеющих наблюдаемую длину волны $\lambda < 121,6 \text{ нм} (1 + z)$.

Примеры спектров с «Ly-лесом» показаны на рис. 9.24 и 9.25. В спектре более близкого квазара ($z = 0,158$) еще проявляют себя отдельные облака нейтрального водорода, дающие узкие линии поглощения слева от линии излучения Ly α самого квазара. В спектрах более далеких квазаров ($z = 3,0$ и $z = 3,62$) уже наблюдается «густой лес» линий поглощения. А в спектре наиболее далекого из этих квазаров ($z = 4,55$) отдельные «провалы» линий слились в сплошную «долину» — появилась область сильного поглощения в нейтральном водороде по пути от квазара к нам; это и есть тот эффект, который искали Ганн и Петерсон. Обратите также внимание на широкие линии поглощения Ly α и Ly β в спектре квазара с $z = 3,0$ на рис. 9.25: они возникли в потоке газа, стремительно оттекающем от ядра самого квазара.

В распределении по красным смещениям линии Ly-леса не проявляют явной скученности при каких-либо значениях z , хотя небольшую неоднородность на масштабах 60 и 127 Мпк все же можно заме-

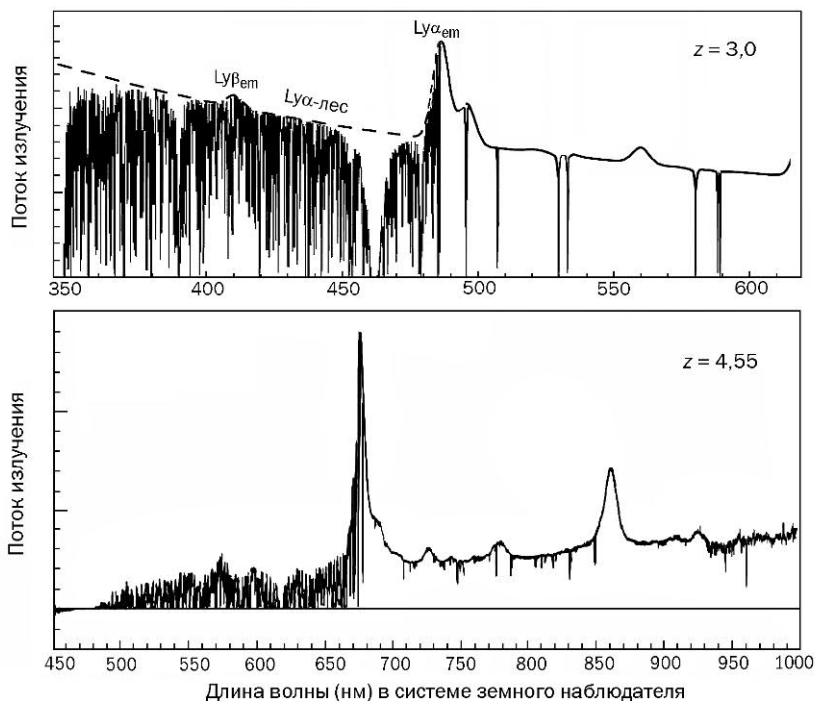


Рис. 9.25. Типичные спектры квазаров с $z = 3,0$ и $z = 4,55$, демонстрирующие Ly-лес линий поглощения. У более далекого квазара ($z = 4,55$) этот «лес» превратился в сплошной провал (эффект Ганна–Петерсона).

тить. Зато количество линий (N) на единичный интервал красного смещения явно претерпевает резкий излом при $z_{\text{abs}} \sim 1,5$:

$$\frac{dN}{dz} \sim (1+z)^{0,75} \text{ при } z < 1,5,$$

$$\frac{dN}{dz} \sim (1+z)^{2,2} \text{ при } z > 1,5.$$

Интересно, что вблизи квазаров линии поглощения Ly исчезают; по-видимому, водород там ионизуется мощным УФ-излучением самого квазара. По существующим представлениям, облака нейтрального водорода, ответственные за появления в спектрах квазаров линий Ly-леса, являются уплотненными образованиями («блинами») диаметром несколько мегапарсеков и толщиной ~ 100 кпк. Судя по глубине линий, поверхностная плотность облаков составляет от 10^{13} до 10^{21} см^{-2} . Их массы оцениваются в 10^9 – $10^{10} M_{\odot}$. По-видимому, эти облака еще не пришли в равновесие и продолжают сжиматься по малой оси и расширяться в других направлениях. Со временем они мо-

гут превратиться в галактики с гало из темного вещества, которое удерживает их от развала.

Кроме узких линий поглощения Ly α -леса, в спектрах ярких квазаров наблюдаются и особенности с большей поверхностной плотностью, вплоть до 10^{23} см $^{-2}$, при которой линии уширяются. Это либо ориентированные к нам ребром «блины» из нейтрального водорода, либо короны массивных галактик. В последних формируются и линии поглощения ионов ряда металлов: Mg II, C IV, Si IV, Ca II, Na I и др. В отличие от линий Ly α -леса, линии металлов скучены в пространстве, как скучены и сами галактики, поскольку они входят в состав групп, скоплений или сверхскоплений. Скорее всего, линии поглощения металлов возникают при прохождении света сквозь диски галактик. В спектрах почти 800 квазаров ($z < 4$) найдено в сумме около 21 000 линий поглощения ионов тяжелых металлов, которые собраны примерно в 2500 систем. Чтобы исключить линии поглощения, формирующиеся в разлетающейся оболочке самого квазара, не учитываются линии, отстоящие по z_{abs} от z_{em} на $z < 10^{-2}$, что соответствует разности скоростей 3000 км/с.

Крупномасштабную структуру в распределении далеких галактик трудно выявить путем прямых наблюдений, но, изучая распределение линий поглощения металлов в спектрах квазаров по направлению на небе и красному смещению, это удастся сделать. Таким способом была обнаружена квазипериодичность в распределении абсорбционных систем, имеющая пространственный шаг в сопутствующей системе координат около $100/h$ Мпк, где h — константа Хаббла в единицах 100 км/(с · Мпк). Масштаб в 100 Мпк как раз соответствует среднему расстоянию между сверхскоплениями и, значит, связан с крупномасштабной структурой Метагалактики. Кстати, попытки найти какую-то периодичность в распределении квазаров по красным смещениям успехом не увенчались. Квазары очень редки и поэтому не «обрисовывают» структуру сверхскоплений.

9.3.2. Гравитационное линзирование квазаров

Когда на фоне источника излучения располагается массивный объект, он оказывает гравитационное влияние на проходящие мимо него лучи, т. е. выступает в роли «гравитационной линзы», искажающей яркость и вид лежащего за ним источника. Принципиальная возможность гравитационного отклонения света была предсказана Эйнштейном и доказана наблюдениями по смещению изображений звезд вблизи диска Солнца во время полного солнечного затмения 1919 г.

Если луч проходит на минимальном расстоянии r от тела массы M , то угол его отклонения от невозмущенного направления составляет

$$\frac{4GM}{rc^2} (\text{радиан}) = 1,75 \frac{M}{M_{\odot}} \frac{R_{\odot}}{r}.$$

Первым использовал термин «линза», говоря об отклонении электромагнитного луча гравитацией, по-видимому, английский физик Оливер Лодж (1851–1940), который в 1919 г. отметил, что «гравитационное поле действует, как линза, но не имеет фокусного расстояния». Он оказался прав: поскольку действие гравитации быстро ослабевает с расстоянием от источника (обратно пропорционально квадрату расстояния), фокусирующее действие гравитационной линзы отличается от действия ее стеклянного аналога. Если обычная линза собирает весь падающий на нее свет в одной точке фокуса, то гравитационная линза только отклоняет лучи к оптической оси, но не может собрать их в едином фокусе: чем дальше проходят лучи от источника гравитации, тем на большем расстоянии от него эти лучи пересекаются. Поэтому фокусирующий эффект простейшей гравитационной линзы (в виде точечной массы) весьма слаб и не может очень сильно увеличить яркость изображения источника света. Тем не менее, убедившись, что отклонение света гравитацией действительно наблюдается, астрономы и физики стали обсуждать возможность гравитационного линзирования далеких звезд их более близкими к нам «родственниками». Ныне этот эффект называют *микрولينзированием*.

Первое описание этого эффекта дал петербургский профессор физики Орест Даниилович Хвольсон (1924 г.). Первые расчеты в 1936 г. проделали ленинградский астроном Гавриил Адрианович Тихов и сам Эйнштейн. Они пришли к выводу, что в случае, когда обе звезды и наблюдатель находятся на одной прямой, изображение далекой

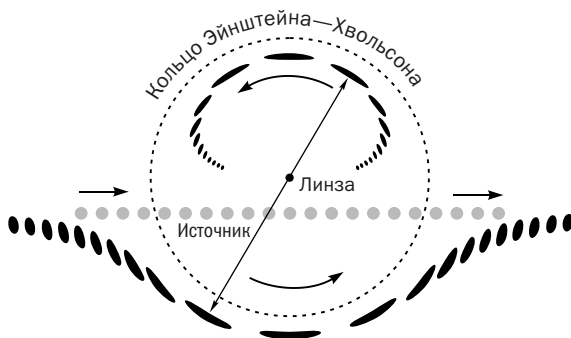


Рис. 9.26. Эффект точечной гравитационной линзы создает два изображения источника, причем сама линза, источник и оба его изображения в картинной плоскости всегда лежат на одной прямой. Если линза оказывается на одном луче зрения с источником, его изображения сливаются в сплошное кольцо.

звезды будет иметь форму кольца. В рамках геометрической оптики было показано, что в принципе возможно заметное ($>1,34$) усиление яркости линзированного объекта, но только в том случае, если луч зрения к далекой звезде проходит в пределах некоторого расстояния от звезды, служащей линзой. Это расстояние называют *радиусом Эйнштейна–Хвольсона*:

$$R_{\text{EH}} = \sqrt{\frac{4GMD_1D_{\text{ls}}}{c^2 D_s}}.$$

Здесь M — масса линзы, D_1 — расстояние от наблюдателя до линзы, D_s — расстояние от наблюдателя до источника, D_{ls} — расстояние от линзы до источника. Усиление яркости источника при этом составляет

$$A = \frac{2}{x\sqrt{4-x^2}},$$

где x — расстояние линзы от луча зрения наблюдателя к источнику в единицах R_{EH} . Формально для точечных объектов при уменьшении x усиление яркости стремится к бесконечности, но для объектов конечного размера оно всегда конечно, хотя и может быть весьма значительным. Однако простые оценки, сделанные Эйнштейном, Эддингтоном и другими астрофизиками, показали, что вероятность линзирования звезд на звездах очень мала: чтобы заметить эффект, надо длительное время отслеживать изменения яркости миллионов звезд, что до появления современных автоматизированных телескопов было невозможно. В своей статье «Линзоподобное действие звезды при отклонении света в гравитационном поле», опубликованной в журнале «Science» в 1936 г., Эйнштейн писал: «Конечно, нельзя надеяться на то, что удастся прямо наблюдать это явление». Но уже в 1937 г. Фриц Цвикки (1898–1974) теоретически пришел к выводу, что эффект гравитационной фокусировки света можно наблюдать в том случае, если линзой является галактика, поскольку ее гравитационное поле очень велико, а средняя поверхностная яркость довольно мала и поэтому не должна сильно мешать наблюдению. Цвикки обратил внимание, что вероятность линзирования галактик на галактиках может быть гораздо выше, чем звезд на звездах, и удивлялся, почему этот эффект не наблюдается.

В 1979 г. английский астроном Деннис Волш обнаружил, что изображение квазара QSO 0957+561 состоит из двух компонентов — А и В, разделенных угловым расстоянием $\theta = 6''$ (рис. 9.27) и имеющих

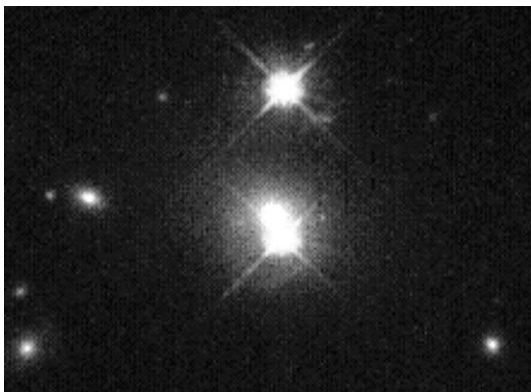


Рис. 9.27. Квазар Q0957+561 А, В, в изображении которого впервые был обнаружен эффект гравитационной линзы. Вблизи нижнего изображения квазара видна галактика-линза.

схожие свойства: одинаковые красные смещения ($z_{\text{em}} = 1,41$), почти одинаковые яркости и похожие спектры. Сразу было предложено два возможных объяснения этого феномена: либо это гравлинзовые изображения одного квазара, либо истинная пара квазаров, т. е. активные ядра двух соседних галактик. Если это эффект гравлинзы, то надо искать галактику-линзу, а если это истинная пара, то между нами должны наблюдаться следы взаимодействия. Кроме того, в гравлинзовых изображениях, свет которых приходит к нам разными путями, должен наблюдаться сдвиг по времени в колебаниях блеска разных изображений, если, конечно, сам линзируемый квазар переменен.

Вскоре галактика-линза была обнаружена. Она находится вблизи изображения В и имеет $z = 0,355$. При таком асимметричном расположении линзы относительно изображений А и В было странно, что видимый блеск изображений почти одинаков. Для устранения этого противоречия пришлось предположить, что гравлинзовое воздействие оказывает не только галактика, попавшая на луч зрения к далекому квазару, но и массивное скопление галактик, в состав которого эта галактика входит. Действительно, выяснилось, что эта гигантская эллиптическая галактика типа cD располагается в скоплении. Позже нашли и задержку в переменности изображений А и В, которая оказалась равной $T = 423$ суток. Кстати, по длительности этой задержки можно независимо от других методов определять значение константы Хаббла: $H_0 \sim \frac{2}{\text{rad}} / T$. В среднем для 10 гравлинзированных квазаров этот метод дает $H_0 = (72 \pm 10)$ км/(с · Мпк), что соответствует возрасту Метагалактики $(13,5 \pm 2)$ млрд лет.

Гравлинзовые изображения бывают сложной структуры: состоят из нескольких изображений разной яркости и протяженных дуг, близ-

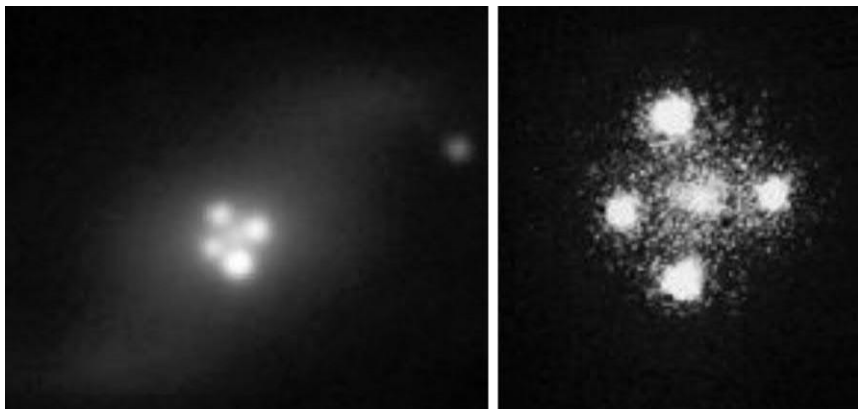


Рис. 9.28. Крест Эйнштейна — эффект гравитационной линзы, где в качестве фонового источника света выступает далекий квазар QSO 2237+0305 ($z_{\text{em}} = 1,695$), а линзой служит более близкая, но почти не заметная на снимке галактика типа Sab ($z = 0,039$). Ее центральную часть можно различить на левом снимке. Видимый размер галактики $52''$, тогда как размер Креста в ее центре $1,6''$. Фото справа: «Хаббл» (NASA). Фото слева: J. Rhoads, S. Malhotra, I. Dell'Antonio WIYN/NOAO/NSF.

ких по конфигурации к отрезкам кольца Эйнштейна—Хвольсона, которое наблюдается в случае идеальной линзы при попадании источника точно на луч зрения «наблюдатель—гравлинза». Интересным примером сложного гравлинзового изображения служит Крест Эйнштейна, состоящий из четырех разноярких изображений квазара, наблюдаемого всего в $3''$ от ядра спиральной галактики (рис. 9.28). Яркости изображений со временем изменяются (как в елочной гирлянде), по-видимому, из-за попадания на луч зрения отдельных звезд галактики-линзы, которая быстро движется в картинной плоскости. Этот эффект мерцания, вызванный гравитационными полями отдельных звезд, как мы уже знаем, называют микролинзированием. Он накладывается на сильное линзирование, которое приводит к расщеплению изображений и добавляет в него изменение яркости отдельных компонентов.

Эффект гравитационного линзирования широко используется при поисках далеких слабых объектов: их ищут в полях близких богатых скоплений галактик, которые служат мощными гравитационными линзами. Можно сказать, что каждое скопление галактик — это природный телескоп с «объективом» диаметром в 1 Мпк; нужно только суметь им воспользоваться. Именно благодаря эффекту гравлинзы были обнаружены многие из наиболее далеких среди известных сей-

час квазаров и галактики, самые удаленные из которых имеют $z \approx 8-9$. К настоящему времени открыто уже несколько сотен таких квазаров, большинство из которых найдены как тесная пара радиоисточников с похожими радиоспектрами.

Следует заметить, что изредка встречаются истинные тесные пары квазаров, выделяющиеся по следам взаимодействия между их хозяйскими галактиками. Пример — КЗО PHL 1222 A, B с $z \approx 1,9$ с разном в 3,3. Вообще хозяйские галактики даже одиночных квазаров часто имеют следы интенсивного взаимодействия или произошедшего в прошлом слияния. По-видимому, дело в том, что гравитационные возмущения способствуют попаданию газа в центральные области галактик с последующей его аккрецией на сверхмассивную черную дыру, что является одним из необходимых условий активности ядра.

9.4. Оценка масс компактных объектов в ядрах галактик

Итак, активность ядер галактик связывают с различными проявлениями замагниченного аккреционного диска вокруг массивного центрального образования, в роли которого обычно видят сверхмассивную черную дыру. Но пока это лишь гипотеза. Для ее убедительного доказательства необходимо знать размер излучающей области, так как из теории гравитации известно, что радиус последней устойчивой орбиты вблизи черной дыры равен $3r_g$. Напомним, что гравитационный радиус $r_g = 2GM/c^2 \approx 2 \text{ а. е. } (M/10^8 M_\odot)$. Если же дыра вращается, то этот радиус еще меньше. Сведения о размерах области излучения получают либо по характерному времени переменности в рентгеновском и гамма-диапазонах, которое составляет часы, либо по рентгеновской линии излучения водородоподобных ионов железа ($E = 6,4 \text{ кэВ}$), которая формируется на внутреннем краю аккреционного диска. Асимметрия ее красного крыла свидетельствует о гравитационном красном смещении, обусловленном близостью к массивной черной дыре, $\sim (100-1000) r_g$. Этими методами размеры излучающей области оцениваются в $10^{14}-10^{15} \text{ см}$, что недоступно для разрешения с помощью наземных телескопов даже в ближайших галактиках.

Ядро нашей Галактики невозможно наблюдать в оптическом диапазоне из-за очень сильного (25^m) поглощения света межзвездной пылью. Однако центральный радиоисточник в ядре (Sagittarius A, Sgr A) исследован довольно подробно. Он состоит из трех компонентов: остатка сверхновой Sgr A East размером около 8 пк, проецирующейся на него (в стороне от центра) трехрукавной «мини-спирали» Sgr A

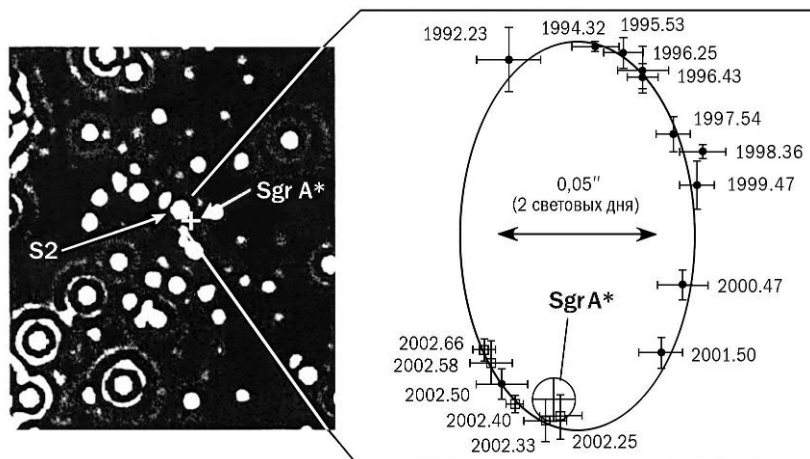


Рис. 9.29. Центр Галактики. Слева: ближайшие окрестности радиоисточника Sgr A* в созвездии Стрелец. Считается, что Sgr A* связан с черной дырой массой $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Вокруг него обращается несколько ярких звезд. Ближайшая из них, орбиту которой удалось проследить (S2), движется с периодом 15,2 года. Справа: эллиптическая орбита звезды S2 по наблюдениям 1992–2002 гг.

West размером около 1 пк и очень яркого точечного радиоисточника в ее центре Sgr A*.

Остаток сверхновой Sgr A East имеет возраст около 50 тыс. лет и по энергии взрыва раз в 100 превосходит стандартную сверхновую. Есть предположение, что это остаток взрыва массивной звезды, сжатой приливной силой в момент пролета близ центральной сверхмассивной черной дыры. «Мини-спираль» Sgr A West на самом деле не является плоской спиралью, а представляет собой комплекс облаков, поверхности которых ионизованы мощным УФ-излучением массивных OB-звезд, которых более сотни в пределах центрального парсека. Отдельные облака этой «спирали» со скоростью около 1000 км/с обращаются вокруг источника Sgr A* и, возможно, падают на него. Вся область Sgr A West окружена массивным тором из облаков молекулярного газа. Некоторые детали «спирали» лежат на внутреннем крае этого окооядерного диска.

Открытый в 1974 г. радиоисточник Sgr A* до сих пор не удается разрешить на более мелкие детали, хотя верхний предел его размера год от года удается понизить. Сейчас с помощью радиоинтерферометра VLBI на волне 1,3 мм он оценивается в 0,04 mas, что на расстоянии до центра Галактики (8 кпк) соответствует линейному размеру всего 0,3 а. е. Интересно сопоставить это с наблюдаемым размером черной

дыры, наличие которой весьма уверенно сейчас предполагается в центре Галактики (см. ниже). При массе $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ ее шварцшильдовский радиус горизонта событий должен составлять 0,08 а. е. Эффект гравитационной линзы увеличивает его минимум в 5 раз и делает видимый размер около 0,4 а. е. Так что, если бы источник Sgr A* совпал с черной дырой, его видимый размер был бы больше наблюдаемого. Скорее всего, это горячее пятно в окружающем дыру аккреционном диске или в выброшенном из него джете.

Для определения массы центрального компактного объекта в ядрах галактик в основном применяют следующие методы: динамический, спектральный, метод шкалирования (эхокартирования).

Динамический метод основан на допущении, что излучающая область вращается вокруг центрального объекта на расстоянии R с круговой (первой космической) скоростью $V = (GM/R)^{1/2}$ или отдельные ее части хаотически движутся с такими же вириальными скоростями. Если из наблюдений удастся определить значение R , а по спектру найти V , то легко оценить массу внутри радиуса R .

С появлением приемников излучения, чувствительных в ближнем ИК-диапазоне, и больших телескопов с адаптивной оптикой, дающих изображения с угловым разрешением менее 0,1", появилась возможность отслеживать движение отдельных звезд в центре нашей Галактики. Начиная с 1992 г. такие наблюдения в диапазоне 2 мкм проводились на 3,5-метровом телескопе обсерватории Паранал (ESO, Чили). К 2008 г. были определены орбиты 28 звезд с позиционной точностью 0,3 mas (см. рис. 7.31). Выяснилось, что орбита одной из звезд (S2) подходит к динамическому центру Галактики на 120 а. е., а ее скорость там достигает 5000 км/с (рис. 9.29). Отсюда сразу получается, что масса в пределах перицентра орбиты равна $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Наличие там плотного скопления обычных звезд полностью исключено хотя бы по причине низкой светимости этой области, не говоря уже о том, что звезды мгновенно начали бы сталкиваться друг с другом (представьте себе миллионы звезд, заполнившие Солнечную систему в пределах пояса Койпера). Наблюдения показали, что полная масса обычных звезд даже в пределах 1 пк вокруг центра Галактики составляет «всего» около $(1 \pm 0,5) \cdot 10^6 M_{\odot}$. Можно было бы думать, что в самом центре находится темное скопление из миллионов нейтронных звезд, но расчеты показывают, что такое компактное скопление неминуемо сколлапсирует и станет черной дырой. Поэтому сейчас практически никто не сомневается, что там действительно находится гигантская черная дыра.

Динамический метод можно использовать и для других не слишком далеких галактик. Уже получены интересные результаты при наблюдениях в очень тонких и мощных (мазерных) линиях излучения молекулы воды ($\lambda_0 = 1,35$ см) центральных областей близких спиральных галактик. Например, в ядре ($R \approx 1$ пк) галактики NGC 4258, удаленной от нас на 6,4 Мпк, находится несколько газовых комплексов, вращающихся в кеплеровском диске со скоростями от 500 до 1500 км/с в зависимости от расстояния до центра. Легко оценить, что масса внутри их орбит составляет $3,6 \cdot 10^7 M_\odot$. Частично это могут быть звезды, но большая часть массы принадлежит явно не им, а компактному темному объекту. В ближайшей к нам крупной спиральной галактике M31 (Туманность Андромеды) масса центральной черной дыры оценивается в $(1,1 - 2,3) \cdot 10^8 M_\odot$; у ее эллиптического спутника тоже есть черная дыра массой около $3 \cdot 10^6 M_\odot$, а в центре радиогалактики Дева А (Vir A, M87) находится настоящий монстр массой $(6,4 \pm 0,5) \cdot 10^9 M_\odot$. Любопытно, что в ядрах некоторых галактик, например 0402+379, двойные черные дыры. В состав одной из таких пар, в галактике OJ 287 (объект типа BL Lac), входит самая массивная из обнаруженных пока черных дыр: ее масса оценивается в $2 \cdot 10^{10} M_\odot$. Вокруг нее с периодом около 12 лет обращается меньшая черная дыра с массой порядка $10^8 M_\odot$. Вероятно, двойные сверхмассивные черные дыры образуются при слиянии крупных галактик, уже имеющих по одной в своем ядре.

Спектральный метод основан на исследованиях спектров центральных областей (балджей) относительно близких галактик, что позволяет получить данные о дисперсии скоростей звезд (по суммарной ширине линий поглощения в их оболочках) или о скоростях газа (по ширинам линий излучения) и также о потоке в ионизирующем континууме. По этим результатам были получены приблизительные соотношения:

$$M_{\text{BH}} \approx 10^8 M_\odot \left(\frac{\sigma}{200 \text{ км/с}} \right)^4,$$

где σ — одномерная дисперсия скоростей звезд в балдже галактики, а также

$$M_{\text{BH}} \approx 10^8 M_\odot \left(\frac{V_{1/2}(\text{H}\beta)}{3000 \text{ км/с}} \right)^{0,6} \left(\frac{L_{510}}{10^{44} \text{ эрг/с}} \right),$$

где $\Delta V_{1/2}(\text{H}\beta)$ — полуширина линии $\text{H}\beta$, L_{510} — светимость в континууме на $\lambda_0 = 510$ нм.

Из этих соотношений следует, что у всех крупных галактик в центре находятся массивные объекты массами от 10^6 до $10^{10} M_{\odot}$, которые, почти без сомнения, являются черными дырами. При этом их массы составляют около 0,1% от массы галактического балджа. Есть некоторые указания на то, что эта доля возрастает на больших z .

Метод шкалирования (эхокартирования) – наиболее точный среди упомянутых. Его идея состоит в том, что широкие эмиссионные линии в спектре активного ядра образуются в комплексе облаков, а источник ионизирующего их жесткого излучения находится в центре этого комплекса. Расстояние от источника ионизации до области формирования широких линий (R_{BL}) можно оценить по задержке во времени между изменением жесткого континуума и и откликом в интенсивности широких линий излучения в спектрах активного ядра. Обычно эта задержка составляет десятки дней. Зная это расстояние и доплеровскую ширину линии, связанную с движением облаков, можно оценить массу центрального объекта:

$$M_{BH} \approx 10^5 M_{\odot} R_{BL} \frac{V_{1/2}^2 (H)}{10^3 \text{ км/с}},$$

где R_{BL} измеряется в световых днях. Впервые этот метод был использован В. М. Лютым (1941–2009) и А. М. Черепашуком в 1973 г. для изучения ядра сейфертовской галактики NGC 4151 на Крымской обсерватории ГАИШ МГУ.

Следует заметить, что оценки M_{BH} дают точность не лучше 30%, а то и 50%. Это связано с тем, что ширины линий излучения изменяются со временем, подчиняясь изменению ионизирующего потока. Кроме того, в них может вносить вклад излучение от быстрых газовых потоков, которые сопутствуют радиовыбросам из ядер радиогромких галактик.

Интересно, как эволюционируют массы черных дыр со временем, то есть с красным смещением. Казалось бы, их массы должны со временем возрастать за счет аккреции вещества, которая особенно интенсивно происходит в ранние эпохи, когда часты взаимодействия и слияния галактик. Однако оценки их масс в ядрах далеких галактик и квазаров показывают обратное: массы черных дыр возрастают в прошлое, с увеличением красного смещения: $M_{BH}^{max} (1+z)^{1,6}$, достигая потолка $\sim 10^{10} M_{\odot}$ при $z \approx 2-3$, в те эпохи, когда достигался максимум и темпа звездообразования (рис. 9.30). А вот при меньших красных смещениях массы черных дыр, прояв-

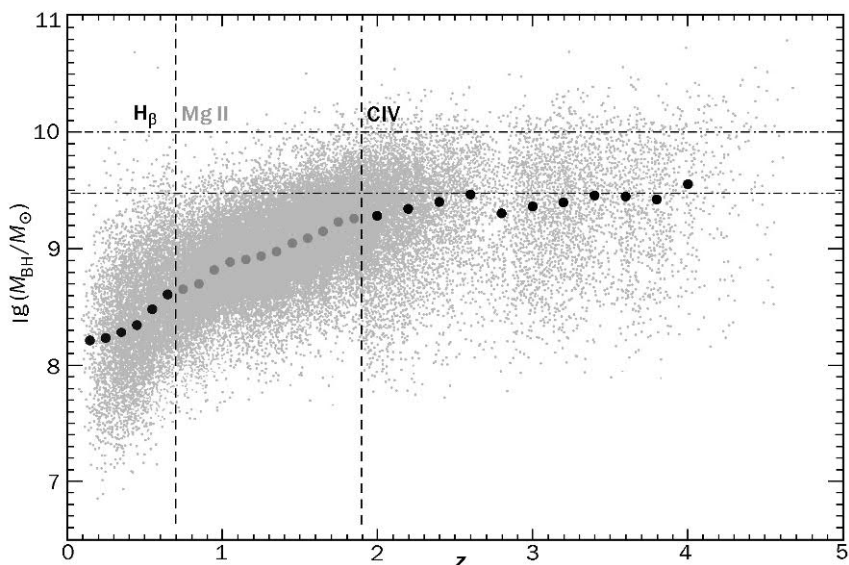
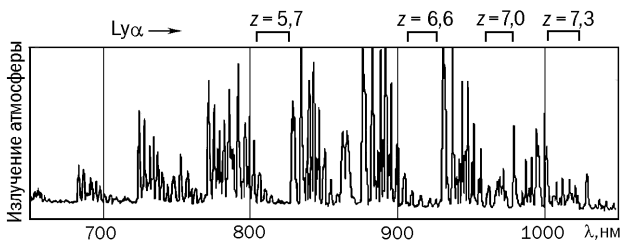


Рис. 9.30. Массы центральных черных дыр в зависимости от красного смещения хозяйской галактики по данным обзора SDSS (Y. Shen и др., 2007). В отмеченных трех диапазонах z для измерения дисперсии скоростей использовались разные эмиссионные линии ($H\beta$, $Mg\ II$ и $C\ IV$). Кружками показаны средние значения масс черных дыр (M_{BH}) в интервалах $z = 0,1$ для $z < 1,9$ и $z = 0,2$ для $z > 1,9$. Видно, что при $z > 2$ их максимальная масса составляет от $3 \cdot 10^9$ до $10^{10} M_\odot$ и не меняется (горизонтальные штрих-пунктирные линии). А при $z < 2$ и вплоть до нынешней эпохи наиболее массивные черные дыры уже перестают проявлять себя как оптические квазары.

ляющих себя в оптических квазарах, в среднем становятся меньше. Возможно, это связано с тем, что загоревшиеся при $z \approx 2-3$ в ядрах галактик квазары своим мощным излучением и ветром препятствуют поставке новых порций газа в центральную область галактики. Активность ядер затухает, и в наблюдениях начинают доминировать объекты, которые сформировались позже, в областях с меньшей средней плотностью. Именно по этой причине в близких скоплениях галактик наблюдаются не квазары (которые давно «прогорели»), а менее мощные активные объекты — радиогалактики, возможные потомки квазаров.

В заключение обсудим вопрос о поиске далеких галактик и квазаров. Наблюдатели занимаются этим не только из «спортивного интереса», но и для решения важной проблемы современной астрофизики — как формировались первые объекты в Метагалактике? При работе с

Рис. 9.31. Окна прозрачности, обусловленные излучением ночного неба в линиях молекулы OH, облегчают поиск объектов, излучающих в линии Ly на указанных красных смещениях.



наземными инструментами наблюдатели вынуждены вести поиск в «окнах прозрачности» атмосферы, т. е. в тех диапазонах спектра, где отсутствуют сильные полосы излучения молекулы гидроксила, в основном создающие светлый фон ночного неба (рис. 9.31). Наблюдения проводятся в узких фильтрах в диапазоне $\lambda > 800$ нм, куда смещается сильная линия излучения водорода Ly (121,6 нм) при $z > 5,6$, по которой, как правило, и проводится отождествление молодых галактик с высоким темпом звездообразования. В них горячие массивные звезды ионизуют межзвездный газ, который, рекомбинируя, и дает сильную линию излучения в «лайман-альфа эмиттерах».

Далекie галактики с высоким темпом звездообразования можно искать и по характерным «скачкам» в непрерывном спектре: это лаймановский скачок ($\lambda_0 = 91,2$ нм) и бальмеровский скачок ($\lambda_0 = 400$ нм). Наборы узких спектральных фильтров, которые есть у космических телескопов «Хаббл» и «Спитцер», позволяют находить по этим особенностям галактики с $z \sim 6\text{--}10$.

Для увеличения проникающей способности телескопов астрономы при отождествлении очень далеких объектов ведут их поиск на фоне богатых скоплений галактик, которые служат при этом гравитационными линзами. Такой прием позволяет наблюдать более слабые источники вплоть до звездных величин $28^m\text{--}29^m$, что на 1,5–2 звездные величины больше, чем без использования «бесплатного космического телескопа». К примеру, за скоплением галактик A1689 была обнаружена по лаймановскому скачку в фильтре «z» галактика с красным смещением 7,6. А космический телескоп «Спитцер» обнаружил в спектре источника HCM6A, расположенного за скоплением галактик A370, линии излучения Ly α и H α , смещенные в микронную область, что указало на $z_{\text{em}} = 6,56$. При этом неожиданным оказался тот факт, что темп звездообразования в этой галактике, вычисленный по излучению в H α , оказался выше, чем по излучению в линии Ly α . Это может означать сильное поглощение пылью, существование которой в

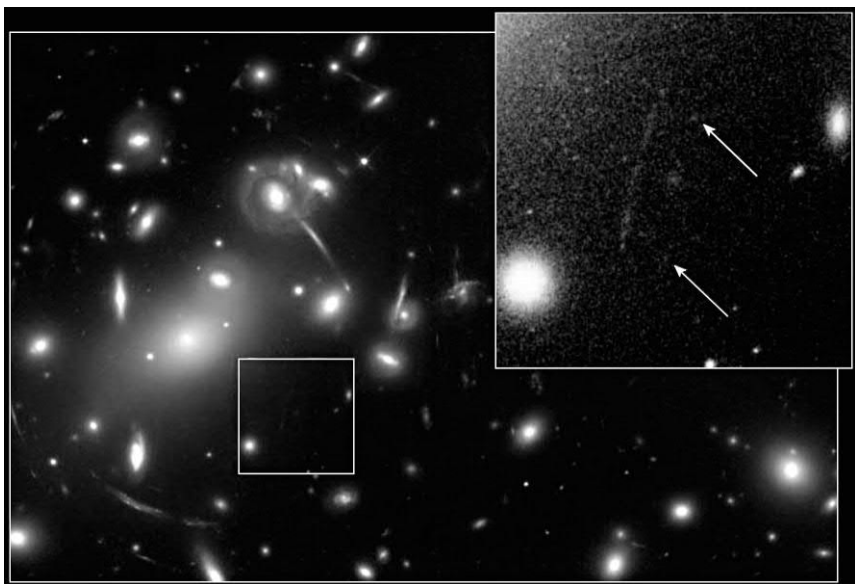


Рис. 9.32. Самые далекие галактики ($z > 5$) обнаруживаются в поле массивных гравитационных линз. Скопление галактик Abell 2218 сыграло роль гравитационной линзы для нескольких лежащих за ним галактик, в том числе галактики, имеющей красное смещение 5,58. Ее расщепленное надвое изображение показано стрелками на врезке. Заметить такие далекие объекты без помощи гравитационной линзы было бы невозможно. Фото: «Хаббл», NASA, 2001 г.

столь ранние эпохи маловероятно, если не предполагать, что звездообразование началось при очень больших $z \approx 20$.

С развитием техники и созданием чувствительных приемников субмиллиметрового диапазона появляется все больше данных о далеких галактиках и квазарах ($z > 6$). Причем далеких галактик сейчас обнаружено больше, чем далеких квазаров (рис. 9.32). Это связано с тем, что поверхностная плотность числа квазаров при $m(0,9-1,1 \text{ мкм}) > 24^m$ становится меньше, чем плотность числа галактик (при $m = 24$ их плотности примерно равны и соответствуют пространственной плотности порядка $10^{-7}/\text{Мпк}^3$ при $z \approx 6$). Появляются первые данные о свойствах «хозяйских» галактик, с которыми связаны далекие квазары. Наблюдения на телескопе Subaru ($D = 8,2 \text{ м}$), способном видеть в диапазоне ($\lambda = 700-1000 \text{ нм}$), показали, что с одним из самых на сегодня далеких квазаров CFHQSJ 2329-0301 ($M_{1450} = -26,4^m$, $z = 6,43$) связана яркая галактика с абсолютной звезд-

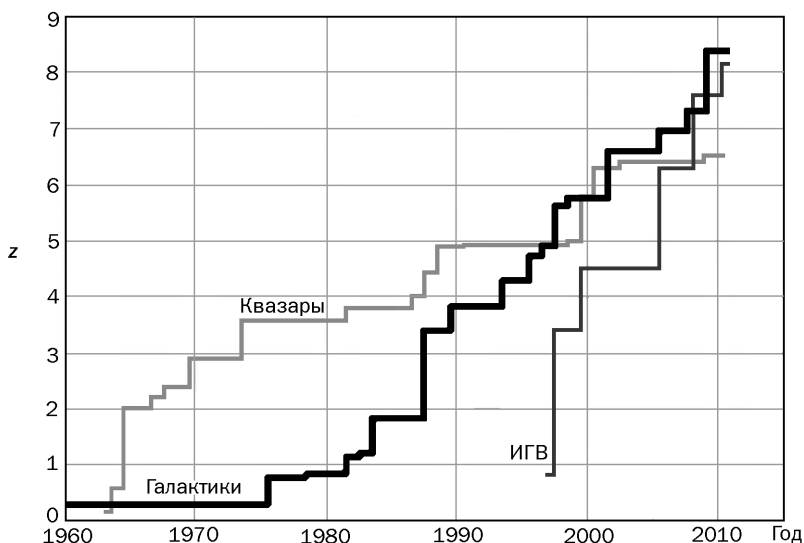


Рис. 9.33. Максимальное красное смещение (z) галактик, квазаров и источников гамма-всплесков (ИГВ), открытых к указанному году.

ной величиной $M_{1450} = -24^m$, с суммарной массой звезд около $10^9 M_{\odot}$ и эффективным радиусом около 11 кпк, в которой происходит звездообразование с темпом более $2 M_{\odot}/\text{год}$.

Все вышеперечисленные факты свидетельствуют о том, что уже через $t < 10^9$ лет после Большого взрыва в Метагалактике успели сформироваться гигантские галактики с массивными ядрами, 20% которых проявляют активность типа квазаров. В этих галактиках уже есть звезды, а значит, есть и тяжелые элементы. Следовательно, эпоха зарождения первых звезд началась еще раньше, при $z > 10$. Как галактики и их ядра успевают сформироваться в такое короткое по космологическим меркам время — совершенно неясно. Трудно представить, что за столь короткое время крупные галактики образовались путем сгущивания из более мелких первичных блоков типа карликовых галактик ($10^8 M_{\odot}$) или даже шаровых скоплений ($10^6 M_{\odot}$) с маломассивными черными дырами в их центрах (существование черных дыр массой 10^3 – $10^4 M_{\odot}$ в некоторых шаровых скоплениях косвенно подтверждается тем, что они хорошо ложатся на единую зависимость $M_{\text{ВН}}^4$ с массивными галактиками). Именно по этой причине некоторые теоретики стали допускать, что формирование крупных галактик происходит не в процессе иерархического сгущивания, а иным путем. Они считают, что существовали первичные массивные

черные дыры, послужившие центрами конденсации для будущих галактик. В таком сценарии и галактики, и их массивные ядра успевают сформироваться уже на ранних этапах эволюции Вселенной. На вопрос, как могли появиться сами первичные черные дыры, ответа пока нет. Его надо искать на стадии «инфляционного» рождения Вселенной, в которой были необычные начальные условия и субстанция с необычным уравнением состояния («ложный вакуум»), которые привели к ее расширению и к существованию как темной материи, так и темной энергии.

9.5. Загадка квазаров еще не решена

Прошло уже без малого столетия после открытия квазаров — самых далеких, самых мощных, самых компактных и самых «непостоянных» объектов Метагалактики. За это время слово «квазар» стремительно, как ни один другой астрономический термин, вошло в наш быт: этим именем называют марки автомобилей и бытовых приборов, издательства и кафе... Но в природе самих квазаров остается еще много загадочного.

Выяснилось, что квазары — это активные ядра массивных галактик. Большинство исследователей считает, что от других представителей этой популяции (радиогалактик, сейфертовских галактик, а также галактик со вспышками звездообразования в ядрах) они отличаются высокой интенсивностью нетеплового излучения и эволюционной молодостью. Со временем ($\tau > 10^7$ лет) активность квазара ослабевает, мощность излучения снижается, и когда светимость падает до абсолютной звездной величины -23^m , он уже воспринимается как активное ядро иного типа, не способное своим блеском «затмить» хозяйскую галактику. Не исключено, правда, что активность квазаров может носить рекуррентный характер, когда на фоне глобального спада светимости происходят повторные вспышки, обусловленные, например, взаимодействием или даже слиянием с соседними галактиками.

Наблюдения показали, что первые квазары начинают проявлять себя в эпоху рождения первых галактик, при $z = 7-10$, что соответствует космологическому времени всего 500 млн лет от Большого взрыва. Максимальная частота их рождения достигается при $z = 2-3$ и быстро убывает по мере приближения к нашей эпохе: их сопутствующая пространственная плотность составляет примерно 1 квазар на 10^9 Мпк³ при $z < 0,5$, а при $z > 2$ она в 1000 раз выше.

Далекие квазары связаны с массивными галактиками в богатых скоплениях, а близкие — с ярчайшими галактиками в бедных скопле-



Рис. 9.34. Так в воображении художника (Wolfram Freudling, NASA) выглядит один из первых квазаров, окруженный газом, пылью, молодыми звездами и звездными скоплениями.

ниях или даже группах, которые формируются в более поздние эпохи в областях с меньшей средней плотностью вещества. Несмотря на такое различие в окружении, далекие и близкие квазары почти не различаются по основным свойствам, даже по химическому составу: в спектрах далеких квазаров наблюдаются линии металлов, что свидетельствует об уже прошедшем звездообразовании в их хозяйских галактиках. Факт обнаружения квазаров, богатых металлами, на очень больших z может свидетельствовать о существовании первичных черных дыр, которые могут служить центрами конденсации галактик. Отметим, что это предположение не согласуется с популярным ныне представлением о формировании галактик путем иерархического сгущивания более мелких «строительных блоков», согласно которому формирование крупных галактик и их ядер шло одновременно.

Несмотря на незавершенность моделей энерговыделения в активных ядрах галактик и квазарах, само их обнаружение позволило ас-

трономам расширить горизонты наблюдаемой Метагалактики, что вместе с изучением флуктуаций температуры реликтового излучения превратило космологию из чисто теоретической науки в наблюдательную. А это, в свою очередь, привело к созданию Стандартной космологической модели, в которой наряду с обычным барионным веществом, дающим вклад всего около 4% в среднюю плотность мира, предсказывается существование темной материи (около 26%) и темной энергии (около 70%) — субстанций, выходящих за рамки стандартной физики. Таким образом, в наши дни усилиями астрономов и физиков наводятся мосты между законами макро- и микромира, которые, возможно, приведут нас к новому представлению о Вселенной. В построении этой потрясающей, богатой новыми элементами картины мира заметную роль сыграло открытие квазаров и изучение физических процессов в них, протекающих на мощной ранней фазе активности ядер крупных галактик, в которых уже успели сформироваться сверхмассивные черные дыры с аккреционными дисками.

Литература

- Бербидж Дж., Бербидж М. Квазары. М.: Мир, 1969.
- Верходанов О. В., Парийский Ю. Н. Радиогалактики и космология. М.: Физматлит, 2009.
- Вильковиский Э. Я. Загадки квазаров. Алма-Ата: Наука, 1980.
- Вильковиский Э. Я. Квазары. М.: Наука, 1985.
- Происхождение и эволюция звезд и галактик / под ред. С. Б. Пикельнера. М.: Наука, 1976.
- Новиков И. Д. Черные дыры и Вселенная. М.: Наука, 1985.
- Шаров А. С., Новиков И. Д. Человек, открывший взрыв Вселенной (Эдвин Хаббл). М.: Наука, 1989.
- Комберг Б. В. Квазары — 30 лет спустя // Земля и Вселенная. 1994. № 4–5.
- Черепашук А. М., Чернин А. Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век 2, 2003.
- Alfvén H.; Herlofson N. Cosmic Radiation and Radio Stars // Physical Review. 1950. Vol. 78. P. 616.
- Di Matteo T., Croft R. A. C., Springel V., Hernquist L. Black Hole Growth and Activity in a Cold Dark Matter Universe // Astrophys. Journ. 2003. Vol. 593. P. 56–68.
- Mainieri V., Rigopoulou D., Lehmann I., Scott S., Matute I., Almaini O., Tozzi P., Hasinger G., Dunlop J. S. Sub-mm detection of a high redshift Type 2 QSO // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005. Vol. 356. P. 1571–1575 (astro-ph/0410.632).

- Schaerer D., Pello R., Egami E., Hempel A., Richard J., LeBorgne J.-F., Kneib J.-P., Wise M., Boone F., Combes F. News from $z \sim 6-10$ galaxy candidates found behind gravitational lensing clusters // At the Edge of the Universe: latest results from the deepest astronomical surveys // ASP Conference Series. 2007. Vol. 380. P. 67. Eds. J. Afonso, H. Ferguson and R. Norris.
- Van Breugel W., De Breuck C., Stanford S. A., Stern D., Röttgering H., Miley G. A Radio Galaxy at $Z = 5.19$ // Astrophys. J. 1999. Vol. 518. P. L61–L64.
- Windhorst R. A., Hathi N. P., Cohen S. H., Jansen R. A., Kawata D., Driver S. P., Gibson B. High resolution science with high redshift galaxies // Advances in Space Research. 2008. Vol. 41. P. 1965–1971 (astro-ph/0703171).



1. Каталог Мессье

Шарль Мессье (Charles Messier, 1730–1817) — французский астроном. Получил начальное образование. С 1751 г. работал чертежником и переписчиком у известного астронома и картографа Ж. Н. Делиля. Путем самообразования приобрел математические и астрономические знания, изучил астрономические инструменты, стал опытным наблюдателем. С 1755 г. он работал в Парижской обсерватории. С 1764 г. — член Лондонского королевского общества (1764), Парижской академии наук (1770), иностранный почетный член Санкт-Петербургской академии наук (1776) и Берлинской академии наук.

Мессье систематически вел поиски новых комет. В 1763–1802 гг. открыл 14 комет, а всего наблюдал 41 комету. Чтобы не путать кометы с далекими туманными объектами неба, Мессье составил один из первых в истории астрономии каталог туманностей и звездных скоплений, до сих пор чрезвычайно популярный среди любителей астрономии. Первое издание каталога вышло в свет в 1774 г. и содержало 45 объектов. Среди них под первым номером (M1) указана Крабовидная туманность, обнаруженная Мессье 12 сентября 1758 г. В астрономию прочно вошли обозначения многих туманностей, скоплений и галактик по каталогу Мессье, например, M31 — туманность Андромеды, M42 — туманность Ориона. Второе издание каталога (1781 г.) содержало 103 объекта. Современная версия этого каталога содержит около 110 объектов, из которых более 60 открыто самим Мессье и около 30 — французским астрономом Пьером Мешеном (1744–1804).

— прямое восхождение в часах и минутах; эпоха J2000.0

— склонение в градусах и минутах дуги; эпоха J2000.0

m_v — видимая визуальная звездная величина

D — видимый (угловой) диаметр или размер в минутах дуги

Тип объекта

Рас. ск.	рассеянное скопление	Гал. Irr	неправильная галактика
Шар. ск.	шаровое скопление	Гал. S0	линзовидная галактика (тип S0)
План. тум.	планетарная туманность	Ост. SN	остаток сверхновой
Диф. тум.	диффузная туманность	Астер.	астеризм (4 звезды)
Гал. S	спиральная галактика	Обл. МП	«облачко» Млечного Пути
Гал. E	эллиптическая галактика	Дв. зв.	двойная звезда

Объект	NGC	Созв.	Тип			m_V	D	Расст., тыс. свет. лет	Примечание	
				h	m					°
М 1	1952	Tau	Ост. SN	05	34,5	+22 01	8,4	6 4	6,3	Крабовидная туманность
М 2	7089	Aqr	Шар. ск.	21	33,5	−00 49	6,5	12,9	36,2	
М 3	5272	CVn	Шар. ск.	13	42,2	+28 23	6,2	16,2	30,6	
М 4	6121	Sco	Шар. ск.	16	23,6	−26 32	5,6	26,3	6,8	

Каталог Мессье (продолжение)

Объект	NGC	Созв.	Тип			m_V	D	Расст., тыс. свет. лет	Примечание	
				h	m					°
М 5	5904	Ser	Шар. ск.	15	18,6	+02 05	5,6	17,4	22,8	«Бабочка»
М 6	6405	Sco	Рас. ск.	17	40,1	−32 13	5,3	25,0	2	
М 7	6475	Sco	Рас. ск.	17	53,9	−34 49	4,1	80,0	0,8	
М 8	6523	Sgr	Диф. тум.	18	03,8	−24 23	6,0	90 40	5,2	«Лагуна»
М 9	6333	Oph	Шар. ск.	17	19,2	−18 31	7,7	9,3	26,4	«Дикие утки»
М 10	6254	Oph	Шар. ск.	16	57,1	−04 06	6,6	15,1	13,4	
М 11	6705	Sct	Рас. ск.	18	51,1	−06 16	6,3	14,0	6	
М12	6218	Oph	Шар. ск.	16	47,2	−01 57	6,7	14,5	17,6	
М13	6205	Her	Шар. ск.	16	41,7	+36 28	5,8	16,6	22,8	
М14	6402	Oph	Шар. ск.	17	37,6	−03 15	7,6	11,7	27,4	«Орел» «Омега»
М15	7078	Peg	Шар. ск.	21	30,0	+12 10	6,2	12,3	32,6	
М 16	6611	Ser	Рас. ск.	18	18,8	−13 47	6,4	7,0	7	
М 17	6618	Sgr	Шар. ск.	18	20,8	−16 11	7,0	11,0	5	
М 18	6613	Sgr	Рас. ск.	18	19,9	−17 08	7,5	9,0	4,9	
М 19	6273	Oph	Шар. ск.	17	02,6	−26 16	6,8	13,5	27,1	«Трехдольная»
М 20	6514	Sgr	Диф. тум.	18	02,6	−23 02	9,0	28,0	5,2	
М 21	6531	Sgr	Рас. ск.	18	04,6	−22 30	6,5	13,0	4,25	
М 22	6656	Sgr	Шар. ск.	18	36,4	−23 54	5,1	24,0	10,1	
М 23	6494	Sgr	Рас. ск.	17	56,8	−19 01	6,9	27,0	2,15	
М 24	6603	Sgr	Обл. МП	18	16,9	−18 29	4,6	90	10	«Гантель»
М 25	14725	Sgr	Рас. ск.	18	31,6	−19 15	6,5	40,0	2	
М 26	6694	Sct	Рас. ск.	18	45,2	−09 24	8,0	15,0	5	
М 27	6853	Vul	План. тум.	19	59,6	+22 43	7,4	8,0 5,7	1,25	
М 28	6626	Sgr	Шар. ск.	18	24,5	−24 52	6,8	11,2	17,9	
М 29	6913	Cyg	Рас. ск.	20	23,9	+38 32	7,1	7,0	4,0	Туманность Андромеды Спутник М31 Туманность Треугольника
М 30	7099	Cap	Шар. ск.	21	40,4	−23 11	7,2	11,0	24,8	
М 31	224	And	Гал. S	00	42,7	+41 16	3,4	178 63	2 900	
М 32	221	And	Гал. E	00	42,7	+40 52	8,1	8 6	2 900	
М 33	598	Tri	Гал. S	01	33,9	+30 39	5,7	73 45	3 000	
М 34	1039	Per	Рас. ск.	02	42,0	+42 47	5,5	35,0	1,4	«Золотой песок» «Крест»
М 35	2168	Gem	Рас. ск.	06	08,9	+24 20	5,3	28,0	2,8	
М 36	1960	Aur	Рас. ск.	05	36,1	+34 08	6,3	12,0	4,1	
М 37	2099	Aur	Рас. ск.	05	52,4	+32 33	6,2	24,0	4,4	
М 38	1912	Aur	Рас. ск.	05	28,4	+35 50	7,4	21,0	4,2	
М 39	7092	Cyg	Рас. ск.	21	32,2	+48 26	5,2	32,0	0,825	

Объект	NGC	Созв.	Тип			m_V	D	Расст., тыс. свет. лет	Примечание
				h	m				
М 40	Win 4	UMa	Дв. зв.	12 22,4	+58 05	8,4	0,8	0,51	Туманность Ориона
М 41	2287	CMa	Рас. ск.	06 46,0	-20 44	4,6	38,0	2,3	
М 42	1976	Ori	Диф. тум.	05 35,4	-05 27	4,0	85 60	1,6	
М 43	1982	Ori	Диф. тум.	05 35,6	-05 16	9,0	20 15	1,6	«Ясли», «Улей», «Praesep»
М 44	2632	Cnc	Рас. ск.	08 40,1	+19 59	3,7	95,0	0,577	
М 45	—	Tau	Рас. ск.	03 47,0	+24 07	1,6	110,0	0,38	
М 46	2437	Pup	Рас. ск.	07 41,8	-14 49	6,0	27,0	5,4	Плеяды «Звездная пыль»
М 47	2422	Pup	Рас. ск.	07 36,6	-14 30	5,2	30,0	1,6	
М 48	2548	Hya	Рас. ск.	08 13,8	-05 48	5,5	54,0	1,5	
М 49	4472	Vir	Гал. Е	12 29,8	+08 00	8,4	9 7,5	60 000	«Водоворот»
М 50	2323	Mon	Рас. ск.	07 03,2	-08 20	6,3	16,0	3	
М 51	5194/5	CVn	Гал. S	13 29,9	+47 12	8,4	11 7	37 000	
М 52	7654	Cas	Рас. ск.	23 24,2	+61 35	7,3	13,0	5,0	«Кольцо»
М 53	5024	Com	Шар. ск.	13 12,9	+18 10	7,6	12,6	56,4	
М 54	6715	Sgr	Шар. ск.	18 55,1	-30 29	7,6	9,1	82,8	
М 55	6809	Sgr	Шар. ск.	19 40,0	-30 58	6,3	19,0	16,6	«Подсолнух»
М 56	6779	Lyr	Шар. ск.	19 16,6	+30 11	8,3	7,1	31,6	
М 57	6720	Lyr	План. тум.	18 53,6	+33 02	8,8	1,4 1,0	4,1	
М 58	4579	Vir	Гал. S	12 37,7	+11 49	9,7	5,5 4,5	60 000	«Подбитый глаз»
М 59	4621	Vir	Гал. Е	12 42,0	+11 39	9,6	5 3,5	60 000	
М 60	4649	Vir	Гал. Е	12 43,7	+11 33	8,8	7 6	60 000	
М 61	4303	Vir	Гал. S	12 21,9	+04 28	9,7	6 5,5	60 000	«Фригийский коллап»
М 62	6266	Oph	Шар. ск.	17 01,2	-30 07	6,5	14,1	21,5	
М 63	5055	CVn	Гал. S	13 15,8	+42 02	8,6	10 6	37 000	
М 64	4826	Com	Гал. S	12 56,7	+21 41	8,5	9,3 5,4	19 000	Группа из 4 звезд
М 65	3623	Leo	Гал. S	11 18,9	+13 05	9,3	8 1,5	35 000	
М 66	3627	Leo	Гал. S	11 20,2	+12 59	8,9	8 2,5	35 000	
М 67	2682	Cnc	Рас. ск.	08 50,4	+11 49	6,1	30,0	2,7	
М 68	4590	Hya	Шар. ск.	12 39,5	-26 45	7,8	12,0	32,3	
М 69	6637	Sgr	Шар. ск.	18 31,4	-32 21	7,6	7,1	26,7	
М 70	6681	Sgr	Шар. ск.	18 43,2	-32 18	7,9	7,8	28,0	
М 71	6838	Sge	Шар. ск.	19 53,8	+18 47	8,2	7,2	11,7	
М 72	6981	Aqr	Шар.ск.	20 53,5	-12 32	9,3	5,9	52,8	
М 73	6994	Aqr	Астер.	20 58,9	-12 38	9,0	2,8	0	
М 74	628	Psc	Гал. S	01 36,7	+15 47	9,4	10,2 9,5	35 000	

Каталог Мессье (окончание)

Объект	NGC	Созв.	Тип			m_V	D	Расст., тыс. свет. лет	Примечание
				h	m				
М 75	6864	Sgr	Шар. ск.	20 06,1	−21 55	8,5	6,0	57,7	«Малая гантель»
М 76	650	Per	План. тум.	01 42,4	+51 34	10,1	2,7 1,8	3,4	
М 77	1068	Cet	Гал. S	02 42,7	−00 01	8,9	7 6	60 000	
М 78	2068	Ori	Диф. тум.	05 46,7	+00 03	8,3	8 6	1,6	
М 79	1904	Lep	Шар. ск.	05 24,5	−24 33	7,7	8,7	41,1	
М 80	6093	Sco	Шар. ск.	16 17,0	−22 59	7,3	8,9	27,4	
М 81	3031	UMa	Гал. S	09 55,6	+69 04	6,9	21 10	12 000	
М 82	3034	UMa	Гал. Irr	09 55,8	+69 41	8,4	9 4	12 000	
М 83	5236	Hya	Гал. S	13 37,0	−29 52	7,6	11 10	15 000	
М 84	4374	Vir	Гал. S0	12 25,1	+12 53	9,1	5,0	60 000	
М 85	4382	Com	Гал. S0	12 25,4	+18 11	9,1	7,1 5,2	60 000	«Сова»
М 86	4406	Vir	Гал. S0	12 26,2	+12 57	8,9	7,5 5,5	60 000	
М 87	4486	Vir	Гал. E	12 30,8	+12 24	8,6	7,0	60 000	
М 88	4501	Com	Гал. S	12 32,0	+14 25	9,6	7 4	60 000	
М 89	4552	Vir	Гал. E	12 35,7	+12 33	9,8	4,0	60 000	
М 90	4569	Vir	Гал. S	12 36,8	+13 10	9,5	9,5 4,5	60 000	
М 91	4548	Com	Гал. S	12 35,4	+14 30	10,2	5,4 4,4	60 000	
М 92	6341	Her	Шар. ск.	17 17,1	+43 08	6,4	11,2	26,4	
М 93	2447	Pup	Рас. ск.	07 44,6	−23 52	6,0	22,0	3,6	
М 94	4736	CVn	Гал. S	12 50,9	+41 07	8,2	7 3	14 500	
М 95	3351	Leo	Гал. S	10 44,0	+11 42	9,7	4,4 3,3	38 000	«Сомbrero»
М 96	3368	Leo	Гал. S	10 46,8	+11 49	9,2	6 4	38 000	
М 97	3587	UMa	План. тум.	11 14,8	+55 01	9,9	3,4 3,3	2,6	
М 98	4192	Com	Гал. S	12 13,8	+14 54	10,1	9,5 3,2	60 000	
М 99	4254	Com	Гал. S	12 18,8	+14 25	9,9	5,4 4,8	60 000	
М 100	4321	Com	Гал. S	12 22,9	+15 49	9,3	7 6	60 000	
М 101	5457	UMa	Гал. S	14 03,2	+54 21	7,9	22,0	27 000	
М 102?	5457	UMa	Гал. S	14 03,2	+54 21	7,9	22,0	27 000	
М 102?	5866	Dra	Гал. S0	15 06,5	+55 46	9,9	5,2 2,3	40 000	
М 103	581	Cas	Рас. ск.	01 33,2	+60 42	7,4	6,0	8	
М 104	4594	Vir	Гал. S	12 40,0	−11 37	8,0	9 4	50 000	«Сомbrero»
М 105	3379	Leo	Гал. E	10 7,8	+12 35	9,3	2,0	38 000	
М 106	4258	CVn	Гал. S	12 19,0	+47 18	8,4	19 8	25 000	
М 107	6171	Oph	Шар. ск.	16 32,5	−13 03	7,9	10,0	19,6	
М 108	3556	UMa	Гал. S	11 11,5	+55 40	10,0	8 1	45 000	
М 109	3992	UMa	Гал. S	11 57,6	+53 23	9,8	7 4	55 000	
М 110	205	And	Гал. E	00 40,4	+41 41	8,5	17 10	2 900	

2. Каталог Колдвелла

В этом каталоге собраны яркие и интересные объекты, дополнительные к каталогу Мессье и доступные для наблюдения даже начинающим любителям астрономии. Каталог Колдвелла (Caldwell catalogue) был составлен и впервые опубликован в журнале *Sky and Telescope* в декабре 1995 г. британским астрономом и очень известным популяризатором науки Патриком Муром (Patrick Moor, р. 1923). Название каталогу он дал, используя свою вторую фамилию (его полное имя — Patrick Alfred Caldwell Moor), чтобы обозначать объекты своего каталога как C1, C2, ... и не путать их с объектами каталога Мессье (M 1, M 2, ...).

Во второй колонке кроме номеров NGC встречаются номера IC (Index Catalogue) и Sh (каталог Шарплесса). В седьмой колонке указана интегральная видимая звездная величина (m_v), измеренная путем суммирования света по всей площади объекта. Поэтому компактный объект с большей звездной величиной иногда выглядит ярче и отыскивается легче, чем протяженный диффузный объект меньшей звездной величины.

Все объекты в каталоге упорядочены по склонению — от больших к меньшим. Патрик Мур считает, что так удобнее. Жителям Северного полушария доступны для наблюдения все объекты от начала каталога до определенного его места, обусловленного географической широтой точки наблюдения и условиями видимости.

— прямое восхождение в часах и минутах; эпоха J2000.0

— склонение в градусах и минутах дуги; эпоха J2000.0

m_v — видимая визуальная звездная величина

D — угловой диаметр или наибольший размер в минутах дуги

Тип объекта

Рас. ск.	рассеянное скопление	Гал. S	спиральная галактика
Шар. ск.	шаровое скопление	Гал. E	эллиптическая галактика
План. тум.	планетарная туманность	Гал. Irr	неправильная галактика
Эмис. тум.	эмиссионная туманность	Гал. S0	линзовидная галактика
Отраж. тум.	отражательная туманность	Ост. SN	остаток сверхновой
Темн. тум.	темная туманность		

C	NGC	Тип			, °	Созв.	m_v	D ,	Примечание
			h	m					
1	188	Рас. ск.	00	44	85,3	Сер	8,1 ^m	14	Старое скопление
2	40	План. тум.	00	13	72,5	Сер	10,7	0,6	
3	4236	Гал. S	12	17	69,5	Dra	9,7	19	
4	7023	Отраж. тум.	21	02	68,2	Сер	7,0	18	
5	IC 342	Гал. S	03	47	68,1	Cam	9,1	18	
6	6543	План. тум.	17	59	66,6	Dra	8,8	0,3/5,8	«Кошачий глаз»
7	2403	Гал. S	07	37	65,6	Cam	8,4	18	
8	559	Рас. ск.	01	30	63,3	Cas	9,5	5	«Пещера»
9	Sh2-155	Эмис. тум.	22	57	62,6	Сер	9	50	
10	663	Рас. ск.	01	46	61,3	Cas	7,1	16	

Каталог Колдвелла (продолжение)

С	NGC	Тип			, °	Созв.	m_V	D ,	Примечание
			h	m					
11	7635	Эмис. тум.	23	21	61,2	Cas	8,5	15	«Пузырь» Скопление Cas h и Per «Мигающая»
12	6946	Гал. S	20	35	60,2	Sep	8,9	11	
13	457	Рас. ск.	01	19	58,3	Cas	6,4	13	
14	869/884	Рас. ск.	02	20	57,1	Per	4,3/4,4	30/30	
15	6826	План. тум.	19	45	50,5	Cyg	9,8	0,5	«Кокон» «Северная Америка»
16	7243	Рас. ск.	22	15	49,9	Lac	6,4	21	
17	147	Гал. E	00	33	48,5	Cas	9,3	13	
18	185	Гал. E	00	39	48,3	Cas	9,2	12	
19	IC 5146	Эмис. тум.	21	54	47,3	Cyg	7,2	12	«Северная Америка»
20	7000	Эмис. тум.	20	59	44,3	Cyg	5,0	120	
21	4449	Гал. Irr	12	28	44,1	CVn	9,4	5	
22	7662	План. тум.	23	26	42,6	And	9,2	0,3	
23	891	Гал. S	02	23	42,4	And	10,0	14	«Голубой снежок» Сейферт. гал. Per A
24	1275	Гал. S	03	20	41,5	Per	11,6	3	
25	2419	Шар. ск.	07	38	38,9	Lyn	10,4	4	
26	4244	Гал. S	12	18	37,8	CVn	10,2	16	
27	6888	Эмис. тум.	20	12	38,4	Cyg	11	20	«Полумесяц»
28	752	Рас. ск.	01	58	37,7	And	5,7	50	
29	5005	Гал. S	13	11	37,1	CVn	9,8	5	
30	7331	Гал. S	22	37	34,4	Peg	9,5	11	
31	IC 405	Эмис. тум.	05	16	34,3	Aur	7	30	«Пылающая звезда» Галактика «Кит» «Рыбачья сеть», E «Рыбачья сеть», W
32	4631	Гал. S	12	42	32,5	CVn	9,3	15	
33	6992/5	Ост. SN	20	57	31,5	Cyg	8,0	60	
34	6960	Ост. SN	20	46	30,7	Cyg	8,0	70	
35	4889	Гал. E	13	00	28,0	Com	11,4	3	Галактика «Игла» «Эскимос»
36	4559	Гал. S	12	36	28,0	Com	9,9	11	
37	6885	Рас. ск.	20	12	26,5	Vul	5,7	7	
38	4565	Гал. S	12	36	26,0	Com	9,6	16	
39	2392	План. тум.	07	29	20,9	Gem	9,9	0,7	Гиады
40	3626	Гал. S	11	20	18,4	Leo	10,9	3	
41		Рас. ск.	04	27	16,0	Tau	0,5	330	
42	7006	Шар. ск.	21	02	16,2	Del	10,6	3	
43	7814	Гал. S	00	03	16,2	Peg	10,5	6	Переменная туман- ность Хаббла
44	7479	Гал. S	23	05	12,3	Peg	11,0	4	
45	5248	Гал. S	13	38	8,9	Boo	10,2	7	
46	2261	Эмис. тум.	06	39	8,7	Mon	10,0	2	
47	6934	Шар. ск.	20	34	7,4	Del	8,9	6	«Розетка»
48	2775	Гал. S	09	10	7,0	Cnc	10,3	5	
49	2237-9	Эмис. тум.	06	32	5,1	Mon	~4	80	

С	NGC	Тип			, °	Созв.	m_V	D ,	Примечание
			h	m					
50	2244	Рас. ск.	06	32	4,9	Mon	4,8	24	«Веретено»
51	IC 1613	Гал. Irr	01	05	2,1	Get	9,3	12	
52	4697	Гал. E	12	49	-5,8	Vir	9,3	6	
53	3115	Гал. S0	10	05	-7,7	Sex	9,2	8	
54	2506	Рас. ск.	08	00	-10,8	Mon	7,6	7	«Сатурн»
55	7009	План. тум.	21	04	-11,4	Aqr	8,3	0,6	
56	246	План. тум.	00	47	-11,9	Cet	8,0	4	Галактика Барнарда
57	6822	Гал. Irr	19	45	-14,8	Sgr	9,4	10	
58	2360	Рас. ск.	07	18	-15,6	CMa	7,2	13	«Призрак Юпитера»
59	3242	План. тум.	10	25	-18,6	Hya	8,6	0,6	
60	4038	Гал. S	12	02	-18,9	Crv	10,7	3	«Антенны»
61	4039	Гал. S	12	02	-18,9	Crv	10,7	3	«Антенны»
62	247	Гал. S	00	47	-20,8	Cet	8,9	20	«Улитка»
63	7293	План. тум.	22	30	-20,8	Aqr	7,4	13	
64	2362	Рас. ск.	07	19	-25,0	CMa	4,1	8	Скопление CMa
65	253	Гал. S	00	48	-25,3	Scl	7,1	25	Галактика Скульптора
66	5694	Шар. ск.	14	40	-26,5	Hya	10,2	4	R CrA
67	1097	Гал. S	02	46	-30,3	For	9,3	9	
68	6729	Отраж. тум.	19	02	-37,0	CrA	~11	1	
69	6302	План. тум.	17	14	-37,1	Sco	12,8	0,8	
70	300	Гал. S	00	55	-37,7	Scl	8,7	20	«Букашка»
71	2477	Рас. ск.	07	52	-38,6	Pup	5,8	27	
72	55	Гал. S	00	15	-39,2	Scl	7,9	32	
73	1851	Шар. ск.	05	14	-40,1	Col	7,3	11	
74	3132	План. тум.	10	08	-40,4	Vel	8,2	1	«Южное кольцо»
75	6124	Рас. ск.	16	26	-40,7	Sco	5,8	29	
76	6231	Рас. ск.	16	54	-41,8	Sco	2,6	15	Радиогалактика Cen A
77	5128	Галактика	13	26	-43,0	Cen	7,0	18	
78	6541	Шар. ск.	18	08	-43,7	CrA	6,6	13	
79	3201	Шар. ск.	10	18	-46,4	Vel	6,8	18	
80	5139	Шар. ск.	13	27	-47,5	Cen	3,7	36	Cen
81	6352	Шар. ск.	17	26	-48,4	Ara	8,2	7	
82	6193	Рас. ск.	16	41	-48,8	Ara	5,2	15	
83	4945	Гал. S	13	05	-49,5	Cen	8,6	20	
84	5286	Шар. ск.	13	46	-51,4	Cen	7,6	9	IC 2391
85	IC 2391	Рас. ск.	08	40	-53,1	Vel	2,5	50	
86	6397	Шар. ск.	17	41	-53,7	Ara	5,7	26	
87	1261	Шар. ск.	03	12	-55,2	Hor	8,4	7	
88	5823	Рас. ск.	15	06	-53,6	Cir	7,9	10	Nor
89	6067	Рас. ск.	16	13	-54,2	Nor	5,6	13	

Каталог Колдвелла (окончание)

С	NGC	Тип			, °	Созв.	m_v	D ,	Примечание
			h	m					
90	2867	План. тум.	09	21	-58,3	Car	9,7	0,3	Кия
91	3532	Рас. ск.	11	06	-58,7	Car	3,0	55	
92	3372	Эмис. тум.	10	44	-59,9	Car	2,5	120	
93	6752	Шар. ск.	19	11	-60,0	Pav	5,4	20	
94	4755	Рас. ск.	12	54	-60,3	Cru	4,2	10	
95	6025	Рас. ск.	16	04	-60,5	TrA	5,1	12	«Шкатулка с драгоценностями»
96	2516	Рас. ск.	07	58	-60,9	Car	3,8	30	
97	3766	Рас. ск.	11	36	-61,6	Cen	5,3	12	
98	4609	Рас. ск.	12	42	-63,0	Cru	6,9	5	
99		Темн. тум.	12	53	-63,0	Cru	—	350	
100	IC 2944	Рас. ск.	11	37	-63,0	Cen	4,5	15	Южные Плеяды «Тарантул»
101	6744	Гал. S	19	10	-63,9	Pav	8,4	16	
102	IC 2602	Рас. ск.	10	43	-64,4	Car	1,9	50	
103	2070	Эмис. тум.	05	39	-69,1	Dor	8,2	40	
104	362	Шар. ск.	01	03	-70,9	Tuc	6,6	13	
105	4833	Шар. ск.	13	00	-70,9	Mus	7,4	14	47 Tuc
106	104	Шар. ск.	00	24	-72,1	Tuc	4,0	31	
107	6101	Шар. ск.	16	26	-72,2	Aps	9,3	11	
108	4372	Шар. ск.	12	26	-72,7	Mus	7,8	19	
109	3195	План. тум.	10	10	-80,9	Cha	11,6	0,6	

3. Звездные ассоциации

R — расстояние от Солнца, N — число ярких звезд, отнесенных к ассоциации. Номера скоплений даны по NGC. В скобках указан спектральный класс наиболее массивной звезды скопления или ассоциации. Знак «?» означает сомнение в генетической связи данного скопления с ассоциацией. Сокращения: тум. — диффузная туманность; А. — ассоциация.

ОВ-ассоциации

Назва- ние	Координаты центра				R , кпк	Размер		N	Скопления/звезды
	h m		l , °	b , °		угл., °	лин., пк		
Cep OB4	0 02	+67,6	118,2	+5,2	0,69	4 3,5	48 42	44	A. (O7)
Cas OB4	0 28	+62,7	120,3	−0,1	2,75	5,5 3	260 140	29	103? 146? King 14? (все B3)
Cas OB7	0 53	+64,0	123,1	+1,1	1,8	3	95	40	King 16? Berkeley 62? A. (O6)
Cas OB8	1 46	+61,3	129,5	−0,9	1,9	3 2	100 70	43	581, 654, 659, 663; A. (O7,5)
Per OB1	2 15	+57,3	134,0	−3,8	2,29	8 6	320 240	65	869, 884 [h Per](B0); A.(O5,5)
Cas OB6	2 43	+61,4	135,9	+1,4	2,40	6	250	25	IC1805 (8 O-звезд)
Per OB3	3 28	+49,9	147,0	−5,5	0,17	—	—	—	/ , Per

Назва- ние	Координаты центра				R, кпк	Размер		N	Скопления/звезды
	h m		l, °	b, °		угл., °	лин., пк		
Per OB2	3 42	+33,4	159,2	-17,1	0,40	8 5	56 35	4	/ , , Per
Aur OB2	5 28	+34,9	173,0	+0,1	3,16	—	—	8	1893, IC 410
Aur OB1	5 22	+33,9	173,1	-1,6	1,32	6 5	140 120	10	1912, 60; 1931?
Gem OB1	6 10	+21,6	189,1	+1,1	1,51	5	130	17	2175?
Ori OB1	5 31	-2,7	206,0	-19,0	0,46	16	130	15	Трапеция / , , , Ori
Mon OB1	6 33	+8,8	203,0	0,0	0,55	14 5	135 48	1	2264 / S Mon
Mon OB2	6 37	+4,8	207,0	-1,0	1,51	6 4	160 110	17	2244 / Звезда Пласскетта
CMa OB1	7 07	-10,5	224,0	-1,3	1,32	4	92	7	2335, 53; 2343?
Pup OB1	7 55	-27,1	244,0	+0,5	2,51	4 3	180 130	7	2467?
Vel OB1	8 50	-45,0	265,0	-0,7	1,40	6 4	150 100	16	2659?
Car OB1	10 47	-59,1	287,5	0,0	2,51	2 1	90 48	21	3293; IC 2581?
Car OB2	11 06	-59,9	290,1	+0,3	2,0	6 3	190 90	14	3572, Tr 18
Cen OB1	13 05	-62,1	304,5	+0,8	2,51	6	260	21	4755 / Cru
Sco-Cen	16	-25	348,2	+20,9	0,16	Солнце	внутри?	—	IC 2602?/ Car, CMa, Eri
Ara OB1	16 40	-46,8	338,0	0,0	1,38	4,5 3	110 70	—	6169, 93 / Nor
Sco OB1	16 54	-42,0	343,3	+1,2	1,91	1,5 1	53 37	28	6231 / ¹ Sco
Sco OB2	16 15	-25,9	350,1	+17,8	0,16	—	—	3	/ , ¹ , Sco
Sgr OB1	18 08	-21,5	9,0	-0,6	1,58	9,5 4	260 110	17	6514, 30-1 / Sgr
Sgr OB4	18 14	-19,1	11,8	-0,8	2,4	—	—	7	6603
Ser OB1	18 21	-14,6	16,5	0,0	2,19	5 3	190 110	18	6611
Ser OB2	18 19	-12,0	18,6	+1,7	2,0	8	280	15	6604?
Vul OB1	19 44	+24,2	60,3	+0,2	2,5	3,5 1,5	150 70	12	6823 (O7), 6830 (B6)?, 6820 — тум.
Cyg OB3	20 05	+35,8	72,6	+2,3	1,74	3,5 1,5	110 45	30	6871 (O6,5); A. (O4) / Cyg X-1
Cyg OB1	20 18	+37,6	75,5	+1,1	1,26	4 3,5	88 77	68	6913 (O9,5), IC 4996 (B0)? A. (O5)
Cyg OB9	20 23	+39,9	78,0	+1,5	1,0	2,5 1,5	45 26	24	6910
Cyg OB2	20 32	+41,3	80,1	+1,0	1,70	0,7	20	15	A. (O3)
Cyg OB7	21 03	+49,7	90,0	+2,1	0,83	11	150	9	7039 (B5)? Cocoon Neb. / Cyg
Cep OB2	21 48	+61,1	102,5	+5,7	0,95	10	170	17	Tr37 (O6,5); 7160(B1); IC 1396 / μ , , Cep
Cep OB1	22 25	+55,2	103,0	-1,9	2,75	11 4	530 190	28	Две ассоциации? / Cep
Lac OB1	22 43	+44,1	99,9	-12,9	0,5	16	140	29	A. (O9,5)
Cep OB3	23 02	+63,3	111,0	+3,0	0,72	3,5 1,5	44 19	29	A. (O7)
Cas OB2	23 16	+61,1	111,7	+0,3	2,19	6 4	230 150	—	7510 (O9)
Cas OB5	23 59	+60,4	116,5	-1,8	2,0	4 3	140 100	15	7788 (B1)? / Cas

Т-ассоциации

Название	Координаты центра		Расстояние, пк	Диаметр		N	Скопления / звезды
	<i>l</i>	<i>b</i>		°	пк		
Per T2	161°	−18°	380	0,4	2,7	16	IC 348 /
Tau T1	169	−16	200	3	11	15	/ RY Tau
Tau T2	179	−20	170	6	18	12	/ T Tau
Tau T3	174	−15	170	5	15	49	/ UZ Tau
Aur T1	172	−7	170	9	27	15	/ RW Aur
Ori T1	193	−12	400	4	30	49	/ CO Ori
Ori T2	209	−20	400	4	30	450	/ T Ori
Ori T3	206	−16	400	4	30	102	2024 / , Ori
Ori T4	197	−10	400	3	21	28	/ FU Ori
Ori T8	205	−15	400	2	15	45	2068, 2071 /
Mon T4	202	0	800	1	14	16	2169, 2245 /
Mon T2	206	−2	1 660	0,5	14	16	2244 /
Mon T1	203	+2	800	3	42	198	2264 / S Mon
Sco T1	354	+18	210	9	33	33	/ Sco, Oph
Sgr T2	6	−1	1 300	1	23	85	6530, M8 /
Ser T1	17	+1	2 300	0,2	8	61	6611 /
Cyg T1	85	0	600	1	10	21	IC 5070 /
Cep T2	100	+4	480	3	25	125	IC 1396 /
Cyg T3	94	−6	1 000	0,2	3	38	IC 5146 /

4. Яркие рассеянные скопления Галактики

NGC — номер по каталогу Дрейера, М — по каталогу Мессье (NGC 2632 = M44 = Ясли, Praesepere); координаты эпохи J2000.0; видимый диаметр скопления в угловых минутах; *m_V* интегральная — интегральный визуальный блеск скопления (р — фотографический); расстояние в парсеках; *m_V* ярчайшей звезды — визуальный блеск ярчайшей звезды скопления; *N* — количество известных звезд скопления; Спектр — спектральный класс ярчайшей звезды; *T* — приблизительный возраст скопления в миллионах лет. Данные по Sky Catalogue 2000 с некоторыми добавлениями.

NGC	М	Со- звезд- ние			Диа- метр,	<i>m_V</i> инте- граль- ная	Расст., пк	<i>m_V</i> ярчай- шей звезды	N	Спектр	<i>T</i> , млн. лет
			h	m							
457	—	Cas	1 19,1	+58 20	13	6,4	2 800	8,6	80	B2	25
581	103	Cas	1 33,2	+60 42	6	7,4	2 600	10,6	25	B2	22
869	—	h Per	2 19,0	+57 09	30	4,3p	2 200	6,6	200	B0	5,6
884	—	Per	2 22,4	+57 07	30	4,4p	2 300	8,1	150	B0	3,2
1039	34	Per	2 42,0	+42 47	35	5,2	440	7,3	60	B8	190
Плеяды	45	Tau	3 47,0	+24 07	110	1,2	125	2,9	100	B5	78
Гиады	—	Tau	4 27:	+16:	330	0,5	46	3,4	90	A2	660

NGC	M	Со- звезд- дие			Диа- метр, м	m _V инте- граль- ная	Расст., пк	m _V ярчай- шей звезды	N	Спектр	T, млн. лет
			h	m							
1912	38	Aur	5 28,7	+35 50	21	6,4	1 320	9,5	100	B4	220
1960	36	Aur	5 36,1	+34 08	12	6,0	1 270	8,9	60	B2	25
2099	37	Aur	5 52,4	+32 33	24	5,6	1 350	9,2	150	B9	300
2168	35	Gem	6 08,9	+24 20	28	5,1	870	8,2	200	B3	110
2287	41	CMa	6 46,0	-20 44	38	4,6	700		100	A0	
2281	—	Aur	6 49,3	+41 04	15	5,4	500	7,3	30	A0	300
2447	93	Pup	7 44,6	-23 52	22	6,2:	1 100	8,2	80	B9	98
2632	44	Cnc	8 40,1	+19 59	95	3,1	160	6,3	50	A0	660
2682	67	Cnc	8 50,4	+11 49	30	6,9	800	9,7	200	B8	3200
3114	—	Car	10 02,7	-60 07	35	4,2	900	7,3		B9	110
3532	—	Car	11 06,4	-58 40	55	3,0	410	7,1	150	B5	270
3766	—	Cen	11 36,1	-61 37	12	5,3	1 700	7,2	100	B0	22
4349	—	Cru	12 24,5	-61 54	16	7,4	1 700	10,9	30	B8	220
4755	—	κ Cru	12 53,6	-60 20	10	4,2	2 340	5,8		B2	7,1
6231	—	Sco	16 54,0	-41 48	15	2,6	1 800	4,7		O8	3,2
6242	—	Sco	16 55,6	-39 30	9	6,4	1 200	7,3		B5	51
6405	6	Sco	17 40,1	-32 13	15	4,2	600	6,2	80	B5	51
6416	—	Sco	17 44,4	-32 21	18	5,7	800	8,4	40	A0	167
6475	7	Sco	17 53,9	-34 49	80	3,3	240	5,6	80	B8	220
6494	23	Sgr	17 56,8	-19 01	27	5,5	660	9,2	150	B9	220
6520	—	Sgr	18 03,4	-27 54	6	7,6p	1 650	9p	60	O	54
6531	21	Sgr	18 04,6	-22 30	13	5,9	1 300	7,3	70	B0	4,6
6603	24	Sgr	18 18,4	-18 25	5	11,1p	2 880	14p	100	B9	
6611	16	Ser	18 18,8	-13 47	7	6,0	2 500	8,2		O6	5,5
6645	—	Sgr	18 32,6	-16 54	10	8,5p		12p	40	B9	
6705	11	Sct	18 51,1	-06 16	14	5,8	1 720	8,0		B8	220
6939	—	Cep	20 31,4	+60 38	8	7,8	1 250	11,9	80	B8	1800
7092	39	Cyg	21 32,2	+48 26	32	4,6	270	6,8	30	A0	270
7654	52	Cas	23 24,2	+61 35	13	6,9	1 600	8,2	100	B6	35

5. Яркие шаровые скопления Галактики

Диам. — наблюдаемый диаметр скопления, S_p — интегральный спектр, R — расстояние от Солнца, V_r — лучевая скорость относительно солнечного стандарта покоя (т. е. исправленная за движение Солнца к апексу), M_v — интегральная абсолютная звездная величина, $(B - V)_0$ — исправленный за межзвездное покраснение показатель цвета, l и b — галактическая долгота и широта. Источники: *Catalog of parameters for Milky Way globular clusters by W. E. Harris, 1994; Sky Catalogue 2000.*

Яркие шаровые скопления Галактики (продолжение)

NGC	М/др.	h m	°	Созв.	$l, ^\circ$	$b, ^\circ$	Диаметр	V	B-V	Sp	R, кпк	V_r , км/с	M_V	(B-V) ₀
104	47 Tuc	0 24,1	-72 05	Tuc	306	-45	30,9	4,03	0,89	G3	4,1	-28	-9,43	0,85
288		0 52,8	-26 35	Scl	152	-89	13,8	8,10	0,66		8,1	-54	-6,60	0,63
362		1 03,2	-70 51	Tuc	302	-46	12,9	6,58	0,76	F8	8,0	+213	-8,32	0,72
1851		5 14,1	-40 03	Col	245	-35	11,0	7,30	0,78	F7	11,7	+302	-8,10	0,71
1904	M79	5 24,5	-24 33	Lep	227	-29	8,7	8,00	0,63	F6	12,2	+188	-7,65	0,62
2808		9 12,0	-64 52	Car	282	-11	13,8	6,30	0,93	F8	8,9	+86	-9,22	0,71
3201		10 17,6	-46 25	Vel	277	9	18,2	6,75	0,98	F7	4,9	+483	-7,40	0,76
4372		12 25,8	-72 40	Mus	301	-10	18,6	7,80	0,97	F5	4,6	+52	-7,10	0,52
4590	M68	12 39,5	-26 45	Hya	300	36	12,0	8,20	0,63	F2	9,9	-97	-6,81	0,60
4833		12 59,6	-70 53	Mus	304	-8	13,5	7,35	0,96	F4	5,7	+196	-7,55	0,58
5024	M 53	13 12,9	+18 10	Com	333	80	12,6	7,72	0,64	F5	18,1	-72	-8,62	0,59
5139	Cen	13 26,8	-47 29	Cen	309	15	36,3	3,65	0,79	F6	5,0	+229	-10,27	0,68
5272	M3	13 42,2	+28 23	CVn	42	79	16,2	6,35	0,69	F7	9,8	-137	-8,65	0,68
5286		13 46,4	-51 22	Cen	312	11	9,1	7,62	0,87	F6	9,0	+51	-7,99	0,60
5904	M5	15 18,6	+2 05	Ser	4	47	17,4	5,75	0,71	F6	7,0	+65	-8,76	0,68
5986		15 46,1	-37 47	Lup	337	13	9,8	7,12	0,90	F6	10,0	+98	-8,78	0,63
6093	M80	16 17,0	-22 59	Sco	353	20	8,9	7,20	0,85	F7	8,4	+18	-8,08	0,64
6121	M4	16 23,6	-26 32	Sco	351	16	26,3	5,93	1,03	F8	2,1	+80	-6,80	0,68
6171	M107	16 32,5	-13 03	Oph	3	23	10,0	8,13	1,14	G0	6,0	-21	-6,90	0,77
6205	M13	16 41,7	+36 28	Her	59	41	16,6	5,86	0,69	F5	6,8	-228	-8,49	0,67
6218	M12	16 47,2	-1 57	Oph	16	26	14,5	6,60	0,82	F7	5,5	-28	-7,70	0,63
6254	M10	16 57,1	-4 06	Oph	15	23	15,1	6,57	0,92	F5	4,1	+91	-7,48	0,66
6266	M62	17 01,2	-30 07	Oph	354	7	14,1	6,60	1,17	F8	6,6	-59	-8,78	0,71
6273	M19	17 02,6	-26 16	Oph	357	9	13,5	7,15	1,00	F6	8,3	+140	-9,20	0,62
6293		17 10,2	-26 35	Oph	358	8	7,9	8,2:	0,98	F4	8,6	-88	-7,2	0,64
6341	M92	17 17,1	+43 08	Her	68	35	11,2	6,52	0,62	F2	8,0	-102	-7,98	0,61
6333	M9	17 19,2	-18 31	Oph	6	11	9,3	7,9:	0,94	F4	8,1	+242	-7,4	0,58
6352		17 25,5	-48 25	Ara	341	-7	7,1	8,15	1,06	G4	5,6	-110	-6,32	0,81
6362		17 31,9	-67 03	Ara	326	-18	10,7	8,30	0,85	G3	7,2	-15	-6,35	0,73
6388		17 36,3	-44 44	Sco	346	-7	8,7	6,85	1,17	G3	11,4	+87	-9,98	0,85
6402	M14	17 37,6	-3 15	Oph	21	15	11,7	7,56	1,28	F6	8,4	-95	-9,34	0,70
6397		17 40,7	-53 40	Ara	338	-12	25,7	5,65	0,75	F5	2,2	+21	-6,65	0,57
6441		17 50,2	-37 03	Sco	354	-5	7,8	7,42	1,28	G3	9,2	+26	-9,08	0,83
6544		18 07,3	-25 00	Sgr	6	-2	8,9	8,25	1,36	F9	2,4	-5	-7,10	0,73
6541		18 08,0	-43 42	CrA	349	-11	13,1	6,64	0,77	F6	7,2	-148	-7,96	0,64
6553		18 09,3	-25 54	Sgr	5	-3	8,1	8,25	1,62	G4	4,1	-16	-8,15	0,83

NGC	М/др.	h m	°	Созв.	$l, ^\circ$	$b, ^\circ$	Диаметр	V	B-V	Sp	R, кпк	V_r , км/с	M_V	(B-V) ₀
6626	M28	18 24,5	-24 52	Sgr	8	-6	11,2	6,9:	1,10	F8	5,6	+27	-8,1	0,77
6637	M 69	18 31,4	-32 21	Sgr	2	-10	7,1	7,70	0,99	G4	8,3	+49	-7,90	0,82
6656	M 22	18 36,4	-23 54	Sgr	10	-8	24,0	5,10	0,99	F5	3,0	-137	-8,45	0,64
6681	M 70	18 43,2	-32 18	Sgr	3	-13	7,8	8,08	0,71	F8	8,6	+228	-7,32	0,64
6712		18 53,1	-8 42	Sct	25	-4	7,2	8,21	1,16	G0	6,4	-93	-7,30	0,81
6715	M 54	18 55,1	-30 29	Sgr	6	-14	9,1	7,70	0,85	F7	20,0	+141	-9,41	0,71
6723		18 59,6	-36 38	Sgr	0	-17	11,0	7,32	0,75	G1	8,0	-74	-7,48	0,72
6752		19 10,9	-59 59	Pav	337	-26	20,4	5,40	0,65	F6	3,8	-27	-7,80	0,62
6779	M 56	19 16,6	+30 11	Lyr	63	8	7,1	8,25	0,86	F5	9,7	-117	-7,35	0,64
6809	M 55	19 40,0	-30 58	Sgr	9	-23	19,0	6,95	0,69	F4	5,1	+184	-6,85	0,62
6838	M 71	19 53,8	+18 47	Sge	57	-5	7,2	8,30	1,13	G2	3,6	-6	-5,60	0,85
7078	M 15	21 30,0	+12 10	Peg	65	-27	12,3	6,35	0,68	F3	9,8	-94	-8,91	0,56
7089	M 2	21 33,5	-0 49	Aqr	53	-36	12,9	6,50	0,67	F3	11,1	+4	-8,95	0,61
7099	M 30	21 40,4	-23 11	Cap	27	-47	11,0	7,50	0,58	F3	7,6	-179	-7,10	0,57

6. Яркие диффузные туманности

vdB — ван ден Берг; Sh — Шарплес; m_V и Спектр относятся к звезде, освещающей туманность (v — переменная). Данные по: *Sky Catalogue 2000*.

Туманность	Созв./зв.	h m	°	Размеры	m_V	Спектр	Примечания
IC 59	Cas	0 56,7	+61 04	10 5	2,47v	B0IVe	«Калифорния» (Ригель), отражательная туманность Большая туманность Ориона, M42
NGC 1499	Per	4 00,7:	+36 37:	145 40	4,04	O7e	
IC 2118	Eri	5 06,9:	-7 13:	180 60	0,12	B8Iae:	
NGC 1976	1 Ori	5 35,4	-5 27	66 60	2,9	OB	«Тарантул» в БМО
NGC 1977	42 Ori	5 35,5	-4 52	20 10	4,59	B1V	
NGC 2070	30 Dor	5 38,7	-69 06	40 25			
NGC 2024	Ori	5 40,7	-2 27	30 30	2,05	O9,5Ibe	«Розетка» Переменная туманность Хаббла «Конус»
NGC 2237-9	Mon	6 32,3	+5 03	80 60			
NGC 2261	R Mon	6 39,2	+8 44	2 1	10,0v		
NGC 2264	S Mon	6 40,9	+9 54	60 30	4,66v	O7Ve	Включает туманность «Keyhole»
IC 2177	Mon	7 05,1	-10 42	120 40	6,21	O7III	
NGC 3372	Car	10 43,8	-59 52	120 120	6,21v		
IC 2944	Cen	11 38,3	-63 22	75 50	3,13	B9III	(Антарес) «Тройная» (Trifid), M20
vdB 107	Sco	16 29,2	-26 27	85 80	0,92	M1Ib+dB4	
NGC 6514	Sgr	18 02,6	-23 02	29 27	7,63	O5e	

Яркие диффузные туманности (окончание)

Туманность	Созв./зв.	h m	°	Размеры	m_V	Спектр	Примечания
NGC 6523	Sgr	18 03,8	-24 23	90 40			«Лагуна», M8
NGC 6611	Ser	18 18,8	-13 47	35 28			«Орел», M16
NGC 6618	Sgr	18 20,8	-16 11	46 37			«Омега», M17
IC 1287	Sct	18 31,3	-10 50	44 34	5,5	B2V	
IC 1318	Cyg	20 14,3	+39 54	40 40	2,20	F8Ib	
NGC 6960	52 Cyg	20 45,7	+30 43	70 6			(Cirrus)
IC 5070	Cyg	20 50,8	+44 21	80 70			«Пеликан» вместе с IC 5067
NGC 6992	Cyg	20 56,4	+31 43	60 8			«Сеть»
NGC 7000	Cyg	20 58,8	+44 20	120 100	5,96	O6V	«Северная Америка»
Sh2-129	Cep	21 11,8	+59 57	100 65	5,64	B0II	

7. Звездное население Галактики

Класс светимости	Спектральный класс	Типичная масса, $M_\odot$	Типичная светимость, $L_\odot$	Количество звезд	Вклад (%) в...		
					количество	массу	светимость
Сверхгиганты (I, II)	O–M	?	50 000	$\sim 10^5$	~ 0	~ 0	~ 3
Красные гиганты (III)	F–M	1,2	40	$2 \cdot 10^9$	0,5	0,6	~ 38
Главная последовательность (V)	O	25	80 000	$\sim 10^4$	~ 0	~ 0	~ 1
	B	5	200	$3 \cdot 10^8$	0,1	1	28
	A	1,7	6	$3 \cdot 10^9$	0,6	3	9
	F	1,2	1,4	$1,2 \cdot 10^{10}$	3	9	8
	G	0,9	0,6	$2,6 \cdot 10^{10}$	7	13,4	7
	K	0,5	0,2	$5,2 \cdot 10^{10}$	12,8	15	5
	M	0,25	0,005	$2,7 \cdot 10^{11}$	67	38	1
Белые карлики	B–M	1,0	0,005	$3,5 \cdot 10^{10}$	9	20	~ 0
Всего				$\sim 400 \cdot 10^9$	100%	100%	100%

Суммарный вклад звезд в полную массу Галактики оценивается в $1,75 \cdot 10^{11} M_\odot$.

Суммарный вклад звезд в полную светимость Галактики $2 \cdot 10^{10} L_\odot = 8 \cdot 10^{36}$ Вт.

8. Местная группа галактик

Координаты на эпоху 2000 г. Н а з в а н и я: LMC — Большое Магелланово Облако, SMC — Малое Магелланово Облако, WLM — Wolf-Lundmark-Melotte galaxy; SagDEG — Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy; SagDIG — Sagittarius Dwarf Irregular Galaxy. О б о з н а ч е н и я: V_r — лучевая скорость относительно Солнца; d — угловой размер: максимальный и минимальный диаметры в минутах дуги; D — расстояние от Солнца.

Название (другое название)	h m s		Тип	d	m_V	M_V	V_r , км/с	D , кпк	l , °	b , °
WLM (DDO 221)	00 01 58	-15 27,9	Ir	10 4	10,4	-14,4	-120	925	076	-74
IC 10 (UGC 192)	00 20 25	+59 17,5	Ir	5 4	10,4	-16,3	-344	660	119	-03
Cetus (PGC 3097691)	00 26 11	-11 02,7	dSph	5 4	14,4	-10,1		760	101	-73
NGC 147 (UGC 326)	00 33 12	+48 30,5	Sph	13 8	9,5	-15,1	-193	660	120	-14
And III (A0032+36)	00 35 17	+36 30,5	dSph	5 3	14,2	-10,2	-351	750	119	-26
NGC 185 (UGC 396)	00 38 58	+48 20,3	Sph	12 10	10,1	-15,6	-202	630	121	-14
M 110 (NGC 205)	00 40 23	+41 41,2	Sph	17 10	8,1	-16,4	-244	760	121	-21
M 32 (NGC 221)	00 42 42	+40 51,9	E2	9 7	8,1	-16,5	-205	760	121	-22
M 31 (NGC 224)	00 42 44	+41 16,2	Sb	180 60	3,4	-21,2	-301	760	121	-22
And I (A0043+37)	00 45 40	+38 02,5	E3 pec	3	13,6	-11,8	-368	735	122	-25
SMC	00 52 36	-72 48,0	Ir	280 160	2,0	-17,1	+148	59	303	-44
Sculptor	01 00 04	-33 42,9	dSph	50	8,8	-9,8	+110	87	288	-83
Pisces (LGS 3)	01 03 57	+21 53,7	dIr	2	14,3	-10,4	-286	810	127	-41
IC 1613	01 04 47	+02 08,2	Ir	12	9,1	-15,3	-232	725	130	-61
And V	01 10 17	+47 37,7	dSph	2	15,9	-10,2	-403	773	126	-15
And II	01 16 30	+33 25,2	dSph	4 3	12,7	-11,8	-188	680	129	-29
M 33 (NGC 598)	01 33 51	+30 29,6	Sc	62 39	5,9	-18,9	-181	795	134	-31
Phoenix	01 51 06	-44 26,7	dIr	5 4	13,1	-9,8	+60	395	272	-69
Fornax	02 39 53	-34 30,3	dSph	20 14	7,3	-13,1	+53	138	237	-66
LMC	05 19 36	-69 27,1	Ir	650 550	0,4	-18,5	+275	50	280	-33
Carina	06 41 37	-50 58,0	dSph	23 16	10,6	-9,4	+230	100	260	-22
Ursa Major II	08 51 30	+63 07,8	dSph	28 14	14,3	-4,2	+116	30	152	+37
Leo A (Leo III)	09 59 23	+30 44,7	Ir	5 3	12,7	-11,5	+24	690	197	+52
Segue 1	10 07 04	+16 04,9	dSph	8,8	13,8	-2	+206	23	220	+50
Leo I (Regulus)	10 08 27	+12 18,5	dSph	11 8	10,2	-11,9	+287	250	226	+49
Sextans	10 13 03	-01 36,9	dSph	30 12	12,0	-8,5	+224	90	244	+42
Ursa Major I	10 34 53	+51 55,2	dSph	20	13,2	-6,8		100	159	+54
Leo B (Leo II)	11 13 27	+22 09,7	dSph	15 13	11,6	-10,1	+76	210	220	+67
Ursa Minor (DDO 199)	15 08 49	+67 06,6	dSph	27 16	10,6	-8,5	-247	63	105	+45
Draco (DDO 208)	17 20 19	+57 55,1	dSph	34 19	11,0	-8,6	-293	79	086	+35
Галактика (Мл. Путь)	17 45 40	-29 00,5	Sbc	—	—	-20,9	+16	8	000	00
Sagittarius (SagDEG)	18 55 04	-30 28,7	dSph	450 216	4,5	-13,8	+140	20	006	-14
SagDIG	19 29 59	-17 40,7	Ir	3 2	14,2	-10,7	-79	1 040	021	-16
NGC 6822	19 44 56	-14 48,1	Ir	10	8,5	-16,0	-56	500	025	-18
Aquarius (DDO 210)	20 46 53	-12 51,0	Ir	2 1	13,9	-11,3	-141	950	034	-31
Tucana	22 41 49	-64 25,4	dSph	3 1	15,2	-9,6	+130	980	323	-47
Cassiopeia (And VII)	23 26 31	+50 41,5	dSph	3 2	15,2	-9,5	-307	790	110	-10
Pegasus (DDO 216)	23 28 34	+14 44,8	Ir	5 3	13,2	-12,3	-182	920	095	-44
Pegasus II (And VI)	23 51 39	+24 35,7	dSph	4 2	14,1	-10,6	-354	820	106	-36

9. Яркие галактики

Таблица составлена на основе «Каталога ярких галактик» Х. Шепли и А. Эймс. Приведены данные о 17 наиболее ярких галактиках, до 9^m , доступных наблюдению в обычный бинокль. Большинство среди них — спиральные системы, но есть и эллиптические, и даже неправильные. Самые яркие из них относятся к Местной группе галактик, в которую входит и наша звездная система (см. прилож. 8).

В первом столбце указан номер галактики по «Новому общему каталогу» (NGC), а во втором столбце — по каталогу Мессье (M), если они там есть. Во втором столбце встречаются также аббревиатуры, не относящиеся к каталогу Мессье: это ММО — Малое Магелланово Облако, БМО — Большое Магелланово Облако и Сеп А — радиогалактика Кентавр А. В третьем столбце указан морфологический тип галактики: S — спиральная, E — эллиптическая, I — неправильная, S0 — линзовидная, SB — пересеченная спиральная. Дополнительные маленькие буквы указывают подтип (a, b, c), схожесть с Магеллановыми Облаками (m) или необычность, пекулярность системы (p).

У спутника галактики Андромеды (M31) — небольшой эллипсовидной системы NGC 205 — морфологический тип неопределенный: она похожа и на линзовидную галактику и на сильно сжатую эллиптическую систему. А галактика NGC 5128 вообще не поддается классификации, поскольку является конгломератом двух слившихся систем — эллиптической и спиральной (или неправильной).

Галактика		Тип	Координаты (2000.0)		Расстояние		Видимые параметры		Истинные параметры	
NGC	M				Мпк	млн св. лет	угловой размер	звезд. величи- на, m_B	диаметр, тыс. св. лет	свети- мость, $10^9 L_\odot$
55	—	Sc	00 ^h 15 ^m 08 ^s	−39°13,2	3,1	10,1	25 3	8,2	73	9
205	110	S0/E5p	00 40 23	+41 41,3	0,73	2,4	8 3	8,8	6	0,3
221	32	E2	00 42 41	+40 51,9	0,73	2,4	3 3	9,0	2	0,2
224	31	Sb	00 42 45	+41 16,5	0,73	2,4	160 40	4,4	110	23
253	—	Sc	00 47 36	−25 17,4	4,2	13,7	22 6	8,1	88	18
—	ММО	Im	00 52 38	−72 48,0	0,06	0,20	216 216	2,8	13	0,5
300	—	Sc	00 54 53	−37 41,2	2,4	7,8	20 10	8,7	45	3
598	33	Sc	01 33 53	+30 39,2	0,67	2,2	60 40	6,3	38	2
—	БМО	SBm	05 23 36	−69 45,4	0,05	0,16	432 432	0,6	22	3
2403	—	Sc	07 36 54	+65 35,9	3,6	11,7	16 10	8,9	54	6
3031	81	Sb	09 55 34	+69 04,1	3,6	11,7	16 10	7,9	54	16
4258	106	Sb	12 18 57	+47 18,4	10,0	32,6	20 6	9,0	190	44
4736	94	Sab	12 50 54	+41 07,1	6,9	22,5	5 4	8,9	33	23
5128	Cen A	Ep?	13 25 29	−43 01,0	6,9	22,5	10 3	7,9	65	57
5194	51	Sbc	13 29 53	+47 11,9	11,0	35,9	12 6	8,6	125	76
5236	83	SBc	13 37 00	−29 52,0	6,9	22,5	10 8	8,5	65	33
5457	101	Sc	14 03 13	+54 21,0	7,6	24,8	22 22	8,2	160	53

10. Нобелевские премии по физике (астрофизические исследования)

Год	Лауреаты	За что присуждена премия
1936	В. Ф. Гесс (Австрия)	За открытие космических лучей
1967	Г. Бете (США)	За вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, касающиеся источников энергии звёзд
1970	Х. Альфвен (Швеция)	За открытия в магнитогидродинамике и их применение в различных разделах физики плазмы
1974	М. Райл (Великобритания)	За пионерские исследования в радиоастрофизике, в том числе за метод апертурного синтеза
	Э. Хьюиш (Великобритания)	За определяющую роль в открытии пульсаров
1978	А. Пензиас, Р. Вилсон (США)	За открытие космического микроволнового фонового излучения
1983	С. Чандрасекар (США)	За физические исследования структуры и эволюции звезд
	У. Фаулер (США)	За исследования ядерных реакций, отвечающих за формирование химических элементов во Вселенной
1993	Р. Халс, Дж. Тейлор (США)	За открытие нового типа пульсара, давшее новые возможности для исследования гравитации
2002	Р. Дэвис (США), М. Кошиба (Япония)	За работы по астрофизике, в частности, за обнаружение космических нейтрино
	Р. Джиаккони (США)	За изыскания в области астрофизики, которые привели к открытию космических источников рентгеновского излучения
2006	Дж. Мазер, Дж. Смут (США)	За открытие анизотропии и чернотельной формы спектра космического фонового излучения
2011	С. Перлмуттер (США), Б. Шмидт (США и Австралия), А. Рисс (США)	За открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения далеких сверхновых

Ad astra!

Астрономия — древнейшая из наук. Еще до начала Новой эры у астрономии были грандиозные достижения, а появление телескопа в XVII в. во много раз ускорило ее прогресс. И всё же прошедший XX век означал для астрономии нечто большее, чем очередные сто лет. Как и все естественные науки, астрономия за последнее столетие испытала гигантский количественный и качественный рост. Именно в XX в. мы поняли физическую природу звезд и разгадали тайну их рождения, открыли мир галактик и почти полностью восстановили историю Вселенной. За последние полвека автоматические зонды посетили соседние планеты и малые тела Солнечной системы, а новые телескопы позволили обнаружить планетные системы у других звезд, открыть удивительные объекты — нейтронные звезды и черные дыры, заметить существование темной материи и темной энергии. Как видим, астрономия — хотя и древнейшая, но очень динамичная наука. Быстро совершенствуются ее приборы, стремительно раздвигаются границы изученной части Вселенной, постоянно обнаруживаются новые типы астрономических объектов. Такое фантастическое расширение горизонта познания, какое мы имели за последние десятилетия, думаю, уже не повторится никогда! Впрочем, скорее всего, я ошибаюсь: «никогда не говори „никогда“».

Авторы

АВЕДИСОВА Вета Сергеевна, научный сотрудник Института астрономии РАН.

ВИБЕ Дмитрий Зигфридович, доктор физико-математических наук, зав. отделом физики и эволюции звезд Института астрономии РАН.

ДБЯЧЕНКО Антон Иванович, математик, любитель астрономии, сотрудник публикаторского отдела Центра-музея им. Н. К. Рериха, г. Москва.

ЗАСОВ Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ, зав. отделом внегалактической астрономии Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга, МГУ.

КОМБЕРГ Борис Валентинович, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией теоретического отдела Астро-космического центра ФИАН.

ОРЛОВ Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет.

ОСИПКОВ Леонид Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет.

РЕПИН Сергей Викторович, научный сотрудник отдела космической плазмы Института космических исследований РАН.

РУБИНОВ Алексей Вадимович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета.

СИЛЬЧЕНКО Ольга Касьяновна, доктор физико-математических наук, зав. отделом эмиссионных звезд и галактик Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга, МГУ.

СУРДИН Владимир Георгиевич, кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета МГУ, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга, МГУ.

Содержание

Предисловие	3
Глава 1. Звезды, галактики, Вселенная	8
1.1. Всё не так.	8
1.2. Масштабы, которые мы постигаем.	10
1.3. Прошлое и будущее нашего мира.	12
1.4. Небо, которое мы наблюдаем.	16
1.5. Телескопы и галактики.	24
1.6. Объем звезд в объеме Вселенной.	31
Глава 2. Проблема трех тел — банальная и загадочная	38
2.1. Два плюс один.	38
2.2. От теории к наблюдениям.	43
Глава 3. Динамика системы звезд	47
3.1. Движение Солнца.	47
3.2. Остаточные скорости. Распределение скоростей.	51
3.3. Двойные системы.	55
3.4. Орбиты в тройных системах.	58
3.5. Регулярные и иррегулярные силы.	63
3.6. Плоские звездные орбиты.	68
3.7. Пространственные орбиты звезд.	72
3.8. Теорема вириала.	75
3.9. Время релаксации.	79
3.10. Бесстолкновительная релаксация.	83
3.11. Динамическое трение.	85
3.12. Испарение звезд из скоплений.	86
3.13. Особенности «звездного газа».	89
3.14. Равновесие звездных систем.	93
3.15. Об устойчивости звездных систем.	98
3.15.1. Гравитационная неустойчивость.	99
3.15.2. Устойчивость сферических звездных систем.	102
3.15.3. Неустойчивости в моделях сплюснутых галактик.	103
3.16. О спиральной структуре галактик.	108
Глава 4. Галактика и ее окрестности	116
4.1. Галактическое краеведение.	118
4.2. Новая космография.	119

4.3. Вокруг Галактики.	126
4.4. Положение Солнца в Галактике.	129
4.5. Вокруг Солнца	133
4.6. Пояс Гулда	135
4.7. На границе Солнечной системы.	141
4.8. Галактическая экология	147
Глава 5. Движущиеся группы звезд.	150
5.1. Звезда-скалоход.	150
5.2. Летящие группы Эггена	152
5.3. Поток Плеяд и Местная Труба.	158
5.4. Поток Сириуса	165
5.5. «Звездные реки».	166
5.6. Поток Арктюра	167
Глава 6. Спиральная структура нашей галактики	172
6.1. Млечный Путь — спиральная галактика.	172
6.2. Определение расстояний в Галактике.	177
6.2.1. Тригонометрический метод.	177
6.2.2. Фотометрический метод	178
6.2.3. Кинематический метод.	181
6.3. Кривая вращения Галактики	182
6.3.1. Профили линии 21 см	182
6.3.2. Определение R_0 и θ_0	184
6.3.4. Вращение Галактики	187
6.4. Спиральные ветви Галактики.	194
6.5. Теория спиральной структуры.	202
Глава 7. Галактики: классификация, структура, население.	208
7.1. Морфологическая классификация.	209
7.1.1. Классификация по Хаббл	215
7.1.2. Классификация по Моргану (Йеркская система)	220
7.1.3. Классификация по Вокулёру	221
7.1.4. Классификация по ван ден Бергу (система DDO).	224
7.1.5. Развитие классификации галактик.	226
7.1.6. Особые типы галактик	228
7.2. Оценка расстояний до галактик.	233
7.3. Состав галактик	234
7.3.1. Звезды	238
7.3.2. Межзвездная среда	242
7.3.3. Звездообразование в галактиках	248

7.4. Звездные скопления	253
7.4.1. Симметрия формы и симметрия эволюции	253
7.4.2. Многообразие звездных систем	254
7.4.3. Рождение и молодость звездных коллективов	261
7.4.4. Механизмы эволюции взрослых скоплений	266
7.4.5. Поиск звездных скоплений	273
7.5. Кинематика галактик	277
7.5.1. Вращение галактик	278
7.5.2. Гиперскоростные звезды	283
7.6. Темная материя	286
7.6.1. Загадочная субстанция	286
7.6.2. Темная материя в окрестности Солнца	288
7.6.3. Темная материя в гало Галактики	292
7.6.4. Темная материя в скоплениях галактик	297
7.6.5. Темная материя и крупномасштабная структура Вселенной	298
7.6.6. Темная материя и теория происхождения галактик	302
7.6.7. Поиск невидимой массы	303
7.7. Метаморфоз галактик	305
Глава 8. Эволюция галактик	311
8.1. Два подхода к изучению эволюции галактик	311
8.2. Морфологическая схема или историческая последовательность? Эволюция взглядов на эволюцию	313
8.3. Механизмы эволюции галактик	319
8.3.1. Протогалактический коллапс	321
8.3.2. Внутренняя вековая эволюция	323
8.3.3. Внешняя вековая эволюция	325
8.3.4. Внешняя быстрая (бурная) эволюция	328
8.3.5. Микроэволюция: звездообразование	332
8.3.6. Микроэволюция: изменение химического состава	335
8.4. Спектрофотометрическая эволюция звездных систем	341
8.5. Последние данные и свежие идеи	347
8.5.1. Карликовые неправильные и сфероидальные галактики	347
8.5.2. Эллиптические галактики	352
8.4.3. Дисковые галактики	354
Глава 9. Активные ядра галактик и квазары	362
9.1. Первые 10 лет эры квазаров	361
9.1.1. До квазаров	361
9.1.2. Открытие квазаров и их свойства	363
9.1.3. Первые модели квазаров	369
9.2. Квазары: 50 лет спустя	373

9.2.1. Немного статистики	373
9.2.2. Радиогромкие и радиотихие квазары	377
9.2.3. Эмиссионные линии в спектрах квазаров	384
9.3. Квазары как инструмент для изучения Метагалактики	386
9.3.1. Линии поглощения в спектрах квазаров	387
9.3.2. Гравитационное линзирование квазаров	391
9.4. Оценка масс компактных объектов в ядрах галактик	396
9.5. Загадка квазаров еще не решена	405
Приложения	409
1. Каталог Мессье	409
2. Каталог Колдвелла	413
3. Звездные ассоциации	416
4. Яркие рассеянные скопления Галактики	418
5. Яркие шаровые скопления Галактики	419
6. Яркие диффузные туманности	421
7. Звездное население Галактики	422
8. Местная группа галактик	422
9. Яркие галактики	424
10. Нобелевские премии по физике (астрофизические исследования)	425
Ad astra!	426
Авторы	427

*АВЕДИСОВА Вета Сергеевна
ВИБЕ Дмитрий Зигфридович
ДЬЯЧЕНКО Антон Иванович
ЗАСОВ Анатолий Владимирович
КОМБЕРГ Борис Валентинович
ОРЛОВ Виктор Владимирович
ОСИПКОВ Леонид Петрович
РЕПИН Сергей Викторович
РУБИНОВ Алексей Вадимович
СИЛЬЧЕНКО Ольга Касьяновна
СУРДИН Владимир Георгиевич*

ГАЛАКТИКИ

Редактор-составитель *В. Г. Сурдин*
Оригинал-макет и оформление: *Н. Л. Васильева*

Подписано в печать 5.02.2013. Формат 60 90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 27. Уч.-изд. л. 28,35. Тираж 1500 экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
<http://www.fml.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства
в ООО «Чебоксарская типография № 1»
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15



Галактика NGC 1232 в созвездии Эридан, удаленная от нас на 100 млн св. лет. На фото заметно характерное свойство всех спиральных галактик — голубизна рукавов и желтовато-оранжевый цвет центральной области. В спиральных рукавах сосредоточены молодые звезды, среди которых много массивных горячих светил, придающих рукавам голубой оттенок. В центральной части галактики преобладают старые маломассивные звезды желтовато-оранжевого цвета. Четкий спиральный узор на диске виден только в том случае, если галактика ориентирована к нам плашмя. Но и при этом не всегда можно с уверенностью сказать, где начинается конкретный рукав и где он заканчивается. Фото: Европейская южная обсерватория.

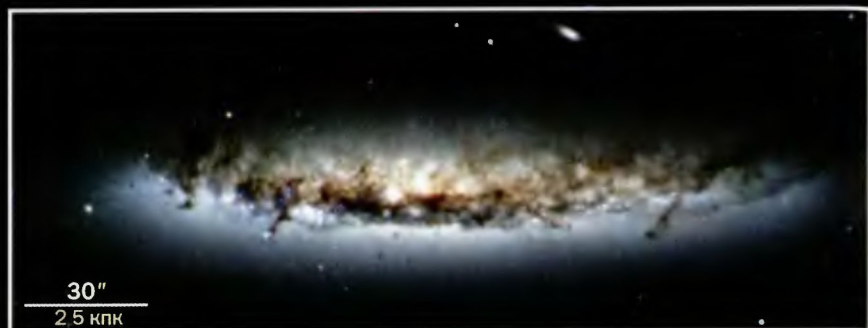
Галактика NGC 891 и Млечный Путь



Наблюдаемая с ребра дисковая галактика NGC 891 (вверху) выглядит как далекий Млечный Путь (внизу), который тоже демонстрирует нам Галактику «с ребра».
Фото галактики NGC 891: Bob Franke. Фото Млечного Пути: Serge Brunier.



Спиральная галактика NGC 6744, похожая на гигантский птичий глаз, находится в южном созвездии Павлин на расстоянии около 30 млн световых лет от нас. Судя по тому, что мы знаем сегодня о нашей Галактике, со стороны она должна выглядеть примерно так же. У NGC 6744 тоже есть относительно небольшой центральный бар и такая же клочковатая спиральная структура, какая вырисовывается у нашей звездной системы, и даже спутник NGC 6744A, заметный в верхнем правом углу снимка, напоминает Магеллановы Облака. Правда, по размеру NGC 6744 почти вдвое больше нашей галактики. Фото: 2,2-метровый телескоп MPG/ESO, обсерватория Ла-Силья (Чили).



Галактика NGC 4402, наблюдаемая недалеко от центра скопления Virgo и испытывающая динамический напор межгалактического газа.

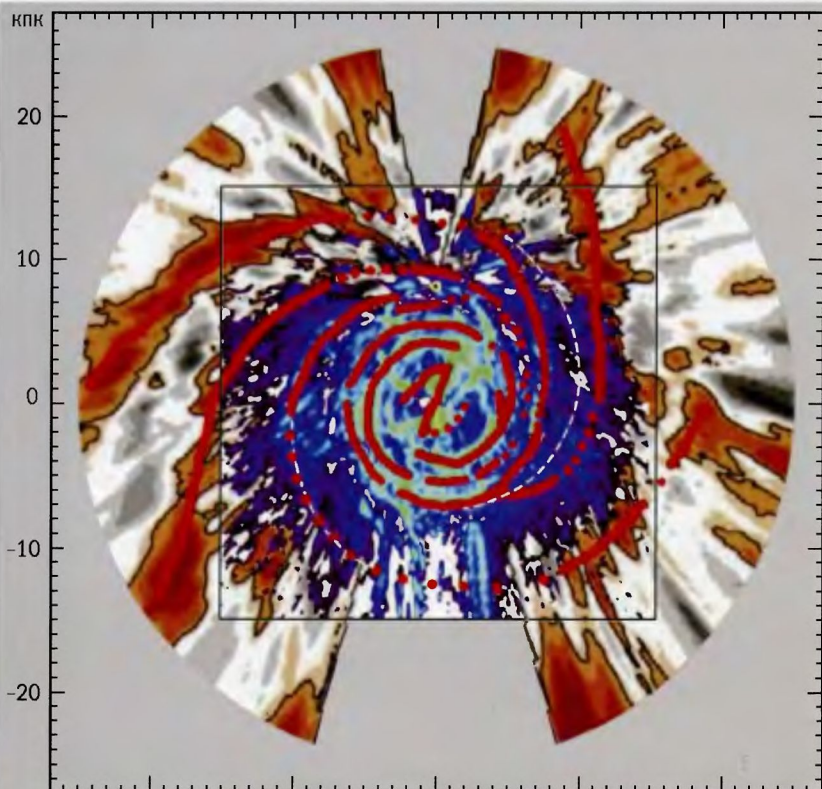


Область звездообразования W5 (IC 1848), удаленную от нас на 2 кпк в направлении созвездия Кассиопея, запечатлел космический инфракрасный телескоп «Спитцер» (NASA, ESA). Излучение и мощные потоки звездного ветра от молодых светил раздули в центре облака огромную каверну, в плотных стенках которой формируется новое поколение звезд.

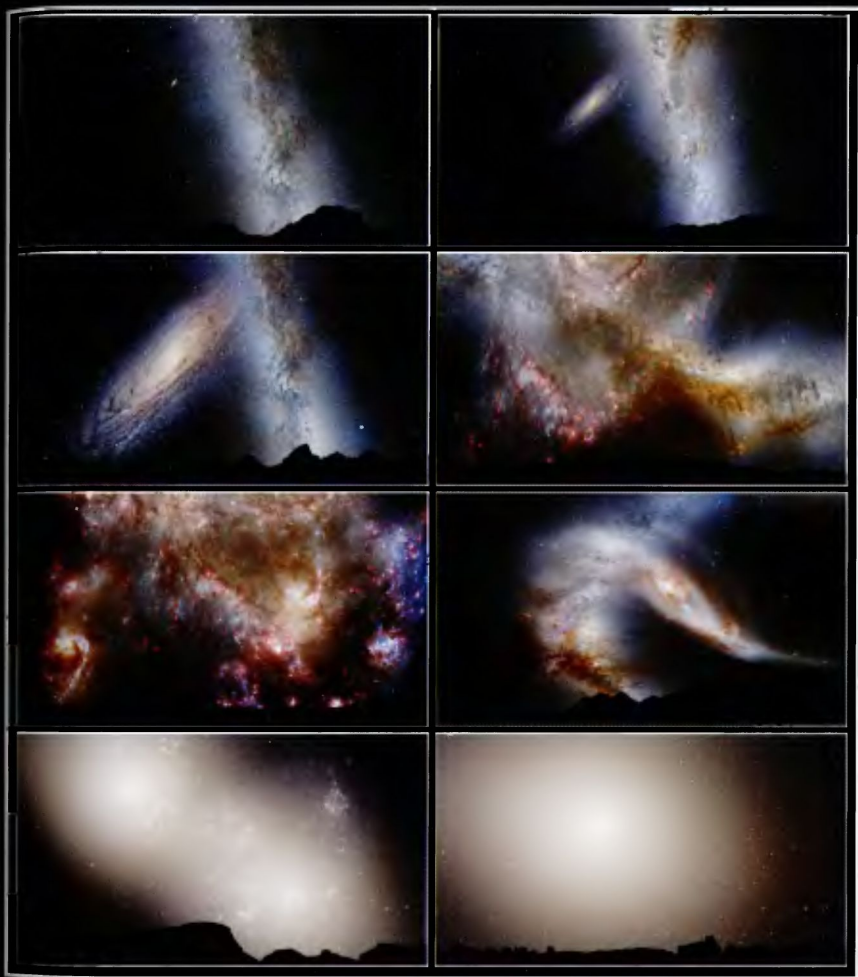


Яркость ночного неба легко оценить в горах, где нет других источников света. Обратите внимание: видны не только силуэты гор, но и их поверхность, освещенная ночным безлунным небом. Фото: О. С. Бартунов (ГАИШ МГУ).

Спиральные рукава Галактики

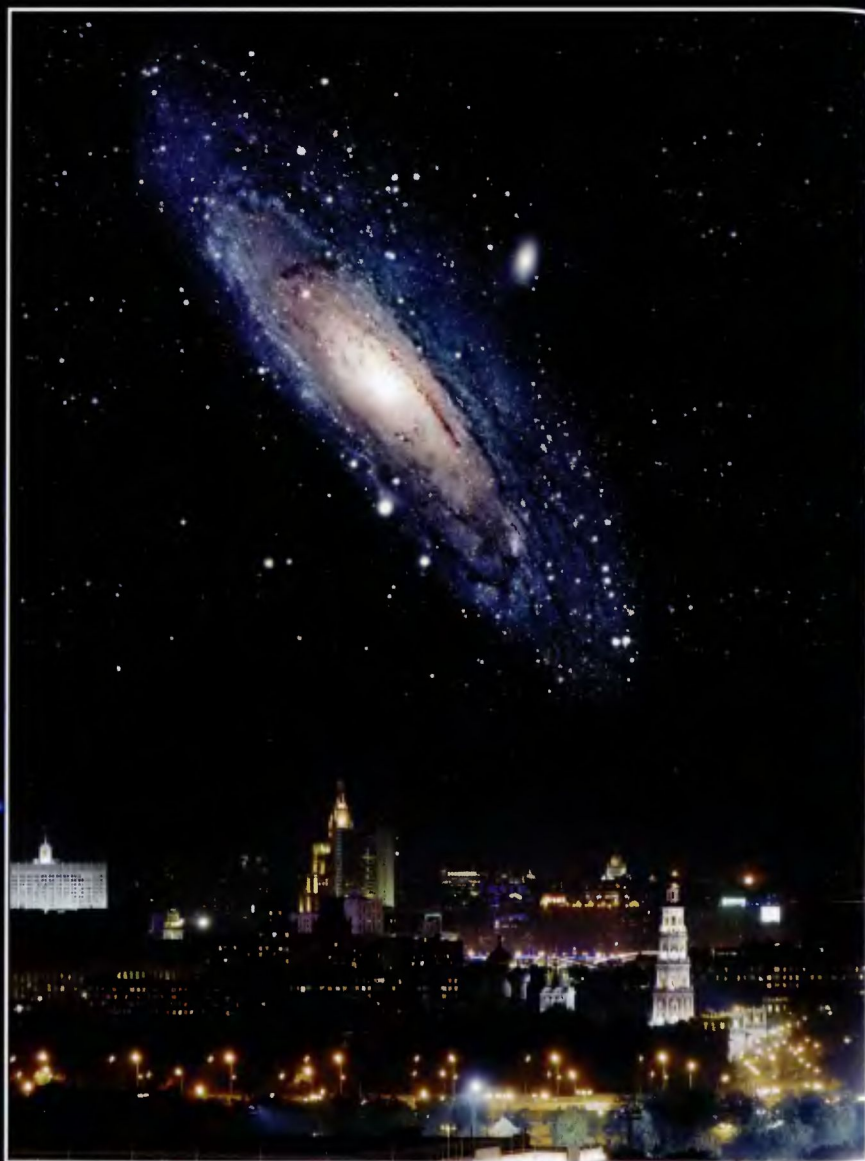


Спиральный узор Галактики, полученный Мартином Полом с коллегами (Pohl и др., 2008; см. раздел 6.4 на с. 202 нашей книги). Создав численную гидродинамическую модель Галактики с баром, они рассчитали параметры гравитационного поля и вычислили расстояния до облаков молекулярного газа во внутренней части Галактики с учетом их некругового движения. На этой карте молекулярный газ показан сине-зеленым цветом, а красным и серым тонами показано распределение нейтрального водорода во внешней части Галактики по данным Levine и др. (2006). Красными линиями наложен узор спиральных рукавов. Во внутренней части Галактики видны 4 симметричных рукава: от концов бара отходят «ближний» и «3-килопарсековый», заканчиваясь у круга коротации. А с расстояния около 4 кпк на продолжении большой оси бара отходят два других рукава, пересекают круг коротации, разветвляются на расстоянии около 7 кпк и в виде четырех рукавов тянутся до расстояния около 20 кпк от центра.



Этапы столкновения и слияния Галактики и Туманности Андромеды в представлении астрономов NASA и ESA. Это интересное событие может произойти примерно через 4 млрд лет. А может и не произойти...

Галактика Андромеды на земном небе через 4 млрд лет

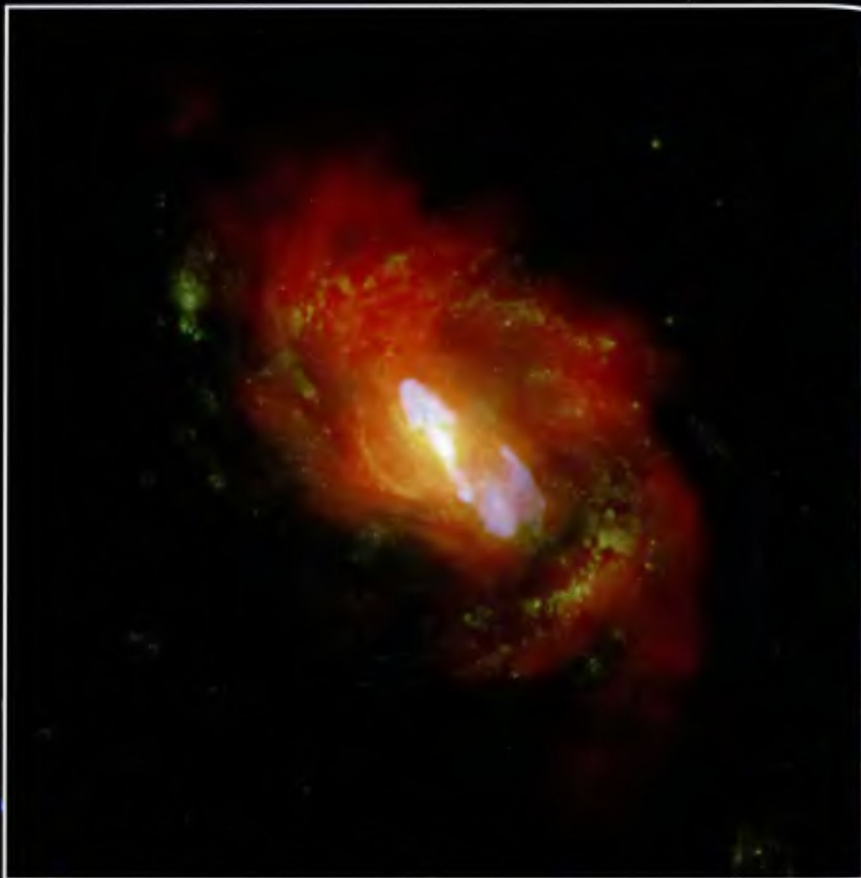


Через несколько миллиардов лет, когда галактика Андромеды приблизится к нам, наблюдать ее станет значительно удобнее, чем сейчас.



Звездное скопление M13, известное любителям астрономии как Большое шаровое скопление в Геркулесе, удалено от нас на 25 000 световых лет и, тем не менее, его без труда можно увидеть в бинокль. В этом скоплении, имеющем диаметр около 45 пк, сосредоточены сотни тысяч звезд менее массивных, чем Солнце, и существенно более старых. В центре скопления они упакованы очень плотно: в одном кубическом парсеке там тысячи звезд, тогда как в окрестности Солнца на объем в несколько кубических парсеков в среднем приходится одна звезда. Это изображение получено с использованием нескольких цифровых и фотографических снимков для лучшей проработки как внешних, так и внутренних областей скопления. Фото: Noel Carboni, Digitized Sky Survey, Palomar Observatory.

Сейфертовская галактика NGC 1068



Одна из ближайших сейфертовских галактик NGC 1068. Это синтетическое изображение получено космическим телескопом «Хаббл» в оптическом диапазоне (зеленый цвет), рентгеновской обсерваторией «Чандра» (красный) и радиоинтерферометром VLA (голубой). Потоки газа вырываются из ядра галактики со скоростью около 400 км/с. Частично газ падает обратно и поглощается сверхмассивной черной дырой в центре ядра, другая его часть покидает ядро.

Спиральная структура галактики видна в рентгеновском и оптическом диапазонах, а джет — в радиодиапазоне.

Галактика NGC 1068 находится примерно в 50 млн св. лет от нас, черная дыра в ее центре примерно вдвое массивнее, чем подобная черная дыра в центре нашей галактики.

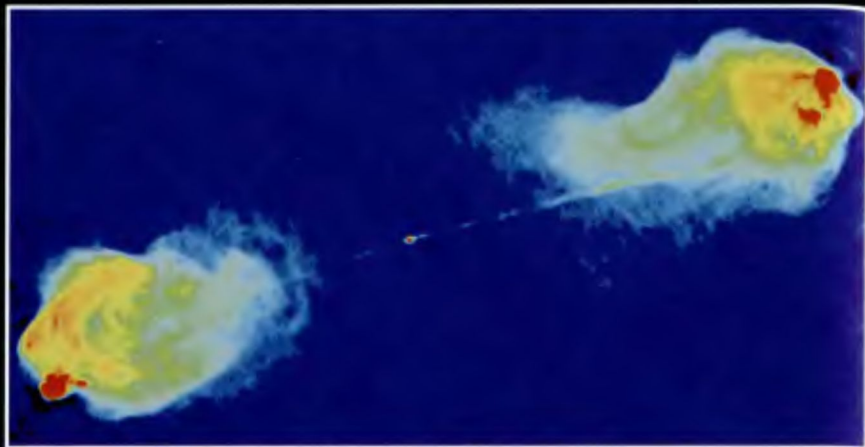


Радиогалактика Печь А (Fornax A) с двумя протяженными компонентами размером ≈ 200 кпк каждый. Радиоснимок (вверху) получен системой VLA на волне 20 см и наложен на оптический снимок этой же области. В центре — гигантская эллиптическая галактика NGC 1316, недавно поглотившая менее крупного соседа. Его вещество, частично захваченное центральной черной дырой, стало «топливом» для активного ядра галактики и источником энергии протяженных радиокомпонентов. Энергию к ним переносят два радиоджета, выходящие из ядра в сторону каждого из радиолучей; они слабо различимы в центре оптической галактики. Радио: NRAO. Оптика: STScI/POSS-II. Комбинация изображений: J. M. Uson.



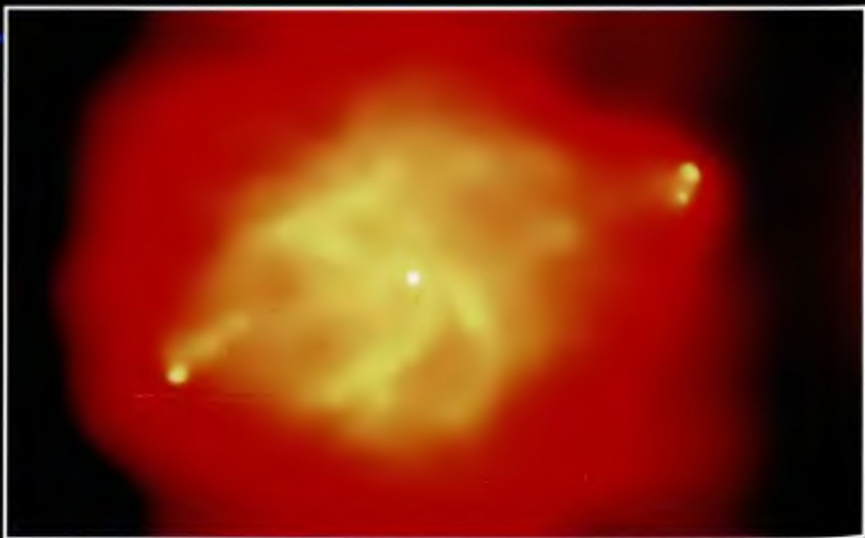
Оптическое изображение эллиптической галактики NGC 1316, находящейся в центре радиоисточника Печь А, получено космическим телескопом «Хаббл».

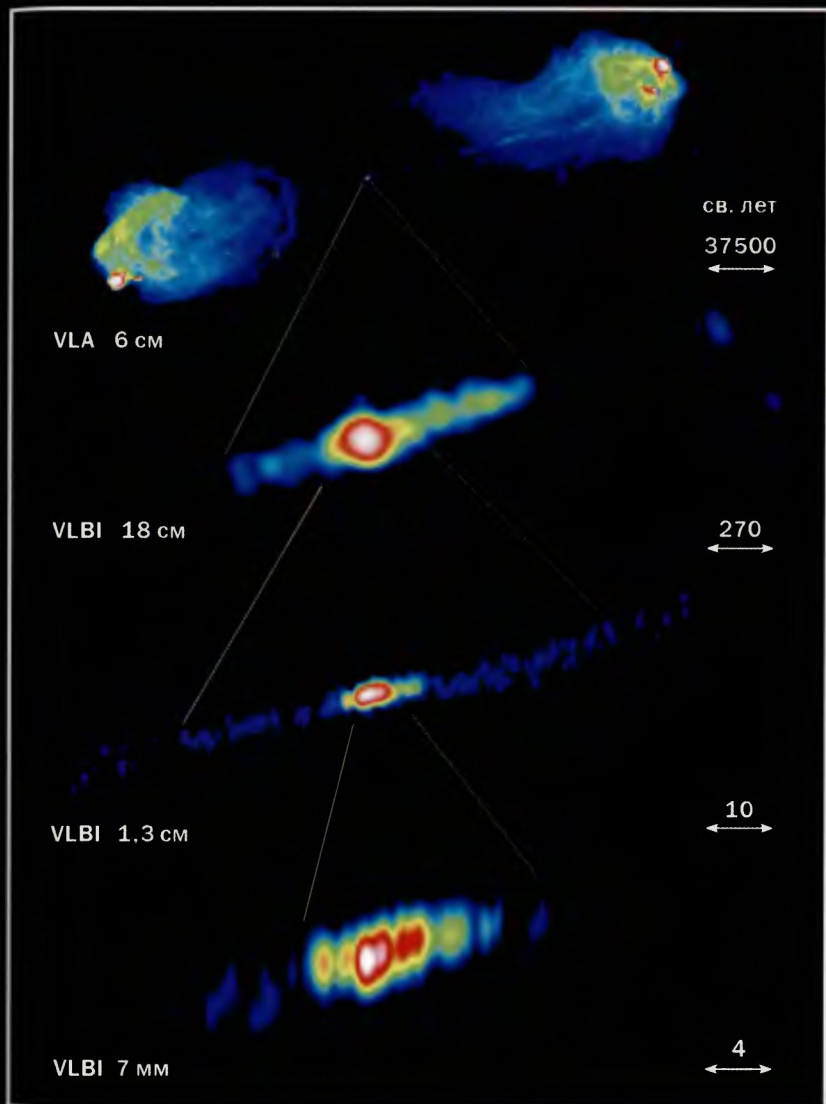
Радиогалактика Лебедь А



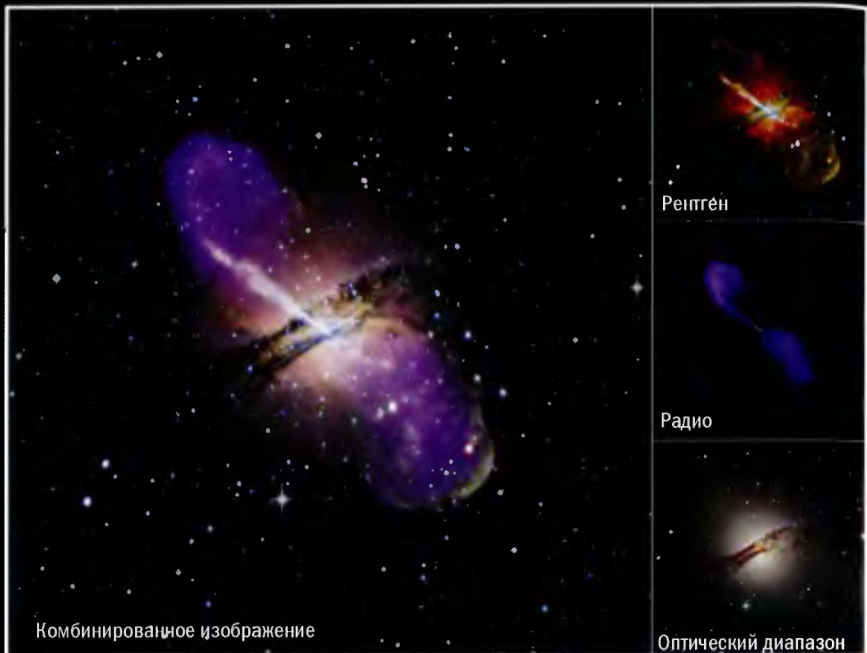
Вверху: радиогалактика Лебедь А (Cygnus A, 3C 405), удаленная от нас на 230 Мпк ($z = 0,057$). Снимок получен в 1983 г. системой VLA (NRAO) на волне 6 см с угловым разрешением $0,5''$. Угловой размер показанной области — $2,3' \times 1,3'$. Видны выходящие из ядра узкие джеты и протяженные компоненты (пузыри) с горячими пятнами на внешних краях. Расстояние между пятнами — около 120 кпк. Цвета искусственные: самые «горячие» области показаны красным, самые «холодные» — голубым.

Внизу: рентгеновское изображение галактики Лебедь А, полученное обсерваторией «Чандра» в 2000 г. с экспозицией 9 часов. Угловой размер области $3,3' \times 2'$.





Лебедь А — самый яркий внегалактический источник радиоизлучения. Показаны его изображения, полученные Большой антенной решеткой (VLA) и интерферометром со сверхдлинными базами (VLBI) на указанных длинах волн. Угловая протяженность верхнего изображения около $2'$, что соответствует примерно 120 кпк. Krichbaum T. P. et al., 1998.



Глубокий оптический снимок галактики NGC 5128, полученный 3,6-метровым телескопом CFHT (Канадо-франко-гавайский телескоп на обсерватории Мауна-Кеа, о. Гавайи).

Вверху: изображение галактики NGC 5128, совпадающей с радиоисточником Кентавр А (Сеп А), полученное совмещением трех снимков (справа), выполненных в разных диапазонах спектра. Оптическое фото сделано Камерой широкого поля 2,2-метрового телескопа в Ла-Силья (Чили, ESO/MPG), радиоизображение получено системой апертурного синтеза VLA, рентгеновское передано с орбитальной обсерватории «Чандра» (NASA). Искривление внешних частей радиоизлучающих областей указывает на изменение направления (прецессию) струйных выбросов (джетов).



Великолепное «произведение искусства», созданное гравитацией, — результат взаимодействия двух галактик. В «Каталоге пекулярных галактик» Х. Арпа эта пара помещена под номером 273, а в «Общем каталоге галактик» Упсальской обсерватории (Швеция) обозначена как UGC 1810. Эти почти слившиеся звездные системы удалены от нас на 300 млн св. лет, а расстояние между их центрами — всего около 30 кпк. Не исключено, что такой же эпизод эволюции ожидает и пару галактик «Млечный Путь — Туманность Андромеды». Фото: космический телескоп «Хаббл».



Гигантские звездные потоки, протянувшиеся более чем на 50 кпк и заметные только при очень глубокой экспозиции, окружают развернутую к нам ребром спиральную галактику NGC 5907 (она же «Щепка» и «Лезвие ножа»), находящуюся на расстоянии 40 млн св. лет в созвездии Дракон. Вероятно, эти потоки — след небольшой галактики, который она оставила, двигаясь вокруг NGC 5907 и постепенно разрушаясь под влиянием гравитационного приливного эффекта, пока около 4 млрд лет назад не произошло их слияние. Фото: R. Jay Gabany и др.