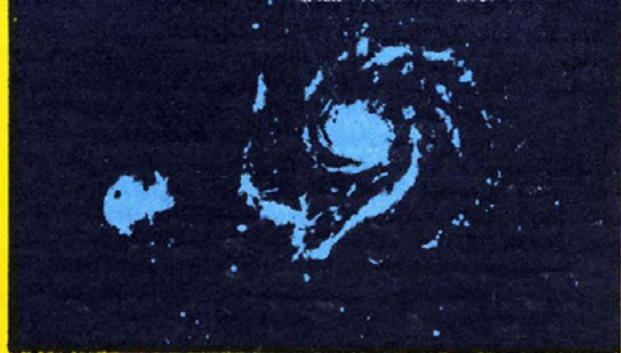




Т. А. АГЕКЯН

ЗВЕЗДЫ ГАЛАКТИКИ МЕТАГАЛАКТИКА

Т. А. АГЕКЯН

ЗВЕЗДЫ ГАЛАКТИКИ МЕТАГАЛАКТИКА

**ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ**



**МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1981**

523.8

А 23

УДК 523.855

Агекян Т. А.

- А23 Звезды, галактики, Метагалактика.— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981, 416 с.— В пер.: 80 коп.

Популярный рассказ о звездных системах — галактиках, о строении видимой части Вселенной. Читатель получит достаточно полное представление о методах исследования галактик и о результатах, достигнутых этими методами. Автор рассказывает о строении галактик, о содержащихся в них звездах и туманностях, о квазарах и других объектах. Автор сопоставляет различные точки зрения, анализируя преимущества и слабые стороны каждой из них. Книга переработана с учетом последних достижений астрономии. Написана живо и увлекательно, хорошо иллюстрирована.

Для широкого круга читателей.

А $\frac{20605-097}{053(02)-81}$ 183-81. 1705060000

ББК 523.8
527

А $\frac{20605-097}{053(02)-81}$ 183-81. 1705060000

© Издательство «Наука»,
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1981,
с изменениями

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию	6
Предисловие ко второму изданию	6
Введение	7
Глава I. Солнце и звезды	9
Определение расстояний до звезд	11
Видимые звездные величины	14
Светимости и абсолютные звездные величины	17
Определение звездной плотности в окрестности Солнца	20
Спектры звезд	22
Почему спектры звезд различны?	25
Цвет звезд	29
Зависимость между массой звезды и ее светимостью	31
Определение основных физических характеристик звезд по ее спектральному классу и абсолютной величине	32
Переменные звезды	34
Новые и сверхновые звезды	38
Диаграмма состава звездного населения	41
Собственные движения и лучевые скорости звезд	45
Глава II. Галактика	48
Как была открыта Галактика	48
Форма Галактики	49
Газовая материя в Галактике	50
Вращение Галактики	55
Пылевая материя в Галактике	59
Ядро Галактики	62
Двойные и кратные звезды	64
Рассеянные и шаровые звездные скопления	67
Молодые образования Галактики — звездные ассоциации	75
Подсистемы Галактики	77
Спиральные ветви Галактики	79
Гипотеза формирования звезд из газа	82
Гипотеза образования звезд из сверхплотного вещества	88
Глава III. Галактики	91
История открытия других звездных систем	91
Эллиптические галактики	94
Спиральные галактики	99

Спиральные галактики с перемычкой	109
Чечевицеобразные галактики	110
Неправильные галактики	114
Иглообразные галактики	118
Видимые звездные величины и светимости галактик	121
Два типа населения в звездных системах	125
Спектры галактик	127
Последовательность типов галактик	129
Местная система галактик	130
Магеллановы Облака	135
Туманность Андромеды (NGC 224)	144
Некоторые интересные галактики	148
Вращение галактик	162
Вопрос о направлении вращения спиральных галактик	167
Определение масс галактик	170
Вспышки сверхновых звезд в галактиках	175
Ядра и ядрышки галактик	179
Грандиозный взрыв в ядре галактики NGC 3034	182
Проблема происхождения спиральных ветвей галактик	186
Взаимодействующие галактики	193
 Глава IV. Метагалактика	 202
Представление о Метагалактике	202
Распределение галактик на небе	203
Общий характер распределения галактик в пространстве	208
Коллекционирование галактик	211
Группы галактик и скопления галактик	212
Скопление галактик в Деве	220
Скопление галактик в Волосах Вероники	220
Закон всеобщего разбегания галактик	225
Построение шкалы внегалактических расстояний	234
Пересмотр шкалы внегалактических расстояний	238
Сверхсистема галактик	242
Расширение Вселенной. Модель Вселенной	244
 Глава V. Радиоисследования галактик	 250
Вопрос о прозрачности земной атмосферы	250
Космическое радиоизлучение	252
Дискретные источники радиоизлучения	255
Отождествление дискретных источников радиоизлучения с оптически наблюдаемыми объектами	256
Нормальные галактики	260
Радиогалактики	260
Наблюдение радиопищи нейтрального водорода в других галактиках	269
Удивительные объекты Вселенной — квазары	271
Звездоподобные галактики	286
Новые удивительные объекты — пульсары	288
Загадочные «черные дыры»	297
Фоновое реликтовое излучение	301
Дискретные источники рентгеновских лучей	303
Инфракрасные объекты	307

Глава VI. Элементы динамики звездных систем	312
Динамика двойных звезд и двойных галактик	314
Двойные галактики	320
Тройные звезды и тройные галактики	328
Тесные группы галактик	342
Устойчивость скоплений галактик	351
Регулярные и нерегулярные силы в звездных системах	354
Понятие стационарности и нестационарности	359
Стационарность и нестационарность звездных систем	361
Диссипация звездных систем	369
Звездные системы на разных стадиях эволюции	377
 Глава VII. Жизнь во Вселенной	 379
Возможны ли полеты человека к другим звездам и другим галактикам?	379
Насколько распространены во Вселенной условия, благоприятные для возникновения жизни?	389
Всегда ли при наличии благоприятных условий возникает жизнь?	398
Распространена ли во Вселенной разумная жизнь?	403

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Прошедшие после второго издания книги «Звезды, галактики, Метагалактика» десять лет ознаменовались новыми крупными успехами звездной и внегалактической астрономии. Они нашли отражение в подготовленном новом издании этой книги.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За прошедшие четыре года, после того как была написана рукопись первого издания этой книги, галактическая и внегалактическая астрономия обогатилась новыми, неожиданными наблюдательными открытиями и интересными идеями. Поэтому текст книги существенно дополнен, внесены изменения и уточнения.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе истории меняется лицо наук. Задачи, которые в некоторую эпоху считались второстепенными или вовсе не ставились, в следующую эпоху выдвигаются на первый план, определяют общее направление науки. Не избежала этих изменений и астрономия. Она зародилась в те далекие времена, когда первые мореплаватели и первые участники караванных переходов по пустыням стали использовать наблюдения светил для ориентировки на местности.

Позднее, в эпоху расцвета культуры в древнем мире, когда наряду с удовлетворением материальных нужд необходимой потребностью человека стало познание мира, в котором он живет, основной задачей астрономии становится выяснение места, занимаемого Землей в пространстве среди небесных тел, и определение строения окружающего ее мира.

Астрономия никогда не прекращала настойчивых поисков для полного решения этой задачи, каждый успех в ней открывал новые горизонты и ставил новые проблемы. Но в 17-м и 18-м веках, в связи с быстрым развитием мореплавания, захватом далеких колоний и военным соперничеством на морях, снова на первый план стала выдвигаться задача точного определения координат места на Земле при помощи наблюдений небесных светил. Основанные в этот период большие обсерватории — Парижская, Гринвичская, а позднее Пулковская — главной задачей имели составление каталогов точных положений звезд для определения координат на местности.

Насколько важной была задача точного определения географических координат, видно, например, из того, что в 1714 г. английский парламент, объявив конкурс на разработку метода определения долготы на море, учредил неслыханно большие вознаграждения. Премия была рав-

на 20 000 фунтов стерлингов (по тем временам сумма огромная), если ошибка в определении долготы не превосходила 30 миль, 15 000 фунтов стерлингов при ошибке до 40 миль и 10 000 фунтов при ошибке до 60 миль.

Однако в 19-м и особенно в 20-м веках главной задачей астрономии снова становится исследование окружающего Землю мира. Условия существования материи во Вселенной отличны от земных и, как правило, невоспроизводимы в земных лабораториях. Никакими ухищрениями экспериментаторов нельзя создать свободные системы связанных между собой силами тяготения тел, какими являются звездные системы. Ни в одной физической лаборатории нельзя наблюдать материю при таких высоких температурах и давлениях, при таких низких и таких высоких плотностях, какие встречаются во Вселенной.

Одним из первых примеров необычных процессов может служить история с линией «небулия». В спектрах планетарных туманностей были обнаружены две интенсивные светлые линии, не встречавшиеся в спектрах известных элементов. После ряда неудачных попыток отождествления линий было решено, что они вызываются неизвестным элементом, которому дали название небулия (nebula — туманность). Однако в 1928 г. Боуэн показал, что линии «небулия» являются на самом деле линиями излучения дважды ионизованного кислорода. Дважды ионизованный кислород излучает их только в условиях чрезвычайно разреженной материи планетарной туманности. В земных условиях этот процесс не протекает, линии «небулия» получить нельзя.

Одновременно с расширением мира, который мы можем наблюдать, примеры особых состояний вещества и необычных процессов, происходящих с ним, множились, существенно обогащая и представления о строении Вселенной и представления о строении и свойствах вещества.

Выход астрономии в пространство за пределами нашей Галактики дал новый мощный толчок изучению строения Вселенной и позволил открыть совершенно необычные явления, многим из которых до сих пор трудно найти объяснение. Изучение этих явлений должно, по-видимому, привести к коренному пересмотру многих наших представлений о свойствах материи и эволюции небесных тел. Поэтому внегалактические исследования в последние годы вызывают особый интерес и для их развития прилагаются большие усилия.

СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ

Что такое звезды? Поверхностный взгляд найдет сходство между звездами и планетами. Ведь и планеты при наблюдении простым глазом видны как светящиеся точки различной яркости. Однако уже за несколько тысячелетий до нас внимательные наблюдатели неба — пастухи и земледельцы, мореплаватели и участники караванных переходов — приходили к убеждению, что звезды и планеты — различные по своей природе явления. Планеты, так же как Луна и Солнце, изменяют свое положение на небе, перемещаются из одного созвездия в другое и за год успевают пройти значительный путь, а звезды неподвижны одна относительно другой. Даже глубокие старики видят очертания созвездий совершенно такими же, какими они их видели в детстве.

Сходство в характере и скорости перемещений Солнца, Луны и планет привело наблюдателей древности к смелой и правильной мысли, что эти тела вместе с Землей образуют обособленную систему тел. Исследование этой системы, проходившее в борьбе между научной мыслью и религиозным догматом, завершилось торжеством учения Коперника. Определилось, что особым телом этой Солнечной системы является Солнце. Оно занимает центральное положение и выделяется своими размерами и массой, превосходя во много раз все остальные тела системы, вместе взятые. Солнце — единственное тело системы, состоящее из раскаленного газа и излучающее огромное количество энергии в пространство. Планеты тоже излучают энергию, но это лишь отраженная от их холодной поверхности ослабленная энергия излучения Солнца.

Звезды не могут принадлежать к Солнечной системе. Если бы они были примерно на таком же расстоянии, как и планеты, то невозможно было бы найти объяснение их видимой неподвижности. Естественнее считать, что

звезды тоже движутся в пространстве, но они так далеки от нас, что видимые перемещения их ничтожны. Создается иллюзия неподвижности звезд. Но если звезды так далеки, то при видимой яркости, сравнимой с видимой яркостью планет, они должны излучать во много раз мощнее, чем планеты. Такой ход рассуждений приводил к мысли, что звезды — это тела, по своей природе сходные с Солнцем. Эту мысль отстаивал Джордано Бруно. Но окончательно вопрос разрешился после двух открытий. Первое сделал Галлей в 1718 г. Он сравнил наблюдаемые им положения ярких звезд с положениями этих же звезд, определенными древнегреческими астрономами. Оказалось, что за прошедшие почти 2000 лет Сириус сместился приблизительно на полградуса, а Арктур — на целый градус. Хотя древнегреческие астрономы определяли положения звезд не очень точно, смещения оказались слишком большими, чтобы их можно было отнести за счет ошибок наблюдений, и Галлей пришел к выводу, что он обнаружил действительное перемещение звезд на небесной сфере. Естественно было считать, что перемещение в течение двух тысяч лет происходило равномерно; тогда получается, что за год Сириус смещается приблизительно на одну секунду дуги ($1''$), а Арктур приблизительно на две секунды дуги ($2''$). Это очень медленное перемещение и неудивительно, что его трудно было обнаружить.

Теперь уместно провести следующее рассуждение: Земля за год совершает полный оборот по орбите вокруг Солнца, в результате чего мы наблюдаем видимое движение Солнца по небесной сфере, которое составляет 360° в год. Если предположить, что Сириус движется в пространстве поперек луча зрения примерно с такой же скоростью, с какой Земля движется вокруг Солнца, то из этого должно следовать, что Сириус находится во столько же раз дальше Солнца, во сколько раз 360° больше $1''$, т. е. приблизительно в миллион раз. Но если увеличить расстояние до Солнца в миллион раз, то его блеск станет даже меньше блеска Сириуса. Значит, нужно полагать, что Сириус излучает в пространство не меньше, а скорее несколько больше световой энергии, чем Солнце. Это очень важный аргумент, подтверждающий общность природы звезд и Солнца.

Еще более сильным оказался другой аргумент. В 1824 г. Фраунгофер произвел первые наблюдения спектров звезд.

В 1864 г. Секки, проделав подробное исследование спектров звезд, пришел к выводу, что звезды, как и Солнце, состоят из газа, имеющего высокую температуру, а также, что спектры всех звезд могут быть распределены на несколько классов и спектр Солнца принадлежит одному из этих классов. Из этого следует, что свет звезд имеет ту же природу, что и свет Солнца.

Таким образом, Солнце — одна из звезд. Это очень близкая к нам звезда, с которой Земля физически связана, вокруг которой она движется.

Но звезд огромное множество, они имеют различный блеск, различный цвет, различный спектр. Звезды движутся, они излучают огромное количество энергии в пространство и поэтому, теряя эту энергию, не могут не изменяться: они должны проходить какой-то путь эволюции. Перед астрономией открылось обширное поле исследования. Важность его определялась тем, что, судя по соотношению массы Солнца и массы планет в Солнечной системе, звездная форма материи является основной формой материи во Вселенной. Значение исследований звезд чрезвычайно велико также для успешного изучения природы самого Солнца, сыгравшего решающую роль в возникновении жизни на Земле и играющего столь же важную роль в поддержании этой жизни в наше время.

И наконец, встал новый вопрос: связаны ли как-нибудь между собой звезды? Влияют ли они каким-нибудь образом друг на друга? Не образуют ли звезды в свою очередь обособленной системы, эволюционирующей по каким-то своим законам?

Области астрономии, которые развились в ходе исследования этих вопросов, получили название астрофизики и звездной астрономии.

Определение расстояний до звезд

Рассуждение, которое было проведено, чтобы как-то оценить возможное расстояние до Сириуса, содержало предположение, что Сириус движется поперек луча зрения со скоростью, близкой к скорости движения Земли по ее орбите. Очевидно, что это предположение мало обосновано и полученное при его помощи расстояние до Сириуса может сильно отличаться от действительного. Необходимо найти более надежную основу для определения расстояний до звезд. Такой основой служит видимое

смещение звезд в результате движения Земли вокруг Солнца.

Читатель, вероятно, помнит об одном открытии, сделанном им еще в детстве: если попеременно закрывать и открывать то один, то другой глаз, то наблюдаемые предметы видимым образом смещаются друг относительно друга, совершая как бы скачки вправо и влево. Особенно сильно смещаются близкие предметы, например, поднесенный к лицу палец. Это явление объясняется

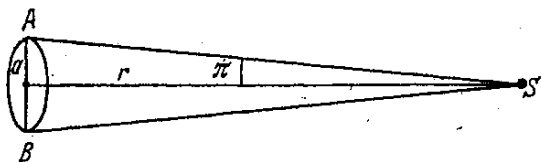


Рис. 1. Определение расстояния до звезды.

тем, что, попеременно закрывая и открывая глаза, мы наблюдаем из двух разных точек, разделенных расстоянием между зрачками. Аналогичное явление — видимое смещение звезд на небе — происходит из-за того, что Земля движется вокруг Солнца и мы в разное время года наблюдаем звездное небо из разных точек пространства. Как показывает рис. 1, направления AS и BS , по которым наблюдается звезда S из двух противоположных точек орбиты Земли, составляют угол, на который и смещается видимым образом звезда. Если обозначить через π половину этого угла, то из прямоугольного треугольника Земля — Солнце — звезда следует равенство

$$r = \frac{a}{\sin \pi}, \quad (1)$$

где r — расстояние от Земли до звезды, a — радиус земной орбиты. Величина радиуса земной орбиты называется астрономической единицей и составляет 149,6 млн. км.

Угол π , называемый годичным параллаксом звезды, равен половине ее видимого смещения за год. Как показывает рис. 1, под этим углом был бы виден наблюдаемый со звезды радиус земной орбиты. Если угол π измерен, то расстояние до звезды легко вычисляется по формуле (1).

Звезды так далеки, что даже у ближайших из них параллакс меньше секунды дуги. Поэтому измерение параллаксов звезд является весьма тонкой работой. Надо

еще учесть, что положение звезд изменяется также вследствие их движения относительно Солнца. Но движение звезды относительно Солнца является поступательным движением, а параллактическое смещение есть колебательное движение, поэтому эти два вида движения удастся разделить.

Расстояние до звезды, параллакс которой был бы равен точно $1''$, принято в звездной астрономии за единицу длины. Эта единица длины называется парсеком (от сокращения слов «параллакс» и «секунда»). Иначе можно сказать, что парсек — это такое расстояние, с которого радиус земной орбиты виден под углом в $1''$. Так как $\sin 1'' = \frac{1}{206\,265}$, то из формулы (1) получаем:

$$r = 1 \text{ пс} = \frac{a}{\sin 1''} = 206\,265 a,$$

т. е. парсек равен 206 265 радиусам земной орбиты, или, в пересчете на километры, $3,08 \cdot 10^{13}$ км. Путь, равный парсеку, световой луч проходит за 3,26 года. Так как расстояние, проходимое светом за год, называется световым годом, то парсек равен 3,26 светового года. Очевидно, что если параллакс звезды в n раз меньше секунды, то расстояние до звезды равно n парсекам. Таким образом, расстояние до звезды в парсеках мы получим, если разделим единицу на параллакс звезды, выраженный в секундах дуги.

Первое надежное определение расстояния до звезды было сделано Бесселем, измерившим в 1838 г. параллакс звезды 61 Лебеда.

В табл. 1 приводится список двадцати ближайших к нам звезд.

К настоящему времени параллаксы измерены более чем у семи тысяч звезд. Число измеренных параллаксов не очень велико потому, что у далеких звезд параллаксы настолько малы, что их невозможно измерить. Для определения расстояний до далеких звезд и иных удаленных объектов применяются другие методы определения расстояний. Но все эти методы используют расстояния до близких звезд, полученные при помощи тригонометрических параллаксов. Поэтому метод тригонометрических параллаксов является основным методом определения расстояний во Вселенной.

При изучении Вселенной наблюдают тела и системы настолько удаленные, что даже огромнейшая единица

длины, парсек, оказывается слишком малой, чтобы удобно выражать расстояния. Тогда вводят в употребление единицу длины в тысячу раз большую — килопарсек (кпс) и в миллион раз большую — Мегاپарсек (Мпс).

Т а б л и ц а 1. Двадцать ближайших звезд

№ п. п.	Название звезды	Пара- лакс в се- кундах дуги	Рассто- яние, пс	Видимая звездная величина, <i>m</i>	Абсолют- ная звезд- ная вели- чина, <i>M</i>	Спект- ральный класс
1	Солнце	—	1/206265	—26,7	+ 4,9	G2
2	Проксима Центавра	0,762	1,31	+11,3	+15,7	M
3	α Центавра А	0,756	1,32	+ 0,3	+ 4,7	G4
4	α Центавра В	0,756	1,32	+ 1,7	+ 6,1	K1
5	Звезда Барнарда	0,543	1,84	+ 9,5	+13,1	M5
6	Лаланд 21185	0,407	2,46	+10,7	+13,7	M2
7	Вольф 359	0,403	2,48	+13,5	+16,5	M8
8	+36°2147	0,388	2,58	+ 7,5	+10,4	M2
9	Сириус	0,376	2,66	— 1,5	+ 1,4	A1
10	Спутник Сириуса	0,376	2,66	+ 8,5	+11,4	A5
11	Росс 154	0,350	2,86	+10,5	+13,2	M5
12	Росс 248	0,334	2,99	+12,2	+14,7	M6
13	Лейтен 7896	0,328	3,05	+12,3	+14,9	M6
14	ϵ Эридана	0,303	3,30	+ 3,8	+ 6,2	K2
15	Процион	0,297	3,37	+ 0,5	+ 2,8	G4
16	Спутник Проциона	0,297	3,37	+10,8	+13,1	
17	61 Лебеда	0,296	3,38	+ 5,4	+ 7,7	K3
18	Спутник 61 Лебеда	0,296	3,38	+ 6,1	+ 8,4	K5
19	τ Кита	0,294	3,40	+ 3,7	+ 6,0	G5
20	ϵ Индейца	0,288	3,47	+4,7	+ 7,0	K5

Видимые звездные величины

При наблюдении звездного неба в черте освещенного огнями города можно видеть только небольшое число ярких звезд. Совсем другим кажется звездное небо в местности, где нет ярких огней, особенно в безлунную ночь. Наряду с яркими глаз видит менее яркие звезды и множество совсем слабых.

Это различие блеска звезд подчеркивает самую замечательную особенность звездного неба — его глубину. Но если поэт при виде бездонного звездного неба ищет возвышенных сравнений, то обязанность ученого, заметив различие в блеске звезд, разработать методику оценки блеска и применить эту методику к возможно большему числу звезд.

Световым потоком I звезды называется количество энергии излучения звезды, падающего в единицу времени на единицу поверхности, перпендикулярной к лучу зрения. Для наблюдателя, находящегося на Земле, световой поток ярчайшей звезды земного неба Сириуса в 750 раз больше светового потока звезды 61 Лебеда (семнадцатой из ближайших к нам звезд), едва различаемой невооруженным глазом, в 33 000 раз больше светового потока звезды Барнарда (пятой в списке ближайших звезд), которую можно наблюдать в полевой бинокль, и в 10^{10} раз больше светового потока тех очень слабых звезд, фотографические изображения которых получают при длительных экспозициях на современных гигантских телескопах. С другой стороны, световой поток Солнца в $2 \cdot 10^{10}$ раз больше светового потока Сириуса. Столь большое различие в световых потоках звезд делает неудобным использование этой величины. Вместо нее употребляют так называемую видимую звездную величину m , которая связана со световым потоком I соотношением

$$m = -2,5 \lg I + C. \quad (2)$$

Здесь C — некоторая постоянная, выбранная так, чтобы видимые звездные величины соответствовали шкале древнегреческого астронома Гиппарха, который во 2-м веке до нашей эры впервые разделил звезды на шесть величин в зависимости от их блеска. Разделение на звездные величины Гиппарх производил на глаз, причем так, чтобы звезды 1-й величины казались настолько ярче звезд 2-й величины, насколько те кажутся ярче звезд 3-й величины и т. д. Гиппарху было неизвестно свойство человеческого глаза воспринимать геометрические отношения яркости как арифметические. Человеческий глаз так устроен, что если в люстре последовательно зажигается 1, 3, 9, 27, 81..., т. е. в каждый следующий раз в три раза больше одинаковых лампочек, то нам кажется, что освещенность в комнате все время увеличивается на одну и ту же величину. Если же зажигать последовательно 1, 3, 5, 7, 9 и т. д. лампочек, то глазу кажется, что прибавка в освещенности комнаты все время уменьшается. Это свойство не только зрения, но и других органов чувств, выработалось в процессе эволюции, чтобы, с одной стороны, воспринимать слабые раздражения и, следовательно, обеспечить нужную реакцию организма на эти раздражения, а с другой стороны, чтобы смягчить влияние сильных

раздражений и тем самым оберегать организм от их травмирующего действия.

Формула (2) как раз обладает тем свойством, что если световой поток I изменяется в геометрическом отношении, то видимая звездная величина m изменяется в арифметическом отношении, а именно, увеличению светового потока в 100 раз соответствует уменьшение видимой звездной величины m ровно на пять единиц. Уменьшение же видимой звездной величины на одну единицу означает увеличение светового потока приблизительно в 2,512 раза.

На практике видимые звездные величины определяют при помощи специального прибора — фотометра, в котором наряду с наблюдаемой звездой видна искусственная «звезда» — освещенный металлический шарик или иное приспособление. При помощи специального устройства изменяют блеск шарика до тех пор, пока он не станет равным блеску звезды, и затем по отсчету на шкале определяют видимую звездную величину. Эта шкала рассчитывается при помощи формулы (2).

В настоящее время обычно используют фотографический метод, основанный на том, что изображения звезд на фотографической пластинке получаются в виде кружков тем большего радиуса и тем более плотными, чем больше световой поток звезды. Интенсивность химических процессов, происходящих в эмульсии фотографической пластинки и вызывающих ее почернение, пропорциональна количеству падающего на нее света. Измеряя почернения, вызванные на пластинке светом звезд, можно определять их видимые звездные величины. Соответствующая шкала перехода тоже основана на формуле (2).

Наиболее точным методом определения звездных величин является получивший широкое распространение за последние 10—20 лет фотоэлектрический метод. На полупроводниковый катод фотоэлемента падает собранный телескопом свет звезды. Кванты света выбивают из катода электроны, которые электрическим полем фотоэлемента направляются к аноду, в результате чего возникает электрический ток. Сила тока пропорциональна числу вылетающих электронов, а число последних пропорционально потоку излучения звезды. Измеряя силу возникающего тока, определяют звездную величину светила. Как видно из табл. 1, для оценки звездных величин используются не только целые, но и дробные числа.

Согласно предложению Гиппарха, назвавшего самые яркие звезды звездами первой величины, чем больше блеск звезды, тем меньше ее видимая звездная величина. Это правило выполняется в формуле (2) благодаря минусу перед первым членом правой части. Таким образом, из 20 ближайших звезд самый слабый блеск имеет звезда Вольф 359 (видимая звездная величина равна +13,5), а наибольшим блеском обладает Сириус, звездная величина которого даже отрицательна: -1,6. Видимая звездная величина Солнца -26,7, а Луны в полнолунии -12,5.

Светимости и абсолютные звездные величины

Сравнение 4-го и 5-го столбцов табл. 1 показывает, что различие видимых звездных величин не может быть объяснено одним различием расстояний звезд. Например, Сириус вдвое дальше, чем α Центавра, а его видимая звездная величина меньше, т. е. блеск больше.

Очевидно, это должно объясняться тем, что Сириус излучает больше световой энергии в пространство, чем α Центавра.

Количество световой энергии, излучаемой звездой в единицу времени, называется ее светимостью. Световой поток звезды зависит от ее расстояния до наблюдателя. Светимость же звезды от положения наблюдателя не зависит. Это — одна из важнейших физических характеристик звезды. Светимость Солнца равна приблизительно $4 \cdot 10^{26}$ джоулей в секунду (Дж/с). Чтобы как-то представить себе значение этой величины, укажем, что выработанная человечеством энергия всех видов меньше одной тысячной доли энергии, излучаемой Солнцем за секунду.

На Землю падает приблизительно одна двухмиллиардная доля всего излучения, посылаемого Солнцем в пространство. Так как все виды энергии — уголь, нефть, газ, энергия движения рек, энергия ветра и т. д., кроме атомной энергии, которой пока выработано немного, являются переработанной энергией солнечного света, то легко считать, что человечество за время своего существования использовало всего только энергию солнечного излучения, падающего на Землю приблизительно за месяц.

Можно найти соотношение, связывающее светимость L звезды и ее световой поток I на расстоянии r . Окружим звезду сферой радиуса r . Поверхность этой сферы

равна $4\pi r^2$. Так как через всю эту сферу в единицу времени проходит столько световой энергии, сколько излучается звездой, то световой поток мы получим, разделив L на $4\pi r^2$:

$$I = \frac{L}{4\pi r^2}. \quad (3)$$

Подставив равенство (3) в равенство (2), получим

$$m = -2,5 \lg \frac{L}{4\pi r^2} + C. \quad (4)$$

Для удобства сравнения размеров предметов их располагают рядом — разница тотчас определится. Представим себе картину, которая открылась бы нам, если бы все звезды расположились на одинаковом расстоянии от нас — скажем, на расстоянии 10 пс. Для этого ближайшим звездам пришлось бы отодвинуться, а большинству звезд приблизиться к нам. Сравнивая теперь видимые звездные величины звезд, мы могли бы судить о том, какая звезда излучает больше энергии в пространство. Звездные величины звезд, находящихся на одном расстоянии, могли бы служить мерой их светимости.

Та звездная величина, которую имела бы звезда на расстоянии 10 пс, называется абсолютной звездной величиной и обозначается обычно буквой M .

Если в формуле (4) вместо r написать 10, то слева вместо m нужно, очевидно, писать M :

$$M = -2,5 \lg \frac{L}{4\pi \cdot 10^2} + C. \quad (5)$$

Вычтем теперь из равенства (5) равенство (4). Получим

$$M = m - 5 \lg r + 5. \quad (6)$$

Эта важная формула позволяет по видимой звездной величине и расстоянию определять абсолютную звездную величину. Знание абсолютной звездной величины звезды заменяет знание ее светимости, так же как знание видимой звездной величины заменяет знание светового потока звезды. Аналогично соотношению между видимой звездной величиной и световым потоком звезды, увеличение светимости звезды в 100 раз соответствует уменьшению ее абсолютной звездной величины ровно на пять единиц, а уменьшение абсолютной звездной величины на

одну единицу означает увеличение светимости звезды приблизительно в 2,512 раза.

В табл. 1 приводятся абсолютные звездные величины ближайших звезд, вычисленные по формуле (6). Мы видим, что если Солнце отодвинуть на расстояние 10 пс, то оно превратится в звездочку со звездной величиной 4,9 едва различимую простым глазом. Из 20 ближайших звезд только три имеют меньшую абсолютную звездную величину, т. е. большую светимость, чем Солнце — это Сириус, Прокцион и α Центавра. Сириус излучает в пространство в 25 раз больше энергии, чем Солнце. У остальных звезд табл. 1 абсолютная звездная величина больше, чем у Солнца. Значит, у этих звезд сравнительно малая светимость. Самая слабая из них, Вольф 359, излучает в 2800 раз меньше Солнца. Эти сравнения показывают, что Солнце является звездой со светимостью выше средней.

Среди двадцати ближайших звезд многие имеют очень низкие светимости и потому блеск у этих звезд, несмотря на их близость, небольшой (видимая звездная величина большая). В то же время некоторые звезды имеют настолько высокую светимость, что у них, несмотря на удаленность, большой блеск (малая видимая звездная величина). Интересно поэтому сопоставить с табл. 1 список 20 ярчайших звезд неба (табл. 2).

В табл. 2 звезды расположены в порядке их видимой звездной величины. Эти ярчайшие звезды изучались и описывались с древних времен, поэтому почти все они имеют собственные имена, в отличие от списка ближайших звезд, в которых большинство звезд обозначено при помощи номера в том каталоге, в который они занесены. Среди ярчайших звезд семь удалены на расстояния больше 50 пс, но столь большая удаленность компенсируется их очень высокой светимостью. Абсолютные звездные величины этих звезд имеют даже отрицательные значения. Особенно велика светимость у Денеба и Ригеля. Первый из них излучает в 24 000 раз, а второй в 150 000 раз больше Солнца. Если бы центральным светилом Солнечной системы был Денеб или Ригель, то температура на поверхности Земли была бы равна нескольким тысячам градусов. Даже на самой далекой планете Плутон температура поверхности поднималась бы до 300 градусов и более, что исключало бы возможность возникновения жизни во всей Солнечной системе.

Если бы все звезды имели одинаковую светимость, то ближайшие звезды были бы одновременно и ярчайшими. То, что из списка 20 ближайших звезд только три попадают в список 20 ярчайших, показывает, как велико различие в светимостях у звезд. Денеб излучает в 10 миллиардов раз больше, чем звезда Вольф 359, поэтому он,

Т а б л и ц а 2. Двадцать ярчайших звезд

№ п. п.	Звезда	Видимая звездная величина	Абсолютная звездная величина	Спектральный класс
1	Сириус	-1,6	+1,3	A2
2	Канопус	-0,9	-4,6	F0
3	α Центавра	+0,1	+4,7	G5
4	Вега	+0,1	+0,6	A1
5	Капелла	+0,2	-0,5	G2
6	Арктур	+0,2	0,0	K0
7	Ригель	+0,3	-6,2	B8
8	Процион	+0,5	+2,8	F4
9	α Эридана	+0,6	-1,7	B6
10	β Центавра	+0,9	-3,1	B2
11	Альтаир	+0,9	+2,4	A6
12	Бетельгейзе	+0,9	-5,6	M2
13	α Южного Креста	+1,1	-2,8	B1
14	Альдебаран	+1,1	-0,5	K5
15	Поллукс	+1,2	+1,0	G9
16	α Девы	+1,2	-2,2	B2
17	Антарес	+1,2	-2,4	M1
18	Фомальгаут	+1,3	+2,1	A3
19	Денеб	+1,3	-5,2	A2
20	Регул	+1,3	-0,7	B8

несмотря на большую удаленность, красуется на небе и был причислен Гиппархом к звездам 1-й величины (точнее, его видимая звездная величина +1,3), а очень близкая к нам звезда Вольф 359 может наблюдаться только в телескоп.

Определение звездной плотности в окрестности Солнца

Звездной плотностью называется число звезд, приходящихся на объем в 1 кубический парсек. Изучение нашей звездной системы можно начать с определения звездной плотности в районе Солнца. Первую грубую оценку мы получим, используя табл. 1. Поскольку двадцатая из самых близких звезд находится на расстоянии 3,47 пс, среднюю звездную плотность в сфере с радиусом 3,47 пс

можно вычислить, разделив 20 на объем этой сферы. Получается 0,11 звезды на кубический парсек.

Однако мы не можем быть уверены в том, что внутри сферы с радиусом 3,47 пс выявлены все звезды. Вероятно, имеются звезды настолько низких светимостей, что, несмотря на близость, блеск их очень мал и видимая звездная величина может быть равна 16—17^m. Но звезд такой видимой звездной величины миллионы, и выделить среди них те звезды, которые очень близки к нам, чрезвычайно трудно.

Чтобы убедиться в правильности предположения о том, что близкие звезды выявлены не полностью, воспользуемся более обширным списком ближайших

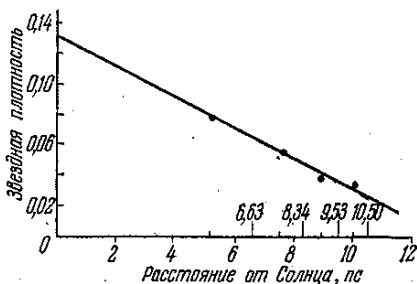


Рис. 2. Определение звездной плотности в окрестностях Солнца.

звезд, составленным в 1942 г. американским астрономом Кейпером. Этот список содержит 252 звезды, выявленные внутри сферы с радиусом 10,5 пс. Сосчитаем, сколько звезд находится ближе 6,63 пс, у скольких расстояние заключено между 6,63 и 8,34, затем между 8,34 и 9,53 и, наконец, между 9,53 и 10,50 пс. Такие расстояния мы выбрали потому, что сферы с радиусами 6,63, 8,34 и 9,53 пс делят всю сферу с радиусом 10,5 пс на четыре равновеликих объема. Можно считать, что действительная звездная плотность во всех местах внутри сферы радиуса 10,5 пс одна и та же, поэтому если бы доля невыявленных звезд не зависела от расстояния, во всех четырех выделенных группах было бы одинаковое число звезд. Однако соответствующие числа звезд равны 93, 66, 48 и 45. Результат показывает, что в ближайшем из четырех равных объемов звезды выявлены полнее, чем во втором, а в третьем и четвертом по дальности объемах доля выявленных звезд продолжает уменьшаться. Этого, конечно, и следовало ожидать.

Если разделить полученные числа звезд на величины объемов, в которых они находятся (все объемы равны приблизительно 121 пс³), то получим для каждого объема звездную плотность выявленных звезд. Она соответственно равна 0,077; 0,055; 0,040 и 0,037 звезд на 1 пс³.

Воспользуемся полученными данными, чтобы восполнить невыявленные звезды. Для этого построим диаграмму (рис. 2), в которой по горизонтальной оси будем откладывать среднее расстояние каждого объема, т. е. радиус сферы, разбивающей объем на две равные части (маленькие черточки, направленные вверх от оси абсцисс), а по вертикали плотность выявленных звезд в этом объеме. После этого проведем прямую, проходящую по возможности близко к полученным четырем точкам. Прямая дает ход изменения плотности выявленных звезд, т. е. видимой звездной плотности, которая убывает с увеличением расстояния и всегда меньше истинной звездной плотности, постоянной в рассматриваемом объеме. Но очевидно, что непосредственно около самого Солнца мы способны выявить все звезды. Поэтому значение видимой звездной плотности на расстоянии нуль, получаемое при пересечении прямой с вертикальной осью диаграммы, является одновременно и значением истинной звездной плотности. Отсчет показывает, что она должна быть оценена в 0,133 звезды на кубический парсек.

Примененный метод, помимо восполнения невыявленных звезд, позволил уменьшить роль случая. Если основываться только на 20 ближайших звездах, то результат больше подвержен случайности, так как эти 20 звезд могли случайным образом расположиться теснее или реже, чем в среднем по всему объему. Опирируя 252 звездами, мы значительно уменьшаем влияние случая. На нашей диаграмме случайность в расположении звезд проявилась в том, что точки лежат не точно на прямой, а отклоняются от нее вверх или вниз.

Итак, запомним наш результат: в районе Солнца на каждый кубический парсек в среднем приходится 0,133 звезды. Значит одна звезда приходится в среднем на куб с ребром в 2 пс.

Спектры звезд

Если на пути света, посылаемого каким-то источником излучения, поставить стеклянную призму, то свет изменит направление, испытает, как говорят, преломление. При этом лучи с большей длиной волны отклонятся на меньший угол, а лучи с меньшей длиной волны на

бóльший угол. В результате на экране, который, может быть помещен за призмой, появится цветная полоска — спектр источника излучения. В этой полоске цвета, как в радуге, чередуются в последовательности от фиолетового, самого коротковолнового из наблюдаемых глазом излучений, к синему, зеленому, желтому, оранжевому и красному. За фиолетовым краем полосы находится еще более коротковолновая область — ультрафиолетовая, а за красным краем еще более длинноволновая, чем красная — инфракрасная. Но глаз не воспринимает излучение столь коротковолновое, как ультрафиолетовое, и столь длинноволновое, как инфракрасное. Излучение в этих областях может быть зарегистрировано приборами.

В спектре обычных самосветящихся твердых или жидких тел, например, свечи или электрической лампочки, яркость по мере перехода от фиолетовой части к красной изменяется плавно. В спектрах же звезд на этом непрерывном фоне имеются темные, а у некоторых звезд еще и яркие линии. Эти линии показывают, что над ослепительно светящейся поверхностью звезд имеется атмосфера, состоящая из различных газов. Такого же рода линий мы получим в спектре электрической лампочки, если на пути к стеклянной призме свет лампочки пройдет через слой раскаленного газа (например, через пламя газовой горелки). Каждый газ дает линии в определенных местах спектра. Сравнивая положение получаемых таким образом в лабораториях спектральных линий газов с положениями линий в спектрах звезд, астрономы определяют химический состав и температуру звездных атмосфер.

Комбинации линий в спектрах звезд и их интенсивность изменяются от звезды к звезде, и практически нельзя найти двух звезд, спектры которых были бы совершенно одинаковы. В то же время соизученность спектров звезд обладает замечательной особенностью, заключающейся в том, что все спектры могут быть расположены в непрерывную последовательность.

Если мы возьмем два каких-нибудь сильно отличающихся один от другого спектра звезд, то, оказывается, всегда можно найти достаточное количество спектров других звезд, которые, после того как мы их в надлежащем порядке расположим между первыми двумя спектрами, создадут постепенный переход от одного из них к другому. В полученном ряде спектров любые два соседних будут очень мало отличаться друг от друга, но

эти отличия, постепенно накапливаясь, приведут к резкому различию спектров, находящихся на концах ряда. Вместе с тем, такая серия промежуточных спектров может быть всегда только одна, т. е. последовательность спектров линейная.

Это свойство совокупности звездных спектров имеет глубокий смысл. Оно указывает на единство окружающих нас звезд, а также на возможную эволюцию звезд, сопровождающуюся постепенным изменением их спектров.

Для удобства вся последовательность звездных спектров разбита на семь участков, или классов. Звезды, спектры которых находятся внутри одного и того же участка, считаются принадлежащими к одному и тому же спектральному классу. Общепринято обозначать спектральные классы прописными латинскими буквами. Вследствие ошибок, допущенных при первых попытках классифицировать спектры звезд, и возникшей в связи с этим необходимости переставить некоторые классы, а другие и вовсе устранить, расположение классов теперь не соответствует расположению букв в алфавите и выглядит так:

O — B — A — F — G — K — M.

Спектры звезд двух соседних классов еще существенно различаются между собой. Поэтому потребовалось введение более тонкой градации — деления спектров внутри каждого спектрального класса на десять подклассов. После такого деления один из участков последовательности спектров выглядит, например, следующим образом:

... — B9 — A0 — A1 — A2 — A3 — A4 — A5 — A6 — A7 —
— A8 — A9 — F0 — F1 — F2 — ...

Спектры звезд различных спектральных классов отличаются множеством особенностей. Но можно выделить основные, наиболее характерные свойства. В спектрах звезд от O до B5 главную роль играют линии ионизованных газов (кислород, азот, гелий), т. е. таких газов, у которых атомы потеряли один или больше электронов. В спектральных классах B6 — F1 линий ионизованных газов уже нет, но появляются линии ионизованных металлов — кальция, магния, железа и др. В классах F2 — K4 линии ионизованных металлов слабеют и исчезают, а взамен их появляются и усиливаются линии нейтраль-

ных, т. е. неионизованных металлов. Начиная с класса K5 в спектрах звезд обнаруживаются полосы химических соединений — окиси титана, окиси циркония и др. Единственный элемент, линии которого наблюдаются в спектрах всех звезд, — это водород. Наибольшей интенсивности его линии достигают в спектрах B7 — A3. Спектральные классы ближайших и ярчайших звезд приведены в табл. 1 и 2.

Почему спектры звезд различны?

Самый простой ответ на поставленный вопрос состоит, казалось бы, в том, что различие спектров объясняется различием химических составов звезд и преобладание линий какого-нибудь элемента в спектре звезды является следствием преобладания этого элемента в атмосфере звезды. Однако основное свойство совокупности спектров звезд — ее линейная последовательность — указывает, что такой ответ является ошибочным. Действительно, если предположить, что звезды спектрального класса A0 состоят главным образом из водорода, а звезды класса M2 — из окиси титана, то должно было бы существовать несколько последовательностей спектров, соединяющих эти спектральные классы. Например, можно было бы перейти от подкласса A0 к подклассу M2 и через спектры, в которых преобладают линии металлов, и минуя такие спектры.

Если бы звезды сильно отличались одна от другой химическим составом и это определяло бы их спектры, то вследствие возможности самых различных комбинаций в пропорциях различных элементов ни о какой линейной последовательности спектров не могло бы быть и речи. Спектры звезд зависели бы от множества факторов — от процентного содержания каждого элемента. Явление линейной последовательности спектров указывает на то, что спектры звезд зависят главным образом от какого-то одного фактора. Как удалось выяснить, этим фактором является температура звезды.

Чтобы объяснить столь важную роль температуры, необходимо познакомиться с механизмом образования линий в спектрах звезд.

Известно, что атом всякого элемента может поглощать свет. При этом он поглощает свет в совершенно опреде-

ленных частотах. В каких частотах — зависит от устройства этого атома, т. е. от того, из каких и в каком количестве элементарных частиц он состоит.

Когда атом поглотит необходимую порцию световой энергии или, как говорят, световой квант данной частоты, он переходит в возбужденное состояние, определяемое тем, что его внешний электрон из того положения, которое он занимает в атоме в обычном состоянии, переходит в другое положение, более удаленное от ядра атома. В возбужденном состоянии атом находится ничтожную долю секунды, после чего электрон возвращается на свое обычное место, а атом при этом излучает ту же самую порцию световой энергии: либо излучается тот же самый квант той же частоты, который поглотил атом, либо же (что случается реже) атом излучает два или несколько квантов меньших частот, но так, что сумма их энергий равна энергии поглощенного кванта (энергия кванта пропорциональна его частоте).

Направление, в котором будет вновь излучен квант, не будет тем же самым, по которому квант двигался до его поглощения. Он может быть излучен в любом направлении, причем каждый раз это направление является случайным.

Когда свет от раскаленной поверхности звезды проходит через ее более холодную атмосферу, находящиеся там атомы различных элементов поглощают свет в определенных, свойственных этим атомам частотах. Эта световая энергия тут же снова излучается атомами, но уже в различных направлениях. Часть ее возвращается обратно, часть отсылается в сторону и лишь у незначительной части направление будет совпадать с первоначальным. Поэтому в соответствующих местах спектров звезд мы наблюдаем резкое ослабление света — темные линии.

Если атом поглотит квант достаточно высокой частоты, обладающий высокой энергией, то внешний электрон будет не просто перемещен несколько дальше, а будет оторван от ядра; атом станет ионизованным. Ионизованные атомы поглощают свет в иных частотах, чем неионизованные, у них внешним становится другой электрон, поэтому в спектрах звезд ионизованные атомы обнаруживают себя иначе, чем неионизованные, обычные атомы.

Чем выше температура звезды, тем больше световой энергии излучает в секунду квадратный сантиметр ее поверхности. Но от температуры зависит и состав квантов

в ее излучении. Чем выше температура, тем больше доля высокочастотных квантов и меньше доля низкочастотных.

Различие температур светящихся поверхностей звезд, вследствие которого излучение не одинаково по мощности и по распределению в нем квантов высоких и низких частот, влечет за собой различное состояние атомов химических элементов в атмосферах, а это определяет разнообразие спектров звезд.

Поясним, как это происходит. Предположим, что в атмосферах звезд имеются все элементы, которые вообще дают о себе знать в звездных спектрах, и притом для всех звезд пропорция элементов примерно одна и та же. Начнем рассмотрение условий в атмосферах звезд со спектрального класса М. Звезды, принадлежащие к этому спектральному классу, имеют температуру на поверхности около 3000° и являются сравнительно холодными звездами.

При температурах около 3000° еще могут существовать некоторые химические соединения, например, окись титана, и хотя окиси титана в атмосферах звезд ничтожное количество, его молекулы весьма интенсивно поглощают свет во множестве частот, создавая, таким образом, в спектрах звезд класса М целые полосы поглощения.

При более высоких температурах ускоряются движения атомов и молекул. Усиливаются столкновения молекул между собой и молекул с атомами. В результате этих столкновений молекулы распадаются и потому в спектрах звезд класса К полос поглощения молекул почти нет.

В спектрах звезд К и G сильны линии неионизованных металлов, линии же ионизованных металлов и линии водорода еще слабы. Это объясняется тем, что для ионизации атомов металлов и для возбуждения атомов водорода требуются высокочастотные кванты, которых в излучении звезд К и G, имеющих температуру $4000-6000\text{ K}$, еще сравнительно мало. Но в излучении этих звезд достаточно квантов менее высокой частоты для возбуждения атомов металлов.

В звездах класса F с температурой до 7500 K доля высокочастотного излучения заметно возрастает, большая часть атомов металлов ионизируется, и поэтому мы наблюдаем линии поглощения ионизованных металлов. Соответственно в атмосферах F-звезд уменьшается число неионизованных металлов, что влечет ослабление в спектре линий их поглощения. Усиление высокочастотного излу-

чения вызывает и усиление линий поглощения водорода. В спектральном классе А температура поверхности 8000—10 500 К. Здесь атомы металлов ионизованы дважды и большее число раз, т. е. от них оторваны два или больше электронов. Такие многократно ионизованные атомы металлов для возбуждения должны поглощать очень высокочастотные кванты из ультрафиолетовой части спектра. Эта часть спектра звезд нам почти неизвестна, так как ультрафиолетовая область излучения звезд поглощается земной атмосферой и до телескопов наблюдателей не доходит. Только теперь, в последние годы, в связи с космическими полетами появилась возможность выноса астрономических инструментов за пределы атмосферы Земли и изучения ультрафиолетовых областей спектров звезд. Линии водорода в спектрах звезд класса А становятся наиболее интенсивными.

У звезд спектрального класса В температура поверхности еще более высока: 11 000—15 000 К. Мощность высокочастотного излучения здесь так велика, что ионизируются кислород и азот, вследствие чего в спектрах появляются линии ионизованных кислорода и азота. В звездах класса В ионизируется и водород. Но атом водорода имеет только один электрон, поэтому после ионизации он не содержит электронов, уже не может поглощать свет и не дает о себе знать в спектре звезды. Число же неионизованных атомов водорода в В-звездах становится меньше и линии водорода в их спектрах ослабевают.

Наконец, в самых горячих звездах класса О, с температурами от 15 000 до 50 000 К и более, ионизируется уже и гелий, появляются линии ионизованного гелия. Кислород ионизируется дважды, о чем свидетельствуют соответствующие линии. Линии водорода резко ослабевают, так как подавляющая часть водорода переходит в ионизованное состояние.

В спектрах звезд класса О интенсивность линий водорода примерно такая же, как и в классе М. То обстоятельство, что водородные линии видны в спектрах звезд всех классов, хотя условия для их появления в некоторых из них, например, в крайних классах О и М, весьма неблагоприятны, указывает на обилие атомов водорода в атмосферах звезд. Исследования показывают, что атмосферы звезд не менее чем на 80% состоят из водорода.

Мы дали объяснение различию спектров различных классов качественно. Количественная теория была разра-

ботана индийским астрономом и физиком Саха. Наблюдения отлично согласуются с теорией Саха и показывают, что химический состав звезд действительно почти (но не совсем) одинаков. Характер спектров зависит главным образом от температуры. Некоторый отпечаток на спектры накладывает и величина ускорения силы тяжести на поверхности звезды, но влияние этого фактора гораздо слабее, чем влияние температуры звезды.

Цвет звезд

Как слиток раскаленного металла по мере повышения температуры от тускло-красного цвета переходит к желтому и затем ослепительно белому, так и звезды разных температур имеют различные цвета. У наиболее холодных звезд класса М цвет красноватый. Звезды класса К оранжевые. Наше Солнце и другие звезды класса G — желтые. У звезд класса F светло-желтый цвет, звезды класса A кажутся совершенно белыми. Еще более высокая температура звезд классов В и О делает их цвет голубоватым. Такая зависимость температуры от цвета понятна. Ведь в излучении звезд невысокой температуры преобладают кванты света сравнительно низких частот, соответствующие красной части спектра, а в излучении звезд О и В, имеющих очень высокие температуры, преобладают высокочастотные кванты из синей и фиолетовой областей спектра. Поэтому самые холодные звезды класса М красные, самые горячие звезды В и О — голубые, а звезды остальных классов, имеющие промежуточные температуры, имеют и промежуточные цвета — оранжевый, желтый, белый.

Астрономия — точная наука. В ней все понятия стремятся выразить количественно. Поэтому и цвет в астрономии не только качество, но и величина. Цвет в астрономии измеряют. Делается это так. Звезду фотографируют на две фотопластинки. Одна из них обыкновенная, обычно используемая в фотографии. Такая фотопластинка более чувствительна к синим и фиолетовым лучам и менее чувствительна к желтым и красным лучам. Вторая пластинка покрыта особым светочувствительным слоем, более чувствительным к желтым и красным лучам и менее чувствительным к синим и фиолетовым лучам. Эта пластинка по способности «воспринимать» свет различ-

ных цветов близка к человеческому глазу. Ведь глаз человека в ходе эволюции должен был выработать наибольшую чувствительность к лучам того цвета, который преобладает в излучении освещающего нашу планету Солнца, — к лучам желтого цвета. По почернению на той и другой пластинке определяют видимую звездную величину звезды. Видимая звездная величина, определенная при помощи обыкновенной пластинки, обозначается m_{ph} и называется фотографической звездной величиной, а видимая звездная величина, полученная при помощи второй пластинки, обозначается m_{pv} и называется фотовизуальной звездной величиной, так как хотя она определена и фотографическим способом, но при помощи такой пластинки, которая как бы воспроизводит визуальные, выполняемые человеческим глазом, наблюдения.

Составим разность:

$$CI = m_{ph} - m_{pv},$$

называемую показателем цвета звезды или колор-индексом (CI — от английского color index, показатель цвета).

Если звезда красноватая, в ее излучении больше красных лучей. На обычной пластинке получится слабое изображение, а на второй пластинке, чувствительной к красным лучам, более яркое изображение. Так как чем меньше блеск, тем больше видимая звездная величина, то m_{ph} получится больше, а m_{pv} — меньше. Значит, у красной звезды показатель цвета (CI), равный разности $m_{ph} - m_{pv}$, положительный. Так же рассуждая, мы приходим к выводу, что у голубых звезд показатель цвета отрицательный.

Как мы писали выше, спектральный класс звезды зависит главным образом от температуры. Так же от температуры звезды главным образом зависит и ее показатель цвета. Поэтому можно составить таблицу, показывающую, какой показатель цвета и какая температура соответствуют каждому спектральному классу (табл. 3).

В этой таблице соотношения не являются точными, так как и спектральный класс, и показатель цвета зависят не только от температуры, но в некоторой мере и каждый по-своему от другой характеристики — светимости звезды. Однако, пользуясь таблицей, можно по показателю цвета приблизительно определять спектральный класс и температуру звезды. И это очень важно, потому что показатели цвета измерять гораздо легче, чем опре-

делять спектральный класс звезды. Спектр можно получить только у сравнительно яркой звезды и каждую звезду нужно снимать отдельно, наводя на нее щель спектрографа. А показатели цвета определяются у всех звезд, изображения которых получены на двух пластинках. Измерения здесь носят массовый характер и могут быть распространены на очень слабые звезды.

Т а б л и ц а 3. Зависимость спектральных классов и показателей цвета звезд от их температур

Спектральный класс	Показатель цвета	Температура, К
O	$-0^m,4$	50 000
B0	-0,32	25 000
B5	-0,16	15 600
A0	0,00	11 000
A5	+0,15	8 700
F0	+0,30	7 600
F5	+0,44	6 600
G0	+0,60	6 000
G5	+0,68	5 520
K0	+0,82	5 120
K5	+1,18	4 400
M0	+1,45	3 600
M5	+1,69	2 700

Зависимость между массой звезды и ее светимостью

Мы установили, что спектральный класс и показатель цвета звезды связаны с ее температурой.

Оказывается, что еще две физические характеристики звезд тесно связаны между собой. Это — светимость звезды и ее масса.

Массы определяются у двойных звезд, о чем мы подробнее скажем ниже. Если сравнить полученные при этом массы нескольких звезд с их абсолютными звездными величинами, то можно получить данные, приведенные в табл. 4.

Как видно, уменьшение светимости (увеличение абсолютной звездной величины) неуклонно сопровождается убыванием массы звезд.

Т а б л и ц а 4. Зависимость абсолютных звездных величин звезд от масс

Название звезды	M	Масса, выраженная в единицах массы Солнца
Капелла	— 0,2	4,2
Спутник Капеллы	+ 0,1	3,3
Сириус	+ 1,3	2,5
α Центавра	+ 4,7	1,1
Спутник η Большой Медведицы	+ 5,7	0,7
Спутник η Волонаса	+ 7,8	0,5
Спутник β 416	+ 9,2	0,3
Спутник σ Эридава	+ 12,9	0,2
Спутник η Скорпиона	+ 13,4	0,18

Соотношение между массой M и абсолютной звездной величиной M звезды определяется равенством

$$M = 3,89 \cdot 10^{-0,1194M}, \quad (7)$$

где масса M выражена в единицах массы Солнца, равной $2 \cdot 10^{33}$ г.

Определение основных физических характеристик звезды по ее спектральному классу и абсолютной величине

Для того чтобы определить все основные физические характеристики звезды, достаточно знать ее спектральный класс и абсолютную величину. Покажем это на примере. В списке двадцати ярчайших звезд (табл. 2) на девятнадцатом месте стоит Денеб. Это — ярчайшая звезда красивого созвездия Лебедь. Ее абсолютная звездная величина $M = -5^m,2$, а абсолютная звездная величина Солнца $M_{\odot} = +4^m,9$. Как мы писали выше, уменьшение звездной величины на x единиц соответствует увеличению светимости в $2,512^x$ раз. Так как абсолютная звездная величина Денеба на $10^m,1$ меньше абсолютной звездной величины Солнца, то светимость Денеба в $2,512^{10,1} = 11\,000$ раз больше светимости Солнца.

Да, это так: наше Солнце — привычный синоним наиболее яркого, ослепительного, встречающегося в жизни, — излучает в пространство в 11 000 раз меньше энергии, чем Денеб.

Так как энергия излучения Солнца составляет $3,8 \cdot 10^{26}$ джоулей в секунду, то находим, что энергия

излучения Денеба равна

$$3,8 \cdot 10^{26} \times 11\,000 = 4,2 \cdot 10^{30} \text{ Дж/с.}$$

Теперь, заметив, что Денеб имеет спектральный класс А2, при помощи табл. 3 найдем, что температура его поверхности должна быть равна 10 000 К. Денеб значительно горячее Солнца, температура поверхности которого 6000 К.

В физике известен закон Стефана, согласно которому количество энергии, излучаемой с 1 см² площади поверхности тела, пропорционально четвертой степени температуры и равно

$$5,71 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 \text{ Дж/с.}$$

Следовательно, каждый квадратный сантиметр поверхности Денеба излучает в секунду

$$5,71 \cdot 10^{-12} \cdot 10\,000^4 = 5,71 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Теперь легко найти площадь всей поверхности Денеба:

$$S = \frac{4,2 \cdot 10^{30}}{5,71 \cdot 10^4} = 7,3 \cdot 10^{25} \text{ см}^2.$$

Так как поверхность звезды есть сфера, то радиус Денеба равен

$$R = \sqrt{\frac{S}{4\pi}} = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ см} = 24 \text{ млн. км.}$$

Это в 40 раз больше радиуса Солнца. Нам остается по формуле (7), зная абсолютную величину Денеба, найти его массу:

$$M = 3,89 \cdot 10^{-0,1194(-5,2)} = 16,3 \text{ массы Солнца} = 3,26 \cdot 10^{34} \text{ г}$$

и среднюю плотность

$$d = \frac{3M}{4\pi R^3} = 0,00056 \text{ г/см}^3.$$

Средняя плотность Денеба в 2500 раз меньше средней плотности Солнца.

Итак, имея данные только о спектральном классе и абсолютной звездной величине Денеба, мы нашли:

температуру его поверхности 10 000 К,

радиус 24 млн. км,

массу $3,26 \cdot 10^{34}$ г,

среднюю плотность 0,00056 г/см³.

К этому стоит добавить показатель цвета +0^m,05, который можно найти при помощи табл. 3.

Переменные звезды

Существует выражение «неизменные, как звезды». Оно противопоставляет изменчивости окружающих нас условий на Земле представление о постоянстве условий на звездах. Но это представление глубоко ошибочно. Если бы на звездах были обитатели, они с гораздо большим основанием могли бы употреблять выражение «неизменные, как планеты». Самые мощные стихийные движения на Земле — ураганы, извержения вулканов, землетрясения, лесные пожары — покажутся ничтожными, если сравнить их с гигантскими и бурными движениями, происходящими на звездах.

Лучше других звезд изучено Солнце. Установлено, что его поверхность подвержена непрерывным изменениям. На Солнце возникают местами и мощные взрывы, выбрасывающие громадные количества материи, большая часть которой, будучи не в силах преодолеть притяжение Солнца, через некоторое время обрушивается на его поверхность. Скорости этих движений иногда достигают сотен километров в секунду, а массы, участвующие в движении, превосходят массу Земли.

Различные детали солнечной поверхности — пятна, гранулы, факелы — находятся в непрерывном движении, возникают и распадаются.

Активность процессов, происходящих на Солнце, имеет более или менее определенный 11-летний период. Число солнечных пятен достигает максимума один раз примерно в 11 лет. Эти процессы настолько значительны, что оказывают влияние и на ряд земных явлений. Например, сила магнитных бурь, наблюдаемых на Земле, и интенсивность полярных сияний оказываются зависящими от изменений активности солнечной деятельности.

Однако изменения, происходящие на Солнце, не настолько велики, чтобы существенно влиять на его основные свойства. Самые главные для нас характеристики Солнца — его светимость и температура его поверхности — если и претерпевают изменения, то настолько малые, что кажутся жителям нашей планеты совершенно неизменными.

Большинство звезд, как и Солнце, несмотря на то, что и на их поверхности, конечно, происходят изменения, которые с нашей земной точки зрения можно считать грандиозными катастрофами, сохраняют относительное по-

стоянство своих основных характеристик — спектра, температуры, цвета, светимости, размеров.

Но у некоторой сравнительно небольшой части звезд размах происходящих явлений так велик, что их основные

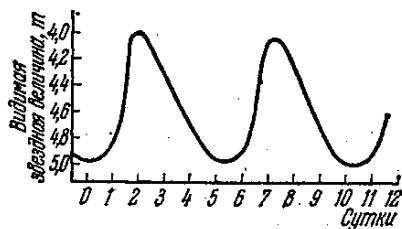


Рис. 3. Изменение блеска δ Цефея.

характеристики, и прежде всего светимость претерпевают существенные, легко обнаруживаемые нами изменения.

Такие звезды называются переменными. Несмотря на то, что это сравнительно редкие звезды, они имеют для астрономии большое значение, так как дают возможность наблюдать процессы совершенно исключительного рода.

Основной характеристикой переменной звезды является кривая блеска, показывающая, как изменяется видимая звездная величина звезды с течением времени. Природа и здесь, можно сказать, проявила большую изобретательность, создав удивительное разнообразие форм кривых блеска.

Наиболее распространенным типом переменных звезд являются цефеиды, называемые так потому, что их прототипом является звезда δ Цефея. Для кривой блеска цефеид характерен вид (рис. 3), показывающий, что блеск звезды испытывает правильные периодические колебания. Нарастание блеска обычно происходит быстрее, чем его спад. Светимость цефеиды сильно колеблется, возрастая при переходах от минимума к максимуму в два раза и более; одновременно изменяются цвет, спектральный класс, лучевая скорость. Это показывает, что звезда испытывает глубокие изменения общего характера.

Наиболее разработанной является теория, согласно которой цефеиды пульсируют, сжимаясь и разжимаясь под действием противоборствующих сил — силы притяжения к центру звезды и силы давления газа, толкаю-

щей вещество наружу. В сжатом состоянии преобладает давление газа — звезда расширяется. Среднее состояние, в котором сила тяготения и сила давления газа уравновешиваются, вследствие инерции звезда проходит на большой скорости, а в расширенном состоянии давление газа ослабевает, силы тяготения вновь заставляют звезду сжиматься. Движение поверхности звезды то к нам, то от нас вызывает изменение наблюдаемой лучевой скорости. Наибольшую светимость звезда имеет в сжатом состоянии, а наименьшую в расширенном. Это объясняется тем, что при сжатии потенциальная энергия гравитации переходит в тепловую энергию газа, температура которого растет, резко увеличивая излучение с одного квадратного сантиметра поверхности, и это с избытком компенсирует уменьшение общей поверхности звезды при сжатии.

Цефеиды резко разделяются на две группы. У одной периоды изменения блеска составляют от двух до 20 дней — это так называемые долгопериодические цефеиды, у другой группы (короткопериодические цефеиды) периоды измеряются лишь часами, от восьми до 18 часов. Это разделение, как выяснилось, проявляется не только в величине периода, а носит качественный характер. Долгопериодические и короткопериодические цефеиды как бы избегают друг друга. В тех областях пространства, где присутствуют долгопериодические цефеиды, нет короткопериодических, и наоборот.

Другую большую группу составляют полуправильные и неправильные долгопериодические переменные. У этих звезд все происходит более бурно, чем у цефеид, и не так правильно. Периоды исчисляются сотнями дней и непостоянны, т. е. промежуток времени между двумя соседними минимумами блеска изменяется. Светимость звезды изменяется в десятки раз и тоже неправильно — различны высоты максимумов и глубины минимумов. Для примера на рис. 4 приведена кривая блеска X Волос Вероники.

Процессы, происходящие в этих звездах, имеют еще больший размах, чем у цефеид, причем неправильность кривой блеска показывает, что они и сложнее — не сводятся к простому сжатию и расширению.

В этой книге невозможно перечислить все типы переменных звезд. Приведем еще кривые блеска R Северной Короны (рис. 5) и U Близнецов (рис. 6).

Переменные звезды замечательны тем, что их легко обнаружить среди других звезд. Это, например, очень удобно делать при помощи специального прибора блинк-компаратора, в котором на экране быстро подменяют друг друга фотографии одного и того же участка неба,

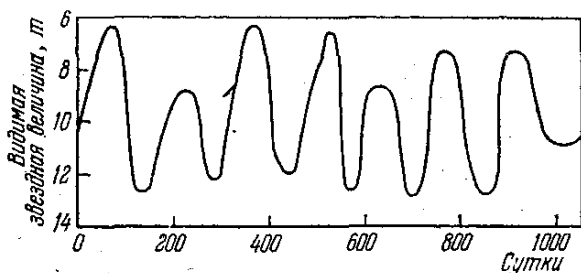


Рис. 4. Изменение блеска X Волос Вероники.

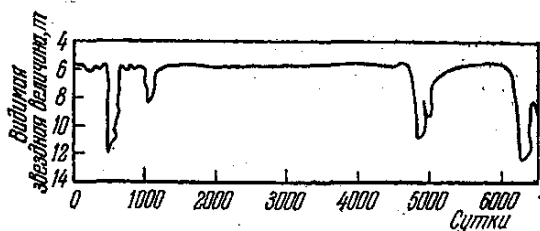


Рис. 5. Изменение блеска B Северной Короны.

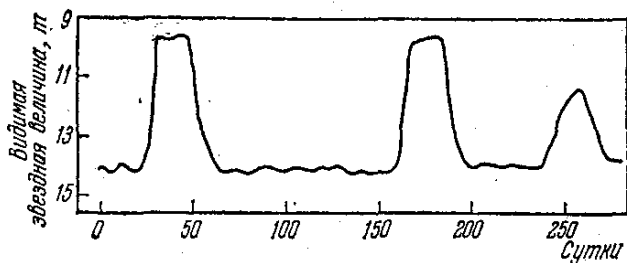


Рис. 6. Изменение блеска U Близнецов.

сделанные в различные моменты времени. Так как переменные звезды на этих фотографиях имеют различный блеск, то наблюдателю кажется, что они мигают, в то время как стационарные звезды неизменны. Вторая особенность состоит в том, что по кривой блеска, которую нетрудно построить, можно уверенно определить тип

переменной звезды, а это значит узнать все ее физические свойства, так как какой-нибудь находящийся близко к Солнцу экземпляр переменной звезды того же типа изучен подробно. Наконец, важно то, что переменные звезды в большинстве своем — это звезды высоких светимостей, гиганты и сверхгиганты, видимые на огромных расстояниях.

Все эти особенности делают переменные звезды незаменимым средством разведки. Это своего рода меченые атомы астрономии. Стоит в какой-нибудь области пространства в исследуемой системе оказаться переменной звезде, эта звезда будет легко обнаружена, будет определен ее тип, выяснены физические свойства, а это дает начало познанию самой системы, в состав которой входит переменная.

Переменным звездам посвящено большое количество наблюдений. Для этого используются все средства — от 6-метрового телескопа, позволяющего обнаружить переменные звезды в далеких галактиках, до самых малых инструментов любителей астрономии. Некоторые любители астрономии даже невооруженным глазом изучают изменение блеска переменной звезды Мира (Удивительная, или Дивная) Кита.

Центром, объединяющим эти наблюдения во всем мире, является Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга в Москве, где собираются все данные и издаются каталоги переменных звезд. В 1958 г. сотрудники ГАИШ Б. В. Кукаркин, П. П. Паренаго, П. Н. Холопов и Ю. Н. Ефремов организовали издание «Общего каталога переменных звезд». Третье издание этого каталога, вышедшее в 1970 г., содержит 20 437 звезд. Всего в каталоге насчитывается более 40 различных типов переменных звезд.

Новые и сверхновые звезды

Самая высокая степень изменчивости наблюдается у новых и сверхновых звезд. Эти звезды иногда, в отличие от обычных переменных звезд, называют взрывными звездами. Термин «новая» вошел в употребление потому, что наблюдатели обнаруживали звезду там, где ее раньше, казалось, не было. На самом деле старые фотографии всегда показывают, что точно на месте появившейся яр-

кой звезды раньше находилась слабая звездочка, так что речь должна идти не о возникновении звезды, которой раньше не было, а о сильной вспышке уже существующей звезды.

Явление обычно протекает так: звезда невысокой светимости (с M примерно равной $+6 - +8^m$), ранее ничем особенным себя не проявлявшая, вдруг чрезвычайно быстро начинает увеличивать свой блеск, в течение нескольких дней достигая -6 -й, -7 -й абсолютной звездной величины, т. е. сравниваясь в светимости с самыми мощными сверхгигантами. При этом, как нетрудно подсчитать, светимость звезды возрастает в сотни тысяч раз.

После того как звезда достигнет максимума блеска, она начинает ослабевать. На первых порах ослабление блеска происходит довольно быстро, хотя намного медленнее, чем его усиление во время вспышки. Затем падение блеска замедляется и сопровождается иногда отдельными новыми небольшими и короткими усилениями.

По истечении 10—20 лет после вспышки звезда возвращается в свое исходное состояние.

Вспышки новых звезд объясняются накоплением энергии в неглубоких слоях звезды и затем быстрым, сопровождаемым взрывом освобождением этой энергии. В результате взрыва вся оболочка звезды, расположенная над слоем, где произошло выделение энергии, отделяется от звезды и рассеивается в пространстве. При вспышке новой звезды в течение нескольких дней выделяется энергия порядка $10^{38} - 10^{39}$ Дж, т. е. равная энергии, которую Солнце излучает за 10 000—100 000 лет.

Масса газовой оболочки, выбрасываемой новой звездой, относительно невелика и составляет примерно сотысячную долю массы звезды. Этим объясняется то, что по истечении 10—20 лет звезда снова возвращается к исходному состоянию: испытанное ею потрясение благодаря малой потере массы носило временный характер.

Самая большая катастрофа, происходящая со звездой, это вспышка сверхновой звезды. Здесь приставка «сверх» употребляется для того, чтобы подчеркнуть необычайно большую мощность взрыва. Сверхновая в максимуме блеска имеет $M = -12 \div -18^m$; значит, в этот момент ее светимость равна светимостям сотен или многих тысяч обычных новых в высшей точке блеска. Во время вспышки сверхновой светимость звезды возрастает в миллиарды

раз. Выброс материи происходит со скоростью до 6000 км/с. Взрыв зарождается на большой глубине и выброшенная материя составляет значительную долю массы звезды, по крайней мере несколько процентов. Энергию взрыва можно оценить в $10^{42} - 10^{44}$ Дж — такую энергию Солнце излучает за миллиарды лет. По-видимому, вспышка сверхновой связана с существенным преобразованием природы звезды. После того как блеск самой

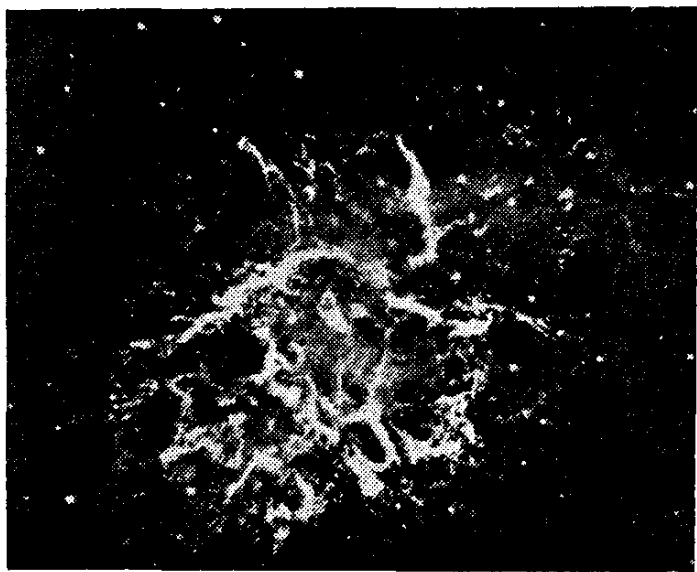


Рис. 7. Крабовидная туманность.

звезды снова упадет до исходной величины, нельзя сказать, что все стало по-старому, так как огромные массы выброшенных газов образуют туманность, обладающую специфическими свойствами. Сейчас астрономы умеют находить такие туманности — реликты сверхновых, вспышки которых произошли намного раньше, чем человек стал наблюдать небо. Наиболее известная из них — Крабовидная туманность (рис. 7) — сложное образование, являющееся результатом сравнительно недавней (1054 г.) вспышки сверхновой. Эта вспышка зарегистрирована в китайских летописях.

Диаграмма состава звездного населения

Можно наметить две группы физических характеристик звезд. В первой — спектральный класс, показатель цвета, температура поверхности, во второй — светимость и масса. В каждой группе характеристик достаточно знать одну, чтобы получить значения других характеристик этой группы. Но две характеристики, взятые из разных групп, взаимно независимы. Например, звезда данного спектрального класса может иметь и низкую, и высокую светимость.

Однако из того, что звезды данного спектрального класса могут иметь различную светимость, а звезды данной светимости — различный спектральный класс, еще не следует, что эти две характеристики совершенно независимы одна от другой. Из этого только следует, что зависимость между этими двумя характеристиками не настолько сильна, чтобы, зная одну из характеристик, мы могли определенно, достоверно получить значение другой характеристики.

Чтобы выяснить, нет ли какой-нибудь зависимости между спектральным классом и светимостью звезды, в начале нашего века два астронома, голландец Герцшпрунг и американец Рессел, независимо друг от друга построили специальную диаграмму. По горизонтальной оси диаграммы они откладывали последовательность спектральных классов от О до М, а по вертикальной абсолютные звездные величины звезд так, чтобы они убывали вверх по оси и, следовательно, светимости росли. Если определить спектральный класс и абсолютную звездную величину какой-нибудь звезды, то, восстановив из соответствующих мест осей перпендикуляры до их пересечения, мы найдем точку, положение которой в свою очередь однозначно задает эти две характеристики — спектральный класс и абсолютную величину звезды. Значит, каждая звезда изобразится на диаграмме точкой, и если изучается много звезд, то можно рассмотреть, как располагаются на диаграмме получаемые точки. Если бы зависимость между спектральным классом и абсолютной звездной величиной была тесная, то все точки на диаграмме располагались бы вдоль какой-то одной линии. Тогда, зная, например, спектральный класс звезды, можно было бы, восстановив из соответствующего места горизонтальной оси перпендикуляр до пересечения с этой

линией, определить абсолютную звездную величину звезды. Если же между спектральным классом и абсолютной звездной величиной нет никакой зависимости, то точки на диаграмме должны почти равномерно покрыть область, охватывающую все возможные значения спектральных классов и абсолютных звездных величин.

Если, наконец, между спектральным классом звезды и ее абсолютной звездной величиной имеется зависимость, но эта зависимость носит сложный характер, то на диаграмме должны образоваться различные области, в которых точки сосредоточены теснее, и области, в которых точки встречаются редко или отсутствуют вовсе.

Именно такая картина не сильной, но весьма сложной зависимости и представилась, когда Герцшпрунг и Рессел, а вслед за ними многие другие астрономы стали изучать диаграмму, которая теперь называется диаграммой спектр — светимость. Вид диаграммы, построенной сейчас для большого числа звезд на основании точных данных об их спектральных классах и абсолютных звездных величинах, представлен на рис. 8.

Мы видим, что точки на диаграмме располагаются вдоль пяти полос и не встречаются в других местах. Каждую полосу принято называть последовательностью и каждая последовательность получила свое название. Самая длинная последовательность, простирающаяся от спектрального класса О до М8, богато насыщенная звездами, называется главной последовательностью. К этой последовательности принадлежит больше всего звезд. В их числе и наше Солнце, отмеченное на диаграмме кружочком. Под главной последовательностью располагается последовательность субкарликов. Звезда-субкарлик излучает в 4—5 раз меньше света, чем звезда главной последовательности того же спектрального класса. Еще ниже располагаются последовательности белых карликов. Эти звезды называют так из-за их малой светимости, которая в 200—6000 раз меньше светимости звезд того же спектрального класса главной последовательности, а также потому, что среди них преобладают белые и желтые звезды. От главной последовательности, в том месте, где расположены звезды спектральных классов F и G, отходит ветвь красных гигантов. Наконец, в самом верху диаграммы расположена последовательность сверхгигантов — звезд наибольшей светимости, излучающих в десятки тысяч раз интенсивнее, чем наше Солнце.

Несмотря на то, что звезды принадлежащие к одной какой-нибудь последовательности, имеют различный спектральный класс и различную светимость, очевидно, что

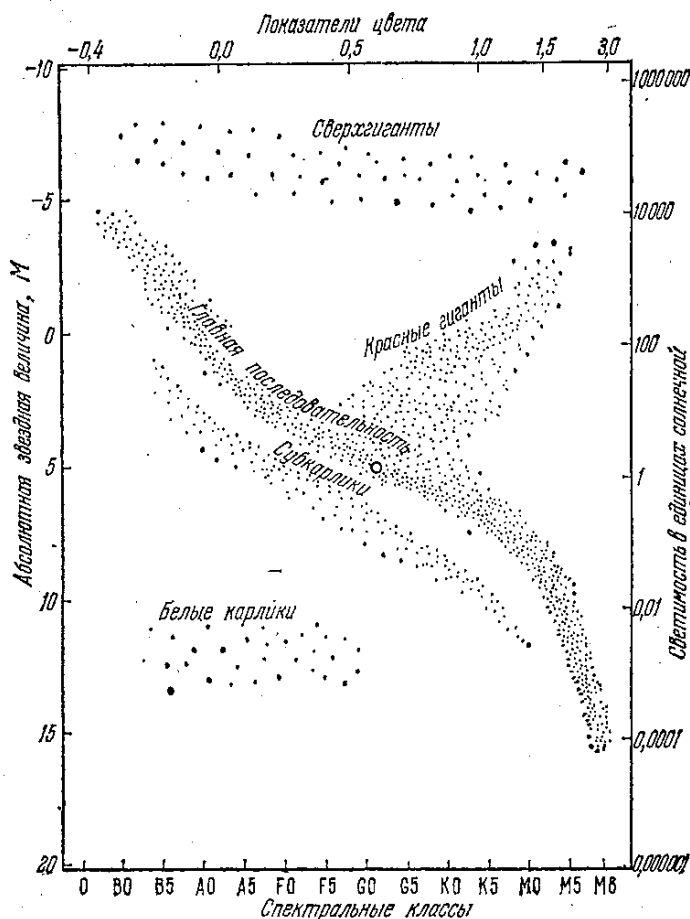


Рис. 8. Диаграмма спектр — абсолютная звездная величина.

их связывает какая-то общность. Трудно, конечно, сразу сказать, в чем состоит эта общность. Может быть, они сформировались в одной области Вселенной? Или имеют одинаковый возраст? Быть может, их роднит общность химического состава? Выяснением этого трудного вопроса

мы займемся позднее. Сейчас же отметим самый факт разбиения всего звездного населения на пять последовательностей — своеобразных звездных племен, звездных рас.

Нужно оговориться, что воспроизведенная здесь диаграмма спектр — светимость построена по звездам, окружающим Солнце. Нельзя заранее утверждать, что и в других звездных системах звездное население состоит из тех же последовательностей.

Как же многочисленны звезды различных последовательностей? Для того чтобы сделать эту оценку, необходимо учесть, что звезды-сверхгиганты благодаря их огромной светимости наблюдаются на очень больших расстояниях, а среди карликов видны только ближайшие к нам. Сверхгиганты наблюдаются из объема во много раз большего, чем карлики. Поэтому, чтобы перейти от видимых численностей сверхгигантов и карликов к их действительным численностям, нужно число карликов умножить на отношение объема пространства, в котором видны сверхгиганты, к объему пространства, в котором видны карлики. То же нужно проделать и в отношении других звезд. Если выполнить эти расчеты, то окажется, что наиболее многочисленны все-таки звезды главной последовательности, в особенности те из них, которые принадлежат спектральным классам К и М. Это — так называемые красные карлики. Среди ближайших звезд красные карлики составляют явное большинство. Поэтому ясно, что это самые многочисленные звезды. Самые же редкие звезды, как и следовало ожидать, сверхгиганты. На одного сверхгиганта приходится около 10 миллионов звезд главной последовательности, около миллиона белых карликов, 10 тысяч субкарликов, тысячи красных гигантов.

Нужно оговориться, что приведенные соотношения приблизительные и справедливы лишь для окружающего Солнца пространства. В других местах Вселенной могут быть совершенно иные соотношения. Мы увидим, что именно с этим и встретились исследователи других звездных систем.

Часто вследствие трудности определения спектральных классов определяют показатели цвета звезд и строят диаграмму показатель цвета — светимость. Она получается почти совершенно такой же, как и диаграмма спектр — светимость.

Собственные движения и лучевые скорости звезд

Еще лет двадцать назад слово «звезды» часто употребляли вместе с прилагательным «неподвижные», сохранившимся от старого противопоставления движущихся планет «неподвижным» звездам. Но звезды движутся, как и все в природе. Термин «неподвижные», по-видимому, больше никогда не найдет себе применения в астрономии. Правда, вследствие большой удаленности звезд их видимые смещения на небесной сфере происходят медленно и для их обнаружения требуется зачатейное искусство и терпение. Астрономы сравнивают положение звезд на двух фотографических пластинках, из которых вторая снята много лет спустя после первой. Обычно промежуток времени превосходит 20 лет и часто лицо, снявшее вторую пластинку, продолжает дело, начатое снявшим первую пластинку. Поделив обнаруженное смещение звезды, выраженное в секундах дуги, на число прошедших лет, находят так называемое собственное движение звезды — смещение звезды на небесной сфере в секундах дуги в год, вызванное ее движением поперек луча зрения. В табл. 5 приводится список десяти звезд с самым большим собственным движением. Естественно, что все эти звезды — близкие к Солнцу, иначе у них не могло бы быть больших собственных движений.

Точность определения собственного движения звезды зависит главным образом от величины промежутка времени, прошедшего между двумя снимками. Чем он больше, тем выше точность. Сейчас лучшие определения достигли точности $0'',001$ в год.

Скорости звезд поперек луча зрения составляют обычно 20—30 км/с. Если поперечная скорость равна 30 км/с, то можно подсчитать, что смещение $0'',001$ в год она даст, если расстояние до звезды равно 6000 пс. Значит, это предельное расстояние, до которого можно еще как-то обнаружить движение звезды поперек луча зрения. А чтобы определение было надежным, оно должно раз в пять превышать ошибку, которая в нем допущена. Значит, собственные движения могут быть надежны только у звезд, расстояния которых не превышают 1200 пс. Для более далеких звезд сейчас нет средств для определения их скорости поперек луча зрения. Но лучевую скорость, т. е. ту часть скорости, которая направлена к нам или от нас, измерить можно.

Лучевые скорости звезд удалось обнаружить при исследовании их спектров. Если источник, распространяющий какое-нибудь волновое движение — свет, радиоволны, звук и т. д. — приближается к нам, то число волн, достигающих нас в единицу времени, возрастает. Мы отметим увеличение частоты волнового движения и, следовательно, уменьшение его длины волны. Удаление же

Т а б л и ц а 5. Десять звезд с самым большим собственным движением

Название звезды	Собственное движение	Расстояние в парсеках
Звезда Барнарда	101,27	1,8
Звезда Каптейна	8,79	4,0
Лакайль 9352	6,87	3,7
BD — 37°15492	6,09	4,8
61 Лебеда	5,22	3,4
Вольф 389	4,84	2,5
Лаланд 21185	4,78	2,5
ε Индейца	4,67	3,4
ο Индейца	4,08	4,9
α Центавра	3,85	1,3

источника волнового движения вызовет уменьшение частоты колебаний и увеличение их длины волны. Величина этих изменений пропорциональна лучевой скорости и определяется законом Доплера

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (8)$$

т. е. приращение длины волны $\Delta\lambda$ так относится к самой длине волны, как лучевая скорость v источника излучения относится к скорости света c .

Для определения лучевой скорости звезды астрономы снимают на одну и ту же пластинку спектр звезды и спектр элементов (находящихся в лаборатории), линии которых видны в спектре звезды. Сравнивая положение линий в полученных спектрах, можно найти изменение длины волны, вызванное лучевой скоростью звезды, и тогда при помощи равенства (8) найти эту лучевую скорость. Если звезда движется от нас и расстояние ее увеличивается, лучевую скорость условились считать поло-

жительной. Соответственно лучевые скорости звезд, движущихся к нам, считаются отрицательными.

Точность определения лучевых скоростей зависит от качества спектров, от того, насколько резки и тонки, удобны для измерения положения имеющиеся в нем линии. Для спектров с удобными для измерений линиями точность может достигать 0,1 км/с. Разумеется, если спектр слабый и линии в нем не резкие, точность сильно падает. Но расстояние объекта не влияет на точность определения лучевой скорости, так как сама лучевая скорость не уменьшается с увеличением расстояния. Поэтому, как бы ни был далек объект, если удалось получить достаточно хороший его спектр, лучевая скорость может быть надежно определена.

ГАЛАКТИКА

Как была открыта Галактика

Важной особенностью небесных тел является их свойство объединяться в системы. Земля и ее спутник Луна образуют систему из двух тел. Так как размеры Луны не так уж малы в сравнении с размерами Земли, то некоторые астрономы даже склонны рассматривать Землю и Луну как двойную планету. Юпитер и Сатурн со своими спутниками — примеры более богатых систем. Солнце, девять планет с их спутниками, множество малых планет, комет и метеоров образуют систему более высокого порядка — Солнечную систему, в которую системы, состоящие из планет и их спутников, входят как коллективные члены.

Напрашивается вопрос, не образуют ли систем и звезды?

Первое систематическое исследование этого вопроса выполнил во второй половине 18 в. английский астроном Вильям Гершель. Гершель производил в разных областях неба подсчеты звезд, наблюдаемых в поле зрения его телескопа. Оказалось, что на небе можно наметить большой круг, пересекающий все небо на две равные части и обладающий тем свойством, что при приближении к нему с любой стороны число звезд, видимых в поле зрения телескопа, неуклонно возрастает и на самом круге становится наибольшим. Как раз вдоль этого круга, получившего название галактического экватора, стелется Млечный Путь — опоясывающая небо чуть светящаяся полоса, образованная сиянием слабых далеких звезд.

Гершель правильно объяснил обнаруженное им явление тем, что наблюдаемые нами звезды образуют гигантскую звездную систему, которая сплюснута к галактическому экватору.

И все же, хотя вслед за Гершелем исследованием строения нашей звездной системы Галактики занимались виднейшие астрономы — В. Струве, Зеелигер, Каптейн и другие, само представление о существовании Галактики как обособленной звездной системы являлось гипотетичным до тех пор, пока не были обнаружены объекты, находящиеся вне Галактики. Это произошло только в двадцатые годы нашего века, когда выяснилось, что спиралеподобные и некоторые другие туманности являются гигантскими звездными системами, находящимися на огромных расстояниях от нас и сравнимыми по строению и размерам с нашей Галактикой. Выяснилось, что существует множество других звездных систем — галактик, весьма разнообразных по форме и составу, причем среди них имеются галактики, очень похожие на нашу Галактику. Это обстоятельство оказалось очень важным. Наше положение внутри Галактики, с одной стороны, облегчает ее исследование, так как благодаря этому все составные части Галактики к нам ближе, чем составные части других галактик, а с другой стороны, затрудняет исследование, так как для изучения строения системы выгоднее рассматривать ее не изнутри, а со стороны. Легче составить план стеклянного строения, рассматривая его извне, чем находясь внутри одной из его комнат.

Форма Галактики

Изучая Галактику по распределению в ней звезд различных типов и сопоставляя ее с другими галактиками, удалось выяснить основные черты строения нашей звездной системы. Форма Галактики напоминает круглый сильно сжатый диск. Как и диск, Галактика имеет плоскость симметрии, разделяющую ее на две равные части, и ось симметрии, проходящую через центр системы и перпендикулярную к плоскости симметрии. Сравнение с диском имеет тот недостаток, что у всякого диска есть точно обрисованная поверхность — граница. У нашей звездной системы такой четко очерченной границы нет, так же как нет четкой верхней границы у атмосферы Земли. Известно, что плотность атмосферы с увеличением высоты уменьшается, постепенно сходя на нет, и нельзя указать такого места, до которого атмосфера простирается и сразу за которым она уже отсутствует. В Галактике звезды располагаются тем теснее, чем ближе данное место к плос-

кости симметрии Галактики и чем ближе оно к ее плоскости симметрии. Наибольшая звездная плотность в самом центре Галактики. Здесь на каждый кубический парсек приходится несколько тысяч звезд, т. е. в центральных областях галактики звездная плотность во много тысяч раз больше, чем в окрестностях Солнца. При удалении от плоскости и оси симметрии звездная плотность убывает, причем при удалении от плоскости симметрии она убывает значительно быстрее. Поэтому если бы мы условились считать границей Галактики те места, где звездная плотность уже очень мала и составляет, например, только одну звезду на 1000 пс^3 (т. е. в 130 раз меньше, чем в окрестности Солнца), то очерченное этой границей тело было бы сильно сжатым круглым диском. Если границей считать область, где звездная плотность еще меньше и составляет одну звезду на $10\,000 \text{ пс}^3$, то снова очерченное границей тело будет диском примерно той же формы, но только больших размеров. Поэтому нельзя вполне определенно говорить о размерах Галактики. Если все-таки границами нашей звездной системы считать места, где одна звезда приходится на 1000 пс^3 пространства, то диаметр Галактики приблизительно равен $30\,000 \text{ пс}$, а ее толщина 2500 пс . Таким образом, Галактика — действительно сильно сжатая система: ее диаметр в 12 раз больше толщины. Как велики размеры Галактики, можно судить по тому, что свет, затрачивающий лишь полсутки, чтобы пройти «от края до края» всю Солнечную систему, должен путешествовать около $100\,000$ лет, чтобы пересечь Галактику по диаметру. Солнце находится почти точно в плоскости симметрии Галактики, но от оси симметрии (и, следовательно, от центра) оно отстоит далеко — на расстоянии около $10\,000 \text{ пс}$, т. е. оно ближе к краю Галактики, чем к ее центру.

Количество звезд в Галактике огромно. По современным данным оно превосходит сто миллиардов, т. е. примерно в двадцать пять раз превосходит численность жителей нашей планеты.

Газовая материя в Галактике

Существование газа в пространстве между звездами впервые было обнаружено по присутствию в спектрах звезд линий поглощения, вызываемых межзвездным кальцием и межзвездным натрием. Эти линии образуют-

ся не в атмосферах самих звезд, так как они одинаковы для всех звезд, в то время как другие линии могут быть интенсивны, слабы или вовсе отсутствовать в зависимости от температуры поверхности звезды. Кроме того, лучевая скорость, определенная по линиям межзвездного кальция и натрия, существенно отлична от лучевой скорости, согласованно получаемой по линиям спектра, принадлежащим самой звезде. Это и понятно, потому что межзвездные кальций и натрий заполняют все пространство между наблюдателем и звездой и со звездой непосредственно не связаны.

После кальция и натрия было установлено присутствие кислорода, калия, титана и других элементов, а также некоторых молекулярных соединений: циана CN, углеводорода CH и других.

Плотность межзвездного газа можно определить по интенсивности его линий. Как и следовало ожидать, она оказалась очень малой. Плотность межзвездного натрия, например, близ плоскости Галактики, т. е. там, где он наиболее плотен, соответствует одному атому на $10\,000\text{ см}^3$ пространства. Напомним для сравнения, что в обычных земных условиях в 1 см^3 воздуха содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул.

Долгое время не удавалось обнаружить межзвездный водород, хотя в звездах он самый обильный газ. Это объясняется особенностями физического строения атома водорода и характером поля излучения в Галактике.

В межзвездном пространстве не только очень мала плотность вещества, но и ввиду огромных расстояний между звездами чрезвычайно низка плотность излучения. В подавляющем большинстве мест Галактики плотность излучения такая же, какой она была бы у нас на Земле, если убрать Солнце, Луну, планеты, все земные источники света и оставить сиять одни звезды.

В таких условиях атомам межзвездного газа очень редко удастся наткнуться на световой квант и поглотить его. Но время от времени это все же происходит. Если энергия кванта была велика, атом ионизируется, теряет электрон и в этом состоянии находится долго, так как плотность материи очень мала, в том числе очень мало вокруг свободных электронов, с одним из которых можно было бы вновь составить нейтральный атом.

Если поглощенный квант имел небольшую энергию, атом не ионизируется, а возбуждается, электрон не отрыва-

ется, но переходит на другую орбиту. В возбужденном состоянии атом может оставаться лишь ничтожную долю секунды. Он возвращается в обычное, как говорят, в основное состояние, излучив квант той самой частоты, какую поглотил.

Поэтому практически все атомы межзвездного газа находятся либо в основном нейтральном, невозбужденном состоянии, либо в ионизованном состоянии. Число атомов, находящихся в какой-нибудь момент в возбужденном состоянии, совершенно ничтожно.

Атомы нейтрального водорода, чтобы перейти в возбужденное состояние, поглощают квант весьма высокой частоты. При этом образуется линия поглощения. Но эта линия лежит в далекой ультрафиолетовой части спектра, той части спектра, которая при обычных наблюдениях вовсе не получается в спектрах звезд, так как далекое ультрафиолетовое излучение полностью поглощается атмосферой Земли. Лишь в наши дни, используя спутники и высотные ракеты для внеатмосферных наблюдений, можно поставить задачу выявления линий поглощения нейтрального водорода. И это уже сделано для спектра Солнца.

Ионизованный водород вовсе неспособен поглощать излучение, так как ион водорода состоит из одного протона без электронов. А возбужденных атомов нейтрального водорода в межзвездном пространстве чрезвычайно мало. Именно возбужденные атомы водорода создают линии поглощения водорода в атмосферах звезд. Чтобы перейти в еще более высокое возбужденное состояние, уже возбужденный атом водорода поглощает квант не очень высокой энергии, с частотой, соответствующей видимой области спектра, где и образуются линии поглощения. В атмосферах звезд возбужденных атомов много, так как там очень высока плотность излучения. Вот почему в атмосферах звезд водород дает четко наблюдаемые линии, а межзвездный водород оказался таким трудноуловимым.

Но все-таки его удалось обнаружить, однако не по линиям поглощения, а по светлым (эмиссионным) линиям.

Если спектрограф наведен на лишенный звезд участок неба, в поле зрения попадет только толща межзвездной материи. Находящиеся в ней ионы водорода, встречаясь со свободными электронами и объединяясь с ними, должны в момент соединения излучать такой квант све-

та, какой нужно было поглотить при ионизации. Часто в следующее после объединения мгновение атом оказывается в высоком возбужденном состоянии, после чего он не обязательно сразу переходит в основное невозбужденное состояние, а может спускаться к нему каскадом, излучая несколько квантов, в том числе и кванты в видимой части спектра. В спектре неба на темном фоне появятся эмиссионные линии водорода. Именно таким путем был непосредственно обнаружен межзвездный водород.

Измерение интенсивности его линий подтвердило, что и в пространствах между звездами водород самый обильный газ, число его атомов приблизительно в тысячу раз превосходит число атомов всех остальных элементов, вместе взятых.

Близ плоскости Галактики один атом водорода приходится на $2-3 \text{ см}^3$ пространства. Это значит, что плотность всей газовой материи около плоскости Галактики составляет $5-8 \cdot 10^{-25} \text{ г/см}^3$, масса газа других элементов ничтожно мала. О чрезвычайно малой плотности межзвездного газа можно составить представление с помощью такого подсчета: обыкновенный выдох, совершаемый человеком, способен создать в кубе с ребром в 400 км плотность газа, равную плотности межзвездного газа.

Распределен межзвездный газ неравномерно, местами образуя облака с плотностью в десятки раз выше средней, а местами создавая разрежения. При удалении от плоскости Галактики средняя плотность межзвездного газа быстро падает. Общая его масса в Галактике составляет 0,01—0,02 общей массы всех звезд.

Звезды — горячие гиганты, излучающие большое количество ультрафиолетовых квантов, ионизуют весь межзвездный водород в значительной области вокруг себя. Размер зоны ионизации в очень большой степени зависит от температуры и светимости звезды. Расчет показывает, что при плотностях межзвездного водорода 2—0,5 атома на 1 см^3 около звезды спектрального класса O весь водород ионизован внутри сферы с радиусом 30—100 пс. Около звезды B1 радиус зоны ионизации составляет 10—30 пс, около звезды B2 — 4—12 пс и т. д. Радиус зоны ионизации очень быстро уменьшается по мере перехода к более поздним спектральным классам и уже для звезд A0 он составляет малую долю парсека. Вне зон ионизации почти весь водород находится в нейтральном состоянии.

Таким образом, все пространство Галактики можно разделить на зоны, где водород не ионизован (эти зоны принято называть зонами Н I), и зоны ионизованного водорода (зоны Н II). Как показал теоретически датский астроном Стремгрен, границы между зонами Н I и Н II всегда резкие, постепенного перехода от области, где водород практически весь ионизован, к области, где он весь нейтрален, нет.

В тех случаях, когда звезды — горячие гиганты расположены сравнительно близко друг к другу, зоны Н II около этих звезд сливаются в одну общую зону ионизованного водорода.

Зоны Н II излучают, как мы поясняли выше, эмиссионные линии водорода, образующиеся при переходах атома после соединения иона со свободным электроном из высоких возбужденных состояний в более низкие. Наиболее интенсивной из наблюдаемых линий при этом оказывается линия H_{α} с длиной волны 6563 Å, возникающая при переходе атома из второго возбужденного состояния в первое возбужденное состояние. Эта линия расположена в красной части спектра. Поэтому для выявления областей ионизованного водорода фотографируют участки неба с помощью фильтров, пропускающих излучение только в узкой части спектра около области 6563 Å, т. е. вблизи места нахождения линии H_{α} . На таких фотографиях относительная яркость зоны Н II, интенсивно излучающей линию H_{α} , в сравнении с другими объектами значительно повышается и ее можно выделить.

Общий объем областей Н II в Галактике приблизительно в 10 раз меньше объема областей нейтрального водорода.

Около трех десятков лет назад было сделано еще одно крупное открытие, связанное с межзвездным газом. Оказалось, что нейтральный водород излучает эмиссионную линию с длиной волны 21 см. Это низкочастотное излучение, находящееся в диапазоне радиоволн, вызывается тем, что невозбужденный нейтральный водород может находиться в двух энергетически близких состояниях, отличающихся друг от друга совпадением или несовпадением ориентаций магнитных полей протона и электрона, образующих ядро атома водорода. Переходы с более высокого из этих уровней (когда магнитные моменты антипараллельны) на другой (когда магнитные моменты

параллельны), время от времени происходящие то с одним атомом, то с другим, сопровождаются излучением квантов с длиной волны 21 см. Хотя каждый атом излучает такой квант очень редко, большое число нейтральных атомов водорода, всегда находящихся на луче зрения (особенно большое при наблюдении в направлениях, близких к галактическому экватору), обеспечивает достаточную интенсивность линии, чтобы можно было ее наблюдать с радиотелескопами умеренных размеров.

Вращение Галактики

Так как простирающиеся вдоль луча зрения массы нейтрального водорода находятся в различных местах Галактики и имеют различную лучевую скорость, их излучения вследствие эффекта Доплера различным образом смещены относительно длины волны 21 см. Эмиссионная линия расширяется и для каждого направления принимает особую форму, отражающую все лучевые движения нейтрального водорода, которые происходят в этом направлении.

В настоящее время разработан метод определения закона вращения всей массы нейтрального водорода Галактики по совокупности профилей его эмиссионной линии 21 см для различных направлений. Можно полагать, что нейтральный водород в Галактике вращается так же или почти так же, как вращается сама Галактика. Тогда становится известным и закон вращения Галактики. Этот метод в настоящее время дает наиболее надежные данные о законе вращения нашей звездной системы, т. е. данные о том, как изменяется угловая скорость вращения системы по мере удаления от центра Галактики к ее окраинным областям.

Результаты такого определения, выполненного И. В. Петровской, Б. И. Фесенко и автором этой книги по профилям линий, полученным голландскими и австралийскими астрономами, приведены на рис. 9. Для центральных областей Галактики угловую скорость вращения пока определить не удастся. Как видно, угловая скорость вращения Галактики убывает по мере удаления от ее центра сначала быстро, затем медленнее. На расстоянии 8 кпс от центра угловая скорость равна $0''.0061$ в год. Это соответствует периоду обращения 212 млн. лет. В районе Солнца (10 кпс от центра Галак-

тики) угловая скорость равна $0'',0047$ в год, период обращения 275 млн. лет. Обычно именно эту величину — период обращения Солнца вместе с окрестными звездами около центра нашей звездной системы — считают периодом вращения Галактики и называют галактическим годом. Но нужно понимать, что общего периода вращения для Галактики, нет, она вращается не как твердое тело.

Закон изменения линейной скорости вращения, равной произведению угловой скорости на расстояние от центра, становится ясным из рис. 10. В районе Солнца скорость равна 220 км/с . Это значит, что в своем движении вокруг центра Галактики Солнце и окрестные звезды пролетают в секунду 220 км .

Рис. 9. Закон изменения угловой скорости вращения в Галактике.

Явление вращения Галактики было обнаружено и до применения радиометодов. Первые исследования, посвященные этому вопросу, принадлежали астроному Казанской обсерватории М. А. Ковальскому, который в 1860 г. дал математическое обоснование метода и получил необходимые рабочие формулы. Однако ввиду отсутствия в то время необходимых наблюдательных данных Ковальский не использовал выведенные им формулы. В 1927 г. голландский астроном Оорт вывел аналогичные формулы и, используя накопившийся к тому времени наблюдательный материал, получил уверенные данные о вращении Галактики. Более общий метод исследования вращения нашей звездной системы разработал в 1932 г. советский астроном К. Ф. Огородников.

Основная идея метода состоит в том, что звездная система должна вращаться не так, как твердое тело: не подобно патефонной пластинке, все точки которой опи-

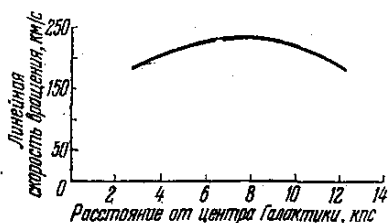
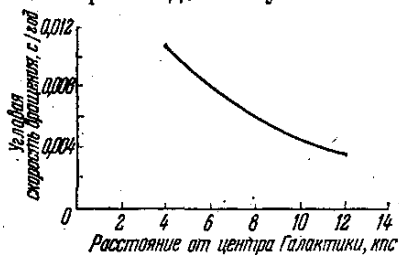


Рис. 10. Закон изменения линейной скорости вращения в Галактике.

сывают круг за один и тот же промежуток времени, а подобно вращающейся жидкости в тазу — угловая скорость вращения уменьшается с удалением от центра.

Примером такого вращения является вращение Солнечной системы. Все тела этой системы — большие и малые планеты, большинство комет и метеорные тела — обращаются вокруг Солнца в одном направлении. Поэтому можно говорить о вращении всей Солнечной системы в целом, но при этом периоды обращений отдельных тел различны. Согласно третьему закону Кеплера они пропорциональны большим полуосям орбит, возведенным в степень $\frac{3}{2}$. Это значит, что угловая скорость вращения Солнечной системы быстро падает с удалением от Солнца.

Предположим, что Галактика вращается и угловая скорость, с которой вращаются звезды, уменьшается с увеличением расстояния от центра Галактики, хотя и не обязательно по закону Кеплера.

Рис. 11 показывает, что в этом случае вращение Галактики должно определенным образом отразиться на лучевых скоростях окрестных звезд, лежащих в плоскости Галактики. На этом рисунке буквой *S* обозначено Солнце, а цифрами — восемь соседних звезд. Согласно нашему предположению звезды 6, 7, 8, будучи ближе расположены к центру Галактики, должны двигаться быстрее, чем звезды 1, 5 и Солнце, а последние в свою очередь быстрее звезд 2, 3, 4. Звезда 1 движется с такой же скоростью, что и Солнце, поэтому эффект галактического вращения не должен сказаться на ее лучевой скорости. Иное дело звезда 2. Она движется медленнее Солнца, Солнце ее нагоняет, расстояние между ними уменьшается, поэтому вследствие вращения Галактики звезда будет иметь лучевую скорость, направленную к нам, т. е. отрицательную лучевую скорость. Звезду 3 Солнце тоже обгоняет, но их взаимное положение таково, что при этом расстояние между ними не изменяется. Это значит, что на лучевой скорости звезды галактическое вращение не скажется. От

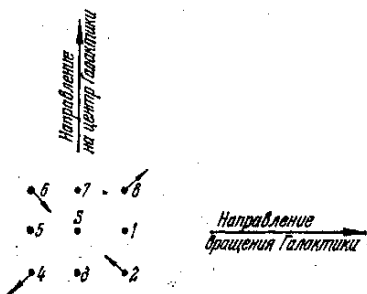


Рис. 11. Влияние вращения Галактики на лучевые скорости звезд.

звезды 4 Солнце уходит, расстояние между ними возрастает, значит, галактическое вращение придает звезде 4 лучевую скорость, направленную от нас, т. е. положительную лучевую скорость. Продолжая рассуждения, мы придем к выводу, что на лучевые скорости звезд 5 и 7 галактическое вращение не повлияет, у звезды 6 оно вызовет отрицательную, а у звезды 8 положительную лучевые скорости. Все направления лучевых скоростей, вызываемых тем, что Галактика вращается не как твердое тело, на рис. 11 обозначены стрелками.

Наблюдения показывают, что именно такой ход лучевых скоростей, как на рис. 11, в действительности наблюдается у звезд. Величины лучевых скоростей и степень их изменчивости в разных направлениях позволили узнать основные данные о вращении Галактики в окрестностях Солнца. Получается, что период вращения Галактики в районе Солнца равен приблизительно 275 млн. лет, а области, расположенные от центра Галактики дальше Солнца, совершают оборот медленнее: период вращения растет на 1 млн. лет при увеличении расстояния от центра Галактики приблизительно на 30 пс. Аналогичные результаты дает исследование собственных движений соседних с Солнцем звезд. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными при помощи радиометодов.

Такая взаимопроверка различных методов чрезвычайно важна. Она полностью подтверждает правильность разработанных методов и верность наших представлений. Ведь в трех методах используется совершенно разный материал. Лучевые скорости звезд получены по сдвигам линий в их спектрах. Собственные движения получены по смещению их изображений на двух пластинках, снятых с промежутком времени в несколько десятков лет. Наконец, профили линий нейтрального водорода определены при помощи радиотелескопов, настроенных на длину волны 21 см.

Поскольку всеми тремя методами, получаются практически одинаковые характеристики вращения Галактики в районе Солнца, то это означает не только подтверждение реальности этого вращения, но также и доказательство справедливости наших предположений о том, что сдвиг линий в спектрах звезд вызывается лучевой скоростью звезд, а видимое смещение звезд на небе — скоростью, перпендикулярной к лучу зрения, что сложный профиль линии нейтрального водорода вызван раз-

личным периодом вращения вокруг центра Галактики масс водорода, находящихся на пути зрения. Но лучевые скорости и собственные движения звезд позволяют получить характеристики вращения Галактики только для окрестностей Солнца. Угловые скорости обращения других областей нашей звездной системы, более близких к центру, или более далеких, чем Солнце, по лучевым скоростям или собственным движениям определяются очень неуверенно. Это связано с тем, что свет далеких звезд, лежащих в плоскости Галактики, сильно поглощается темной пылевой материей.

Сравним скорости всех изученных космических движений, в которых участвует человек:

скорость вращения Земли вокруг оси — на экваторе около 0,5 км/с, на других широтах меньше 0,5 км/с;

скорость движения Земли вокруг совместного с Лунной центра инерции — около 0,013 км/с;

скорость движения Земли вокруг Солнца — около 30 км/с;

скорость движения Солнечной системы по отношению к окрестным звездам — около 20 км/с;

скорость движения Солнечной системы и окрестных звезд вокруг центра Галактики — около 220 км/с.

Как видно, скорость обращения около центра Галактики значительно превосходит скорости остальных космических движений. Она, конечно, намного больше и скоростей всех остальных движений, какие может совершать человек. Поэтому можно сказать, что основное наше движение — это участие во вращении около центра Галактики со скоростью 220 км/с.

Пылевая материя в Галактике

Кроме газа, в пространстве между звездами имеются пылинки. Размеры их очень малы (радиусы порядка 10^{-4} — 10^{-5} см) и располагаются пылинки на значительных расстояниях друг от друга; среднее расстояние между пылинками-соседями, даже около плоскости Галактики, где они располагаются теснее всего, составляет около ста метров. Поэтому средняя плотность пылевой материи еще ниже, чем средняя плотность межзвездного газа. Общая масса пылевой материи Галактики примерно в 100 раз меньше общей массы газа и, следовательно, в 5000—10 000 раз меньше общей массы всех звезд.

Поэтому динамическая роль пыли в Галактике весьма незначительна. Основная ее роль фотометрическая, состоящая в том, что ... пылевая материя мешает астрономам изучать Галактику и внегалактические объекты. Благодаря ей Вселенная погружена в серый туман. В обычном тумане близкие предметы видны хорошо, на их видимость туман почти не влияет, а далекие предметы скрыты непроницаемой завесой; так и в Галактике близкие звезды почти не испытывают поглощения света, а далекие ослабляются сильно. Как в тумане желтые и красные фонари видны на больших расстояниях, чем белые фонари той же яркости (в Манчестере, городе туманов, уличное освещение оранжевого цвета), так и в Галактике пылевая материя сильнее поглощает голубые и синие лучи, чем желтые и красные, и свет белых звезд ослабляется сильнее света оранжевых и красных звезд. Как в тумане мы не видим света мощного прожектора, находящегося на расстоянии 1 км, но ясно наблюдаем высоко стоящую на небе Луну, удаленную от нас на 380 000 км, так и в Галактике свет звезды, лежащей в галактической плоскости и удаленной от нас на расстояние в 3 кпс, ослаблен намного сильнее, чем свет шарового скопления, наблюдаемого на большом удалении от плоскости Галактики и находящегося на расстоянии 30 кпс. Это объясняется тем, что как туман стелется у поверхности Земли, так и пылевая материя сконцентрирована в плоскости Галактики. В направлениях, составляющих значительный угол с этой плоскостью, влияние пылевой материи дальше некоторого сравнительно небольшого расстояния уже не усиливается.

В некотором отношении туман, в который погружена Галактика, существенно (учитывая интересы астрономов — в худшую сторону) отличается от тумана, который мы наблюдаем на Земле. Отличие состоит в том, что вся масса пылевой материи имеет крайне неоднородную структуру. Она не распределена гладким слоем, а собрана в отдельные облака различной формы и размеров. Поэтому поглощение света в Галактике носит, так сказать, пятнистый характер. Это весьма усложняет возможность учитывать поглощение, вносить за него поправки.

Если бы поглощение света отсутствовало, можно было бы, определив спектральный класс звезды и измерив ее видимую звездную величину, вычислить расстояние

до нее. В самом деле, по спектру звезды можно определить не только спектральный класс, но и последовательность, к которой она принадлежит. Тогда по диаграмме спектр — светимость определяется абсолютная звездная величина звезды, после чего по формуле, которую мы уже приводили на с. 18, но написанной иначе,

$$\lg r = \frac{1}{5} m - \frac{1}{5} M + 1, \quad (9)$$

можно вычислить расстояние. Определяемые таким способом расстояния называются фотометрическими.

Однако формула (9) выведена в предположении, что межзвездное пространство абсолютно прозрачно. В этой формуле m означает ту видимую звездную величину, которую имела бы звезда, если бы в межзвездном пространстве полностью отсутствовало поглощение света. Но мы наблюдаем видимую звездную величину, искаженную поглощением света. Чтобы все-таки использовать формулу (9), нужно сначала исправить наблюденную видимую звездную величину за поглощение света. К сожалению, это исправление выполняется неуверенно из-за неоднородности поглощения света, и чем больше расстояние, чем в среднем больше поглощение света, тем больше относительная ошибка в определении расстояния. Особенно неточны фотометрические расстояния до звезд, находящихся близ плоскости Галактики, так как в их направлениях поглощение света особенно значительно.

В среднем звезда, находящаяся на расстоянии 1 кпс и лежащая в галактической плоскости, ослабляется на 2^m . Это означает, что если бы не учитывали поглощения света и оценивали расстояние по формуле (9), то получили бы вместо 1 кпс ошибочное расстояние 2,5 кпс.

По пятнистому характеру поглощения света можно оценить среднюю величину поглощения, вызываемого одним пылевым облаком. Для этого В. А. Амбарцумян разработал изящную теорию. Оказалось, что одно пылевое облако в среднем ослабляет свет звезды на $0^m,25-0^m,30$.

Пылевая и газовая материя в Галактике обычно перемешаны, но пропорции их в различных местах различны. Встречаются газовые облака с очень небольшой примесью пыли и облака, в которых пыль преобладает. Для обозначения рассеянной в Галактике материи — газа, пыли и смеси газа и пыли — употребляется общий термин «диффузная материя».

Ядро Галактики

Форма Галактики несколько отличается от диска тем, что в центральной части ее имеется утолщение, ядро. Это ядро, хотя в нем сосредоточено большое число звезд, долгое время не удавалось наблюдать, потому что около плоскости симметрии Галактики наряду со светящейся материей звезд имеются огромные темные облака пыли, поглощающие свет лежащих за ними звезд. Между Солнцем и центром Галактики расположено большое количество таких темных пылевых облаков различной формы и



Рис. 12. Вид Галактики при наблюдении ее с ребра.

толщины, и они закрывают от нас ядро Галактики. Однако разглядеть ядро Галактики все-таки удалось. Астрономы воспользовались тем, что пылевые обла-

ка поглощают сильно лишь фиолетовые, синие и зеленые лучи. Более длинноволновые желтые и красные лучи они поглощают слабее, а для еще более длинноволновых инфракрасных лучей пылевые облака почти полностью прозрачны. Значит, нужно применить инструменты, способные измерять излучение в инфракрасном свете. В 1947 г. американские астрономы Стеббинс и Уитфорд использовали совместно с телескопом фотоэлемент, чувствительный к инфракрасным лучам, и сумели обрисовать контуры ядра Галактики. В 1951 г. советские астрономы А. А. Калиняк, В. И. Красовский и В. Б. Никонов, применив электронный преобразователь, усиливающий во много раз яркость изображений, получили фотографии ядра Галактики в инфракрасных лучах. Ядро Галактики оказалось не очень большим, его диаметр составляет около 1300 пс. Но все-таки присутствие ядра в центральной области Галактики утолщает эту область, форму Галактики теперь можно сравнивать не просто с диском, а с дискообразным колесом, имеющим в центральной части утолщение — втулку.

При наблюдении со стороны, с ребра, Галактика должна выглядеть так, как показано схематически на рис. 12. На этом рисунке показано и место, занимаемое Солнцем в Галактике, а также полоса, состоящая из темных пылевых облаков, тянущаяся вдоль плоскости симметрии Галактики.

В том, что наша Галактика со стороны имеет вид, изображенный на рис. 12, нас убеждают также другие галактики, имеющие звездный состав, схожий со звездным составом нашей Галактики, и наблюдаемые с ребра. На рис. 13 приведена фотография одной из таких галактик.

Центр ядра Галактики — это центр всей нашей звездной системы. Поэтому его строение представляет особый интерес. Подробно изучить область около центра



Рис. 13. Галактика NGC 5907, сходная с нашей Галактикой, наблюдаемая с ребра.

Галактики удалось при помощи радионаблюдений, выполненных на длине волны 1,9 см в 1965 г., и наблюдений в инфракрасном свете с длиной волны 2,2 мкм в 1968 г. Это излучение вызывается главным образом горячей диффузной материей, расположенной в ядре. Вот так выглядят «рентгеновские» снимки (но не в рентгеновских, а напротив, в длинноволновых лучах) центра нашей звездной системы. Рис. 14 и 15 показывают полученную картину изофот (линий одинаковой яркости) радионизлучения и инфракрасного излучения соответственно. В обоих случаях самый центр обозначается как будто бы четко. Но положения центра на двух рисунках не вполне совпадают. И очертания изофот прилегающей области на рисунках различно. Следовательно, центр нашей звездной системы имеет сложное строение. Одни

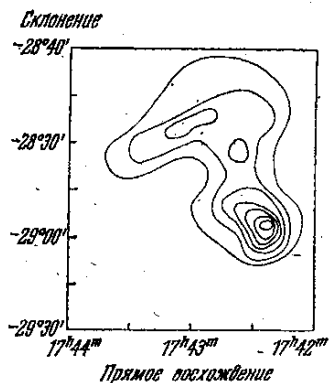


Рис. 14. Изофоты радиоизлучения центра Галактики ($\lambda = 1,9$ см).

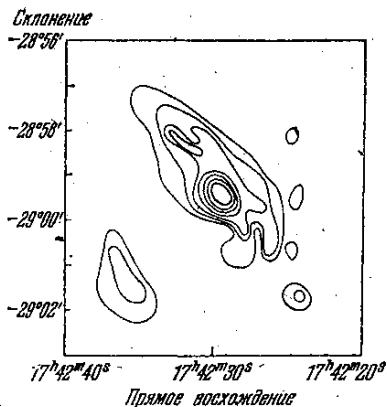


Рис. 15. Изофоты инфракрасного излучения центра Галактики ($\lambda = 2,2$ мкм).

области его излучают сильнее в длине волны 1,9 см, а в длине волны 2,2 мкм более интенсивны другие. Все это указывает на то, что материя в центре Галактики имеет высокую температуру и находится в состоянии бурного движения.

Двойные и кратные звезды

Внутри огромной звездной системы — Галактики многие звезды объединены в системы меньшей численности. Каждая из этих систем может рассматриваться как коллективный член Галактики.

Самые маленькие коллективные члены Галактики — это двойные и кратные звезды. Так называются группы из двух, трех, четырех и т. д. до десяти звезд, в которых звезды удерживаются близко друг к другу благодаря взаимному притяжению согласно закону всемирного тяготения. В Солнечной системе притяжение огромного массивного тела, Солнца, удерживает планеты и другие тела системы, заставляет их двигаться по замкнутым орбитам, не позволяет системе распасться. В двойных и кратных звездах таких огромных тел — звезд (солнц) два или несколько. Они притягивают друг друга, удерживают друг друга и, возможно, другие тела меньших масс (подобные планетам Солнечной системы) внутри сравнительно небольшого объема. Следовательно,

это физические системы тел, связанных между собой силами тяготения. Доля двойных и кратных звезд среди всех звезд значительна. Правда, наша звезда — Солнце, хотя и окружено системой планет, не является двойной или кратной звездой. Солнце — одипочная звезда. Но уже следующая ближайшая к нам звезда, α Центавра, является тройной звездой. Если в этой тройной звезде имеются и планеты с развитой на них жизнью, то обитатели планет должны видеть на своем небе три солнца — одно желтое и яркое, как наше, второе — несколько менее яркое, оранжевое, и третье — красноватое, сильно уступающее первым двум в блеске, но все-таки это солнце, согревающее и освещающее все кругом.

Расстояния, разделяющие компоненты двойных звезд, могут быть весьма различны. У тесных двойных они так близки друг к другу, что происходят сложные физические процессы взаимодействия, связанные с явлениями приливов и перетеканием газовых масс от одного компонента к другому. Периоды обращений в таких системах измеряются часами или сутками.

В широких же парах расстояния между компонентами составляют десятки тысяч астрономических единиц, периоды обращений столь велики, что измеряются тысячелетиями и орбитальное движение при наблюдениях не удастся обнаружить. Связанность компонент в таких системах определяют по их относительной близости на небе и по общности собственного движения.

У пар, в которых расстояния между компонентами не так велики, орбитальное движение уверенно обнаруживается: за прошедшее время наблюдений компоненты прошли заметные дуги по своим орбитам. Такие двойные звезды называют визуальными двойными. Если пройденные дуги составляют значительную часть всей орбиты — эллипса, то можно достаточно надежно вычислить все характеристики орбиты, так называемые элементы ее: величину большой оси, эксцентриситет, период обращения, наклон плоскости орбиты к лучу зрения, положение периастрия — точки, в которой компоненты максимально сближаются. Можно также определить массы компонентов. В настоящее время элементы орбит вычислены для более чем 500 визуальных двойных звезд. А общее число зарегистрированных визуальных двойных превысило 60 тысяч.

У тесных двойных звезд компоненты настолько близко расположены друг к другу, что блеск их сливается в общий блеск и они не различимы отдельно даже в сильные телескопы. Двойственность такой звезды обнаруживается (если плоскость орбиты не перпендикулярна лучу зрения) благодаря тому, что вследствие орбитального движения изменяется лучевая скорость компонентов. Линии в спектрах таких звезд, называемых спектроскопическими двойными, смещаются то в одну, то в другую сторону. Измеряя эти смещения, исследуя, как они изменяются в зависимости от времени, можно определить элементы орбит.

В настоящее время известны элементы орбит у более чем 750 спектроскопических двойных, а общее число обнаруженных спектроскопических двойных превзошло 2500.

Наконец, еще у более тесных двойных звезд, если плоскость орбиты составляет небольшой угол с лучом зрения, компоненты при орбитальном движении периодически затмевают друг друга. Блеск такой звезды все время меняется. Кривая блеска, т. е. кривая, показывающая, как меняется блеск со временем, имеет обычно два минимума: один более глубокий, когда затмевается компонент, имеющий более высокую температуру поверхности, и другой менее глубокий, когда затмевается менее горячий компонент. По форме кривой блеска также можно определить элементы орбиты в двойной системе. В настоящее время открыто более 4000 затменных двойных звезд.

Среди 30 ближайших к нам звезд 13 входят в состав двойных и тройных систем. Специальные наблюдения двойных и кратных звезд ведутся уже более 150 лет. За это время во многих из этих маленьких систем звезды успели совершить значительный путь по орбитам друг около друга. Эти орбиты и движения по ним изучены; установлено, что движение происходит под действием силы взаимного тяготения звезд, т. е. так же, как происходит движение планет под действием силы тяготения Солнца. Измерение скорости движения звезд по их орбитам позволило оценить массу звезд, входящих в двойные системы. Оказалось, что и в этом отношении звезды различны. Некоторые из них по массе уступают Солнцу, а другие превосходят его. При этом для всех звезд, в том числе и для Солнца, выполняется усло-

ние — чем больше светимость звезды, т. е. чем больше звезда излучает в единицу времени энергии в пространство, тем больше и ее масса. Вдвое большей массе соответствует приблизительно вдесятеро большая светимость, так что различие в светимостях у звезд гораздо большее, чем различие в массах.

Двойные и кратные звезды часто состоят из звезд различных типов, например, звезда белый гигант может комбинироваться с красным карликом, или желтая звезда средней светимости — с красным гигантом.

Рассеянные и шаровые звездные скопления

Более крупными коллективными членами Галактики, чем двойные и кратные звезды, являются рассеянные звездные скопления. Эти скопления содержат от нескольких десятков до нескольких сотен звезд, самые крупные — до двух тысяч звезд. Термин «рассеянное» скопление вызван тем, что сравнительно небольшая численность звезд в таком скоплении не позволяет уверенно очертить форму скопления; она может быть неправильной из-за случайностей группировки звезд внутри скопления. Примером рассеянного скопления являются Плеяды, которые можно наблюдать невооруженным глазом в наших широтах в осенние месяцы, когда они в вечерние часы видны высоко над горизонтом. Это — кучка слабых звезд в созвездии Тельца. Число видимых звезд в Плеядах зависит от остроты зрения наблюдателя. При отличном зрении можно насчитать семь звезд. Наблюдения в телескоп показывают (рис. 16), что Плеяды содержат более сотни звезд, а также газовые туманности. На рис. 17 дана фотография двойного рассеянного скопления η и χ Персея. В этом двойном скоплении около 600 звезд.

У рассеянных скоплений характерный состав. В них редко встречаются красные и желтые гиганты и совершенно нет красных и желтых сверхгигантов. В то же время белые и голубые гиганты, хотя это и редкие звезды — непереманные члены рассеянных скоплений. Здесь, чаще, чем в других местах Галактики, можно встретить и очень редкие звезды — белые и голубые сверхгиганты, т. е. звезды высокой температуры и чрезвычайно высокой светимости, излучающие каждая в сотни тысяч и даже миллионы раз больше, чем наше Солнце.

Рассеянные скопления имеют весьма характерную диаграмму цвет — светимость. В ней доминируют звезды главной последовательности. Например, диаграмма, по-

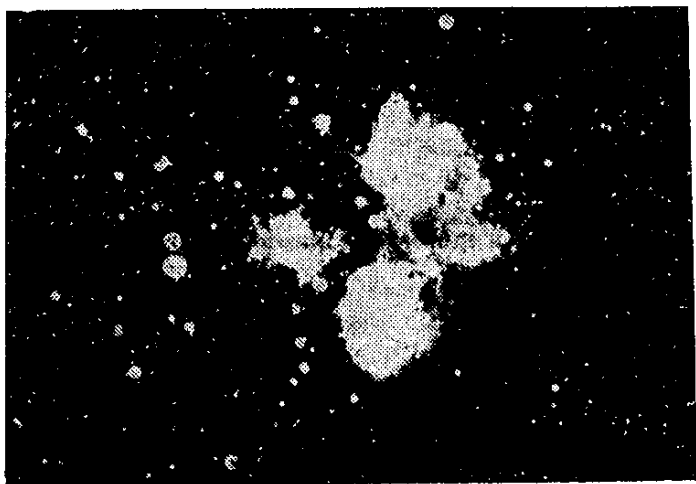


Рис. 16. Рассеянное скопление Плеяды. Кроме звезд, в скоплении видны входящие в его состав газовые облака.

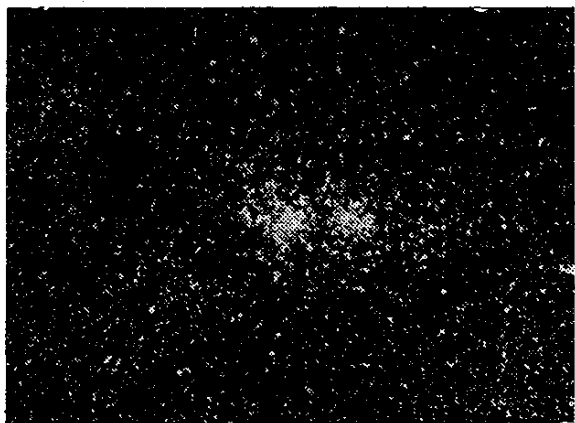


Рис. 17. Рассеянное скопление η и χ Персея.

строенная для Плеяд (рис. 18), содержит только звезды главной последовательности. Нет ни одного желтого или красного гиганта, нет субкарликов. Несколько сверхги-

гантов являются голубыми и как бы венчают главную последовательность. В самой главной последовательности звезды группируются тесно в узкой полосе. В других рассеянных скоплениях эти особенности диаграммы цвет — светимость выражены слабее. Например, в скоплении NGC 6530 (рис. 19) имеется несколько красных

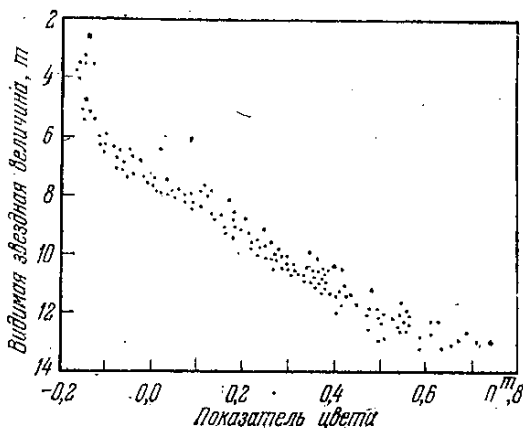


Рис. 18. Диаграмма цвет — видимая звездная величина для Плеяд.

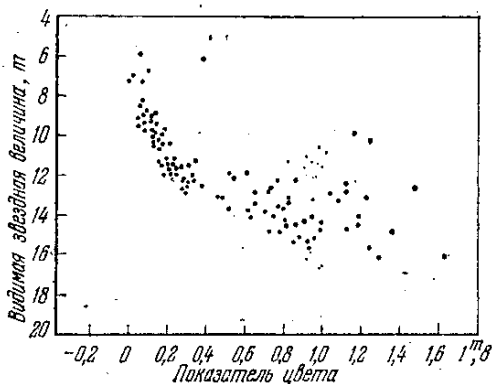


Рис. 19. Диаграмма цвет — видимая звездная величина рассеянного скопления NGC 6530.

гигантов, и звезды менее тесно располагаются в главной последовательности, ее полоса не столь узка. Однако и здесь бросается в глаза господствующее положение главной последовательности. Мы можем сказать, что у рассеянных скоплений особый тип звездного населения, в

котором звезды главной последовательности в большей степени преобладают над всеми остальными.

Рассеянные скопления располагаются очень близко к плоскости симметрии Галактики. Большинство из них лежит почти точно в этой плоскости. Если бы мы, оставив рассеянные скопления на их местах, убрали все другие объекты, входящие в состав Галактики, то оставшаяся система рассеянных скоплений была бы чрезвычайно плоской. Она была бы еще более плоской, чем сама Галактика в целом, и выглядела бы при наблюдении сбоку так, как показано на рис. 20.

Число занесенных в каталоги рассеянных звездных скоплений превышает в настоящее время тысячи. Но мы



Рис. 20. Система рассеянных скоплений Галактики при наблюдении ее с ребра.

даже при помощи телескопов можем различать только относительно близкие рассеянные скопления. Далекие рассеянные скопления неразличимы, они недостаточно для этого богаты звездами. Поэтому число имеющихся рассеянных скоплений в Галактике на самом деле намного больше тысячи и оценивается приблизительно в 30 000. Если считать, что среднее число звезд в одном рассеянном скоплении составляет 300 или несколько больше, то общее число звезд, входящих во все рассеянные скопления Галактики, равно приблизительно десяти миллионам. Значит, поскольку в Галактике около ста миллиардов звезд, в рассеянные скопления входит только одна десятитысячная часть всех звезд Галактики.

Еще более крупными коллективными членами Галактики являются шаровые звездные скопления. Это очень богатые системы, насчитывающие сотни тысяч, иногда свыше миллиона звезд. Посмотрите внимательно на полученную при помощи телескопа фотографию одного из шаровых скоплений (рис. 21). Правильная форма скопления, постепенное разрежение звезд от центра скопления к его окраинам вызывают у наблюдателя ощущение достигнутого системой покоя, равновесного состояния. Какие-то силы, управляющие этим огромным числом солнц-звезд, успели перемешать звезды, придать скоп-

лению шаровую форму, распределить в нем звезды по определенному закону.

В центральных областях шарового скопления звезды расположены настолько тесно друг к другу, что их изображения, как это видно на рис. 21, сливаются, и мы не можем различить отдельные звезды. Это не значит, конечно, что звезды там соприкасаются друг с другом. Просто на фотографической пластинке звезда получается не в виде точки, как это следовало бы, а в виде кружочка и для всех кружочков на фотографии не хватает

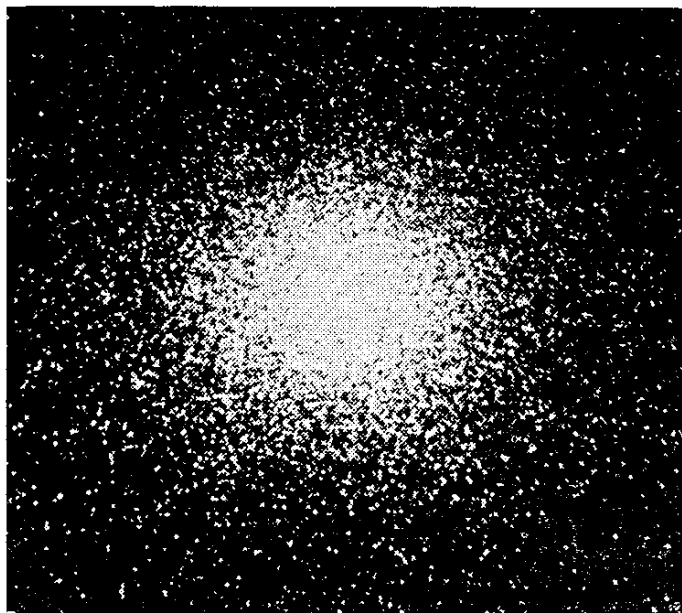


Рис. 21. Шаровое скопление ω Центавра.

места. На самом деле даже в центральных областях шаровых скоплений расстояния между звездами огромны по сравнению с размерами самих звезд. Но все-таки там звезды располагаются значительно ближе друг к другу, чем, например, в окрестности Солнца. Поэтому если у какой-нибудь звезды, находящейся близ центра шарового скопления, имеется планетная система с развитой жизнью, то обитатели этих планет должны наблюдать значительно больше ярких звезд, чем мы на нашем небе.

Состав шаровых скоплений существенно отличается от состава рассеянных скоплений. Как мы уже указывали, в рассеянных скоплениях много горячих бело-голубых звезд гигантов и сверхгигантов, но мало красных и желтых гигантов и вовсе нет красных и желтых сверхгигантов. В шаровых же скоплениях, наоборот, очень много звезд красных и желтых гигантов, много красных и желтых сверхгигантов, но очень мало бело-голубых звезд гигантов, и совершенно отсутствуют бело-голубые сверхгиганты. Как принято говорить, звездное население шаровых скоплений иного типа, чем звездное население рассеянных скоплений. Различия между рассеянными и шаровыми скоплениями проявляются буквально во всем. Например, в шаровых скоплениях много переменных звезд, а в рассеянных скоплениях переменных звезд очень мало. Но даже те переменные звезды, которые встречаются в рассеянных скоплениях, другие, нежели переменные звезды в шаровых скоплениях. Они значительно больше излучают света в пространство и периоды изменения их блеска равны нескольким дням или десяткам дней, тогда как шаровые скопления изобилуют короткопериодическими цефеидами с периодом изменения блеска меньше суток. В рассеянных скоплениях обычно много газа и пыли, в шаровых скоплениях газа вовсе нет, а пыль, если и имеется, то в очень малом количестве.

Результатом всех этих отличий в составе звезд является существенно иной вид диаграммы цвет — видимая звездная величина у шаровых скоплений, нежели у рассеянных. На рис. 22 показана диаграмма, построенная Джонсоном и Сэндиджем для шарового скопления NGC 5272. Джонсон и Сэндидж использовали телескоп с диаметром объектива 5 м обсерватории Маунт Паломар; им удалось определить цвета звезд до 21-й видимой звездной величины, что при расстоянии скопления около 14 кпе соответствует абсолютной звездной величине звезд $+5^m,3$. Богаче всего представлена последовательность желтых и красных гигантов, которая в верхней части диаграммы переходит в последовательность красных сверхгигантов. Многочисленны также слабые звезды главной последовательности — в основном в той ее части, которая расположена на диаграмме ниже и правее места, где начинается ветвь гигантов. Яркие звезды главной последовательности отсутствуют. Но есть еще

так называемая горизонтальная последовательность звезд с абсолютной звездной величиной около $+1^m,0$. На диаграмме у этой последовательности посередине имеется пробел, который на самом деле заполнен не приведенными на диаграмме, но имеющимися в шаровом скоплении короткоперподическими цефеидами.

Сравнение рис. 22 с рис. 18 и 19 показывает различие состава звездного населения в шаровых и рассеянных

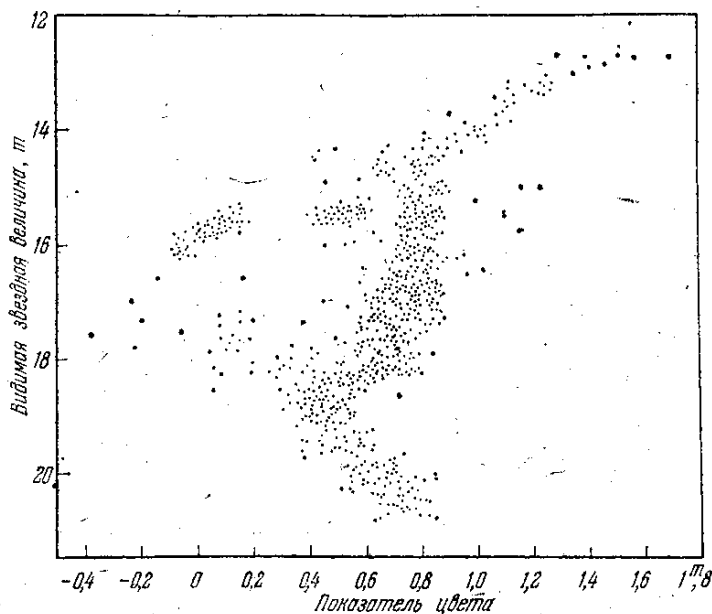


Рис. 22.- Диаграмма цвет — видимая звездная величина шарового скопления NGC 5272.

скоплениях. Это различие весьма отчетливо и им в настоящее время пользуются в тех случаях, когда скопление далеко, плохо наблюдается вследствие сильного межзвездного поглощения света и содержит несколько тысяч звезд, так что неясно, богатое ли это звездами рассеянное скопление или, наоборот, очень бедное звездами шаровое скопление.

Шаровые скопления — это плотные системы, состоящие из большого числа звезд. Поэтому они резко выделяются среди других объектов Галактики и видны на очень больших расстояниях. К настоящему времени все-

го открыто 132 шаровых скопления, входящих в состав нашей Галактики. Нужно думать, что будет открыто еще некоторое их количество.

Расположением в Галактике шаровые скопления также отличаются от рассеянных скоплений. В то время как последние очень тесно сосредоточены у плоскости симметрии Галактики, многие шаровые скопления значительно отдалены от этой плоскости. Вся совокупность шаровых скоплений образует как бы сферическую систему, проникающую в Галактику и в то же время окружающую Галактику, как это показано на рис. 23. На

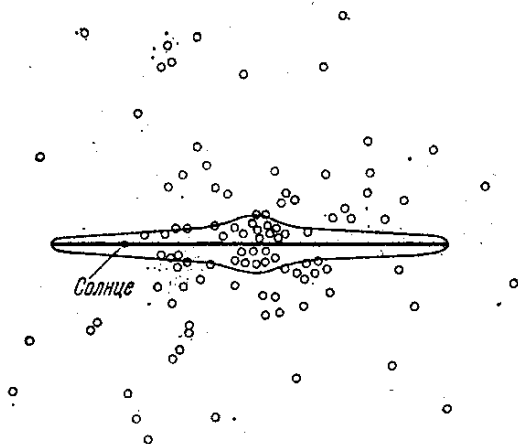


Рис. 23. Система шаровых скоплений, окружающая Галактику, при наблюдении Галактики с ребра.

этом рисунке размеры шаровых скоплений для наглядности увеличены. Если их изображать строго в масштабе, то шаровые скопления пришлось бы помечать настолько маленькими кружочками, что они выглядели бы как слабые точки. Именно по этой причине на фотографии галактики, приведенной на рис. 13, мы не видим шаровых скоплений, хотя эта галактика, как и наша, окружена системой шаровых скоплений. Вследствие того, что шаровые скопления располагаются симметрично по отношению к центру Галактики, а Солнце находится далеко от него, почти все шаровые скопления должны наблюдаться в одной половине неба, в той, в которой находится галактический центр. Это своеобразное распределение шаровых скоплений на небе впервые обнару-

жил в 1918 г. американский астроном Шепли. До этого в астрономии господствовала точка зрения, что Солнце находится почти точно в центре Галактики. Но если Солнце находится в центре Галактики, то тогда нужно считать, что совокупность шаровых скоплений сильно смещена в сторону от центра Галактики. Как указал Шепли, гораздо естественнее предположить, что с центром Галактики совпадает центр совокупности шаровых скоплений, а Солнце, следовательно, находится не в центре Галактики. Определив направление на центр совокупности шаровых скоплений и расстояние до него, Шепли впервые указал, где находится центр нашей звездной системы. Это открытие явилось сильным ударом по антропоцентризму — реакционному представлению о том, что человек занимает избранное, центральное место во Вселенной. Сначала наука показала, что Земля не занимает центрального положения в Солнечной системе, а теперь удалось установить, что и Солнечная система находится не в центре нашей звездной системы и даже расположена ближе к ее краю, чем к центру.

Если считать, что в каждом из известных шаровых скоплений в среднем имеется немного менее миллиона звезд, то общее число звезд в шаровых скоплениях составит около 100 миллионов. Это только одна тысячная доля всех звезд Галактики.

Молодые образования Галактики — звездные ассоциации

Имеется еще один тип коллективных членов Галактики — так называемые звездные ассоциации. Они были открыты акад. В. А. Амбарцумяном, который обнаружил, что наиболее горячие звезды-гиганты расположены на небе как бы отдельными гнездами. Обычно в таком гнезде (О-ассоциации) два-три десятка звезд — горячих гигантов спектральных классов О и В0, В1, В2. Ассоциация занимает большой объем, размером в несколько десятков или сотен парсек, в который обычным порядком, как и в другие места Галактики, входят в большом количестве звезды-карлики и звезды средней светимости. Добавление к этому объему двух-трех десятков горячих гигантов не увеличивает заметно числа звезд в единице объема. Отсюда следует, что звездная ассоциация не создает существенной дополнительной силы притяжения и

не может удерживать в себе звезды, находящиеся внутри ассоциации. Звезды горячие гиганты движутся со скоростями в 5—10 км/с, и им требуется всего несколько сотен тысяч лет или, самое большее, несколько миллионов лет, чтобы уйти из ассоциации. Поэтому факт существования горячих гигантов в звездных ассоциациях указывает на то, что эти звезды недавно сформировались в ассоциациях и не успели еще из них уйти.

Первый список О-ассоциаций был составлен Б. Е. Маркаряном в 1952 г. и содержал 25 ассоциаций. В каталоге звездных скоплений и ассоциаций, изданном Альтером, Рупрехтом и Ванисеком в 1958 г., уже числится 82 О-ассоциации. Все они лежат около главной плоскости Галактики и находятся ближе $3\frac{1}{2}$ кпс, причем 27 из их числа ближе 1,5 кпс. Именно на этом расстоянии до 1,5 кпс можно считать все ассоциации выявленными. Если считать, что повсюду около плоскости Галактики О-ассоциации располагаются с такой же частотой, как и в районе Солнца, то, учитывая, что радиус Галактики приблизительно в 10 раз больше величины 1,5 кпс, можно оценить общее число О-ассоциаций в нашей звездной системе:

$$27 \cdot 10^2 \approx 2700 \text{ ассоциаций.}$$

В каждой звездной ассоциации будем считать в среднем 30 звезд классов О и В0, В1, В2. Тогда в предположении, что все гиганты самых ранних спектральных классов входят в О-ассоциации, общее число этих звезд в Галактике должно быть оценено в 80 тысяч.

Еще один тип звезд обладает особенностью располагаться в отдельных гнездах. Это переменные звезды особого класса — карлики с эмиссионными линиями в спектре, называемые переменными типа Т Тельца, так как звезда Т в созвездии Тельца была первой такой исследованной звездой. Группировки звезд Т Тельца обладают теми же особенностями — малой общей звездной плотностью, неустойчивостью, что и О-ассоциации. Поэтому В. А. Амбарцумян назвал их Т-ассоциациями. Размеры Т-ассоциаций меньше, чем О-ассоциаций. Так как они состоят из звезд невысокой светимости, то видны на сравнительно небольших расстояниях. Тем не менее в списке П. Н. Холопова насчитывается 29 реальных и 12 возможных Т-ассоциаций. Общее их число в Галактике

должно значительно превышать число О-ассоциаций и составлять 20—30 тысяч.

Именно открытие звездных ассоциаций привело В. А. Амбарцумяна к утверждению, которое впоследствии стало общепринятым, что наряду со старыми звездами есть молодые и очень молодые звезды, что звездообразование в Галактике было длительным процессом и продолжается в наши дни.

Подсистемы Галактики

Как мы уже отмечали, рассеянные скопления и шаровые скопления располагаются в Галактике различным образом. Первые тесно сосредоточены у плоскости симметрии Галактики, а вторые примерно одинаково часто встречаются и у этой плоскости и на значительном расстоянии от нее. Принято говорить, что рассеянные скопления образуют плоскую подсистему, а шаровые скопления образуют сферическую подсистему.

Возникает вопрос: как размещена в Галактике основная масса звезд, одинаковым ли образом расположены в Галактике звезды различных типов? Эта проблема была исследована советскими астрономами Б. В. Кукаркиным, П. П. Паренаго и их сотрудниками. Оказалось, что по расположению в Галактике все типы звезд и все другие объекты можно разделить на три группы.

Объекты первой группы очень сильно сосредоточены у галактической плоскости, т. е. образуют плоские подсистемы. К этим объектам относятся звезды горячие сверхгиганты и гиганты, долгопериодические цефеиды, пылевая материя, газовые облака и рассеянные звездные скопления. Характерно, что в состав рассеянных скоплений в основном входят именно те объекты, которые сами по себе тоже образуют плоские подсистемы.

Вторую группу образуют объекты, располагающиеся одинаково часто у плоскости симметрии Галактики и на значительном расстоянии от нее. Они, следовательно, образуют сферические подсистемы. В числе таких объектов желтые и красные субкарлики, желтые и красные гиганты, короткопериодические цефеиды, шаровые скопления.

Третью группу составляют промежуточные подсистемы. В них объекты сосредоточены к плоскости Галактики, но не так сильно, как у плоских подсистем. Про-

межзвездные подсистемы составляют желтые и красные звезды-карлики, желтые и красные звезды-гиганты, а также особые переменные звезды, называемые звездами типа Миры Кита, очень сильно и неправильным образом изменяющие свой блеск. Примерное расположение объектов различных подсистем показано на рис. 24.

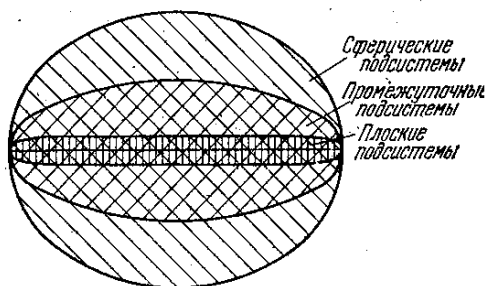


Рис. 24. Области, занимаемые плоскими, промежуточными и сферическими подсистемами при наблюдении Галактики с ребра.

Оказалось, что объекты различных подсистем отличаются друг от друга не только расположением в Галактике, но и своими скоростями. Объекты сферических подсистем имеют наибольшую скорость движения в направлении, перпендикулярном к плоскости Галактики, а у объектов плоских подсистем эта скорость наименьшая. Так, очевидно, и должно быть — большая скорость позволяет отходить на большие расстояния от плоскости Галактики и потому звезды, имеющие большие скорости, заполняют сферический объем. А звезды с малыми скоростями не могут отойти значительно, они сразу же возвращаются притяжением Галактики, совершают только небольшие колебания около плоскости симметрии Галактики и заполняют поэтому очень плоский объем.

Удалось также установить, что объекты различных подсистем отличаются и химическим составом. Например, почему-то звезды плоских подсистем богаче металлами, чем звезды сферических подсистем.

Открытие существования объектов различных подсистем в Галактике имеет большое значение. Оно показывает, что звезды разных типов формировались в разных местах Галактики и при различных условиях.

Спиральные ветви Галактики

Галактики, имеющие такой же звездный состав, как наша, и наблюдаемые с ребра, выглядят примерно так, как на рис. 13. Исследование нашей Галактики приводит к выводу, что и она при наблюдении извне, если на нее смотреть с ребра, должна иметь такой же вид, как и галактика на рис. 13.

А какой вид имеют галактики, сходные по звездному составу с нашей, но наблюдаемые не с ребра, а в плане? Оказывается, все такие галактики имеют своеобразную спиральную структуру. На рис. 25 приведена



Рис. 25. Галактика NGC 6814, сходная с нашей Галактикой, наблюдаемая в плане.

фотография одной из них. Вот, значит, какой примерно вид должна иметь наша Галактика, если наблюдать ее со стороны так, чтобы луч зрения был перпендикулярен к плоскости симметрии Галактики. Из ядра должны выходить спиральные ветви. Эти ветви, огибая ядро, постепенно расширяясь и разветвляясь, теряют яркость и на некотором расстоянии их след пропадает.

Как же разглядеть спиральные ветви нашей Галактики? Для этого нужно прежде всего выяснить, из чего состоят спиральные ветви других галактик. Исследова-

ния показали, что они состоят из звезд — горячих гигантов и сверхгигантов, а также из пыли и газа — водорода. Если убрать эти объекты из спиральных галактик, то никакой спиральной структуры не останется, потому что красные и желтые звезды как карлики, так и гиганты, одинаково равномерно заполняют области в спиральных ветвях и области между спиральными ветвями.

Значит, чтобы обнаружить спиральные ветви нашей Галактики, нужно проследить расположение в ней звезд — горячих гигантов, а также пыли и газа. Эта задача оказалась очень сложной из-за того, что спиральную структуру Галактики мы наблюдаем изнутри и различные части спиральных ветвей проектируются друг на друга. Если бы мы умели точно определять расстояния до далеких звезд — горячих гигантов, то возможности успеха значительно возросли бы. Но точно измерять большие расстояния нельзя, а в данном случае это особенно затруднительно, так как в плоскости Галактики, где лежат спиральные ветви, много пылевой материи, поглощающей свет звезд. Пылевая материя не только затрудняет измерение расстояний, но и делает практически невидимыми очень далекие звезды — горячие гиганты. А для выяснения расположения спиральных ветвей нужно как раз проследить за очень далекими горячими гигантами. Поэтому попытки изучения спиральной структуры Галактики при помощи исследования распределения в пространстве звезд — горячих гигантов, или звездных ассоциаций, в которые собраны наиболее горячие гиганты, пока к успеху не привели.

Больше надежд подает использование излучения нейтрального водорода на длине волны 21 см. Мы уже писали (с. 55), что по совокупности профилей этой эмиссионной линии, полученных для разных направлений, можно определить закон вращения Галактики. Но можно решить и другую задачу — измерить плотность нейтрального водорода в различных местах нашей звездной системы. Это было сделано голландскими астрономами ван де Холстом, Мюллером и Оортом, Хиндманом и Стар-Карпентером. Результат изображен на рис. 26.

В двух небольших секторах, направленных на центр и антицентр Галактики, исследование пока провести не удастся, поэтому картина неполная, но, хотя и неуверенно, начинает намечаться расположение спиральных ветвей. Мы так пишем потому, что водород обычно сосед-

ствуется со звездами — горячими гигантами, определяющими форму спиральных ветвей. Места уплотнения водорода должны повторять рисунок спиральной структуры Галактики.

Большое преимущество использования излучения нейтрального водорода состоит в том, что оно длинноволно-

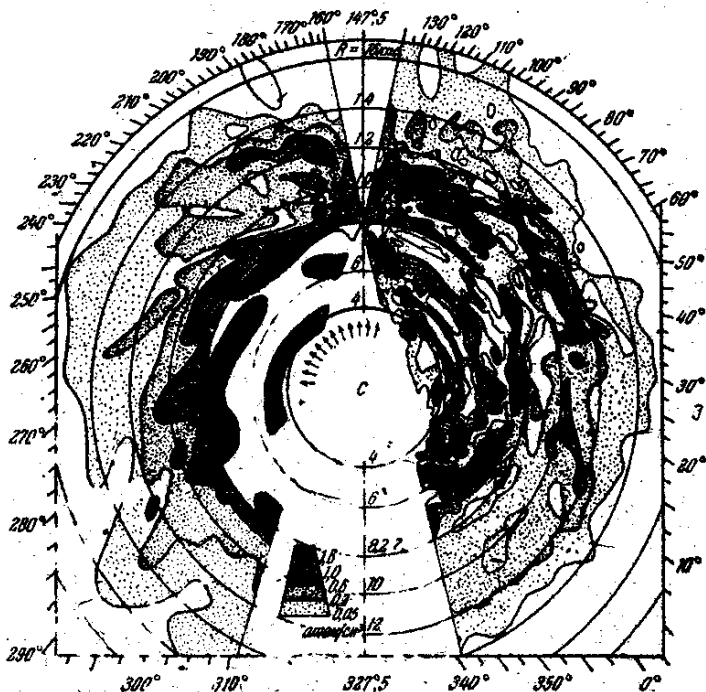


Рис. 26. Контуры спиральной структуры Галактики, намечаемые по расположению нейтрального водорода.

вое, находится в радиодиапазоне и для него межзвездная пылевая материя практически совершенно прозрачна — 21-сантиметровое излучение без каких-либо искажений доходит до нас от самых далеких областей Галактики. Так же как радиолокатор корабля продолжает действовать в густом тумане, когда оптические средства наблюдения оказываются беспомощными, так и радиотелескопы уверенно разглядывают самые далекие области Галактики сквозь пыль, сосредоточенную около ее плоскости симметрии.

Гипотеза формирования звезд из газа

Проблема формирования и эволюции звезд является ключевой проблемой для всей космогонии. Когда она будет решена, откроется дорога к разрешению других важнейших проблем — формирования и эволюции системы планет, формирования и эволюции звездных систем.

Однако в настоящее время, несмотря на большие усилия, приложенные астрономами для решения этой проблемы, несмотря на то, что эти усилия привели к значительному прогрессу и некоторые варианты теории подробно разработаны и обоснованы, все-таки нельзя сказать, что проблема космогонии звезд разрешена.

Существуют две точки зрения на то, как произошли звезды. Каждая из этих точек зрения опирается на некоторый круг наблюдательных фактов и теоретические расчеты. С другой стороны, каждая из точек зрения испытывает трудности при объяснении некоторых других наблюдательных данных. Мы не говорим, что гипотеза противоречит фактам, потому, что сами наблюдательные данные в рассматриваемом случае еще недостаточно надежны и могут оказаться неверными.

Обе гипотезы заслуживают усиленной и тщательной разработки. Лишь дальнейшие успехи в разработке теории, накопление и уточнение наблюдательных данных покажут, какую из двух гипотез нужно утвердить.

Первая гипотеза основывается на предположении, что звезды формируются из газовой материи — той самой, которая и в настоящее время наблюдается в Галактике.

Предполагается, что газовая материя в тех местах, где ее масса и плотность достигают некоторой величины, начинает под действием своего собственного притяжения сжиматься и уплотняться, образуя сначала холодный газовый шар. В результате продолжающегося сжатия температура газового шара начнет подниматься. Потенциальная энергия частиц в поле притяжения газового шара при приближении к центру становится меньше, а это означает, что часть потенциальной энергии переходит в тепловую энергию. Совершенно тот же переход энергии происходит, когда лежавший на краю пропасти камень, упав на ее дно, теряет часть потенциальной энергии в силовом поле земного притяжения, и приобретает тепловую энергию, разогревшись от удара о дно пропасти.

Когда газовый шар нагреется, он станет отдавать тепловую энергию через излучение с поверхностных слоев, которые вследствие этого будут охлаждаться и посредством теплопроводности вызывать охлаждение более глубоких слоев. Поэтому если бы в газовом шаре, теперь уже звезде, не появились новые источники энергии, то процесс сжатия, сопровождающийся излучением энергии, довольно быстро привел бы к исчерпанию энергии и угасанию звезды. Эволюция таких звезд, формирующихся из водорода, была бы очень простой. Однако процесс сжатия приводит к тому, что центральные области звезды разогреваются до очень высоких температур. Они расположены очень глубоко и почти не испытывают влияния охлаждения, вызываемого излучением с поверхностных слоев. Когда температура центральной области достигает нескольких миллионов градусов, в ней начинаются термоядерные реакции, сопровождающиеся выделением большого количества энергии.

Период, в течение которого звезда, сжимаясь из газового облака, достигнет состояния, когда в ее центральных областях начнут действовать термоядерные реакции, называется периодом сжатия. В этот период температура звезды должна повышаться и, следовательно, спектральный класс становится более ранним. Что касается светимости звезды, то в период сжатия ее возрастанию будут способствовать увеличение температуры поверхности и увеличение прозрачности разогретшейся материи, вследствие чего из звезды будет непосредственно выходить излучение более глубоких и горячих слоев. С другой стороны, уменьшение радиуса звезды будет уменьшать светимость. Расчет показывает, что совместное влияние всех факторов в период сжатия должно приводить к небольшому увеличению светимости.

Поэтому на диаграмме спектр — светимость эволюция в период сжатия протекает вдоль линий, тянущихся справа налево и немного поднимающихся вверх (рис. 27). Различие линий эволюции на диаграмме определяется раз-

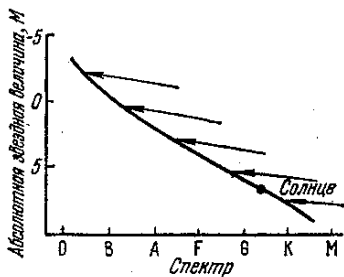


Рис. 27. Эволюционные перемещения звезд на диаграмме спектр — светимость в период сжатия.

личием масс газовых облаков, из которых формируются звезды. Чем больше масса, тем больше светимость, тем выше на диаграмме проходит линия эволюции.

В момент, когда начинают эффективно действовать термоядерные реакции, все звезды оказываются на главной последовательности диаграммы спектр — светимость.

Главными из термоядерных реакций являются реакции, которые приводят к превращению водорода в гелий. В их итоге четыре протона, являющиеся ядрами атома водорода, образуют ядро атома гелия. Масса протона в атомных единицах равна 1,00813, а масса ядра гелия 4,00389. Излишек массы в

$$4 \times 1,00813 - 4,00389 = 0,02863 \text{ атомной единицы} \quad (10)$$

превращается в энергию излучения согласно основной формуле Эйнштейна

$$E = mc^2, \quad (11)$$

в которой энергия выражается в джоулях, масса — в килограммах, c — скорость света в м/с.

Сравнение излишка массы с самой массой, участвующей в термоядерной реакции, показывает, что около 0,007 массы вещества при этой реакции превращается в энергию излучения.

Масса Солнца равна $2 \cdot 10^{30}$ кг, светимость $4 \cdot 10^{36}$ Дж/с.

Рассчитаем, сколько времени могло бы излучать Солнце так, как оно излучает сейчас, если бы из сплошь водородного оно превратилось в сплошь гелиевое, т. е. если бы в нем, как принято говорить, «выгорел» весь водород:

$$\frac{2 \cdot 10^{30} \cdot 0,007 (3 \cdot 10^8)^2}{4 \cdot 10^{26}} = 3 \cdot 10^{18} \text{ с} = 10^{11} \text{ лет.}$$

100 миллиардов лет — это много даже для космогонических сроков. Нужно учесть, что водород выгорает только в центральных областях звезд. Во всяком случае очевидно, что термоядерные реакции могут играть очень существенную роль в космогонии звезд.

Когда в звезде станут протекать термоядерные реакции и от них начнет поступать энергия, сжатие звезды прекратится. Энергия термоядерных реакций будет компенсировать расход энергии на излучение. Некоторый срок звезда будет сохранять неизменными свои основ-

ные физические характеристики — радиус, температуру, светимость, оставаясь на диаграмме спектр — светимость на линии главной последовательности. Затем начнет сказываться постепенное истощение водорода в центральной области звезды. Расчет моделей звезд и учет всех факторов, которые при этом действуют, показывает, что истощение водорода должно сопровождаться увеличением радиуса звезды и уменьшением ее температуры. Светимость при этом несколько растет, значит, звезда начнет смещаться с главной последовательности вправо и вверх. Скорость этого смещения зависит от скорости выгорания водорода, а последняя в очень сильной степени зависит от температуры. Скорость протекания термоядерных реакций приблизительно пропорциональна 15-й степени температуры! Поэтому те звезды быстрее сходят с главной последовательности и быстрее перемещаются на диаграмме вправо и вверх, у которых в центральных областях достигается более высокая температура. А температура центральных областей выше у звезд больших масс, в них сильнее поле тяготения и больше потенциальная энергия тяготения, превращающаяся при сжатии в тепловую энергию.

Поэтому звезды больших масс и больших светимостей быстрее сходят с главной последовательности вправо и вверх, перемещаясь в направлении той части диаграммы, где расположена ветвь гигантов. На рис. 28 показано, как на диаграмме спектр — светимость должны через определенные промежутки времени располагаться звезды, которые в некоторый момент находились точно на главной последовательности. Линии звезд равных возрастов стремятся вверх. Звезды больших масс и, следовательно, больших светимостей эволюционируют быстрее, превращаясь в красные гиганты, когда звезды меньших масс еще только немного отошли от линии главной последовательности.

После того как в звездах-гигантах выгорит весь водород и они достигнут стадии красного гиганта, сжатие их ядра, состоящего теперь уже из гелия, приведет к дальнейшему повышению температуры до значений более 100 млн. градусов. Тогда начинает действовать новая термоядерная реакция — образование ядра атома углерода из трех ядер атомов гелия. И эта реакция сопровождается потерей массы и выделением энергии излучения. Температура звезды станет возрастать и начнется новое перемещение звезды на диаграмме спектр — светимость, теперь уже влево.

Мы кратко обрисовали теорию эволюции звезд, основанную на гипотезе образования их из газа. Рамки этой книги не позволяют подробно изложить процессы, которые определяют эту эволюцию. Желаящим ближе познакомиться с вопросом мы рекомендуем прочитать книгу С. А. Каплана «Физика звезд» (М.: Наука, 1977).

Изложенная теория имеет значительные достоинства. Она оперирует с физическими процессами, реальность которых не вызывает сомнений и даже проверена на практике (водородная бомба). Она разработана количественно, причем некоторые этапы эволюции рассчитаны достаточно тщательно и точно. Здесь основная заслуга принадлежит

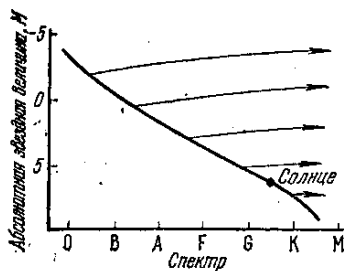


Рис. 28. Эволюционные перемещения звезд на диаграмме спектр — светимость после исчерпания водорода в центральных областях.

американскому астроному М. Шварцшильду и его сотрудникам. Важным доводом в пользу изложенной теории является определенное соответствие диаграмм спектр — светимость, построенных по наблюдательным данным, с тем, что получается на основании теоретических расчетов. Согласно теории период сжатия сравнительно короток, эта стадия проходит звездами быстро, поэтому звезд, наблюдающихся на диаграмме спектр — светимость в местах, соответствующих линиям рис. 27, почти нет. Попад после окончания сжатия на главную последовательность, звезды на ней «сидят» довольно долго, особенно звезды малых масс, поэтому у главной последовательности скапливается много звезд и она, действительно, на диаграммах, построенных по наблюдениям, очень богато заселена.

Далее, можно полагать, что звезды в звездном скоплении имеют одинаковый возраст. Тогда теория объясняет наблюдающееся у ряда рассеянных скоплений загибание вверх линии главной последовательности. Это загибание имеет различную степень у различных скоплений, причем продолжение загнутой части можно усмотреть в области ветви красных гигантов в виде нескольких фигурирующих там звезд. Различную степень загибания линий главной последовательности можно трактовать как различный возраст рассеянных скоплений. На рис. 29 дана

совмещенная диаграмма цвет — светимость рассеянных скоплений, построенная Сендиджем. Согласно изложенной теории, судя по диаграмме, самым молодым скоплением является NGC 2362, затем в порядке увеличения возраста идут h и χ Персея, Плеяды, NGC 2287, NGC 6705, Волосы Вероники, Гиады, Ясли, NGC 752, NGC 2682. Справа по вертикали указан возраст скопления, определяемый по высоте точки, у которой начинается отход линии расположения звезд от главной последовательности, соответствующей «нулевому» возрасту. Так, NGC 2362 имеет почти «нулевой» возраст, у ее звезд только закончился период сжатия и они «сели» на главную последовательность, у h и χ Персея возраст около $8 \cdot 10^6$ лет, у Плеяд — около 10^8 лет и т. д.

У старого рассеянного скопления NGC 2682 возраст около $8 \cdot 10^9$ и его диаграмма похожа уже на диаграмму шарового скопления, в чем легко убедиться, если произвести сравнения с рис. 22.

Гипотеза происхождения звезд из газовой материи встречается и с серьезными трудностями. Одной из них является малое количество водорода в Галактике, всего около 2% общей ее массы. Если звезды образуются из газа, звездообразование в Галактике должно было бы практически закончиться. Между тем наша звездная система весьма богата молодыми звездами — голубыми гигантами и сверхгигантами; в этом отношении она уступает очень немногим галактикам.

Далее, горячие гиганты и сверхгиганты сосредоточены в звездных ассоциациях, поэтому если звезды образуются из газа, то следовало ожидать присутствия здесь и не-

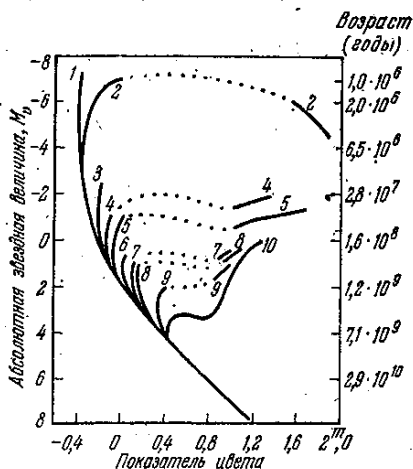


Рис. 29. Совмещенная диаграмма цвет — светимость для десяти рассеянных скоплений: 1 — NGC 2362, 2 — h и χ Персея, 3 — Плеяды, 4 — NGC 2287, 5 — NGC 6705, 6 — Волосы Вероники, 7 — Гиады, 8 — Ясли, 9 — NGC 752, 10 — NGC 2682.

которого количества уже заметно уплотнившихся газовых облаков, постепенно превращающихся в звезды. Нужно сказать, что в некоторых местах Галактики были обнаружены маленькие плотные облака, названные глобулами. Но, во-первых, они не показывают тесной связи со звездными ассоциациями, а во-вторых, нет оснований утверждать, что глобулы как раз являются зародышами звезд.

Слабым местом гипотезы является то, что описываемый ею процесс превращения газовой массы в звезду, как процесс весьма спокойный, не может объяснить ряда наблюдательных данных, которые, по-видимому, нужно трактовать как выбрасывание из некоторой области пространства звезд и даже галактик.

И наконец, отметим слабый пункт гипотезы образования звезд из газа, состоящий в том, что, объяснив ряд известных наблюдательных фактов, она не смогла пока предсказать каких-нибудь новых, неизвестных до сих пор явлений, которые подтвердились бы в наблюдениях.

Гипотеза образования звезд из сверхплотного вещества

Вторая гипотеза, выдвинутая акад. В. А. Амбарцумяном, состоит в том, что звезды образуются из некоторого сверхплотного вещества. Основой этого кажущегося неожиданным предположения является вывод, что в наблюдаемой Вселенной процессы распада преобладают над процессом соединения. Если это так, то наиболее важный космогонический процесс — образование звезд — должен быть переходом вещества из более плотного состояния в менее плотное, а не наоборот, как предполагает гипотеза образования звезд из газа.

Гипотеза, как мы видим, требует, чтобы во Вселенной существовал материал — сверхплотное вещество, которого еще никто ни при каких обстоятельствах не наблюдал и многие свойства которого остаются неизвестными. Является ли это обстоятельство недостатком гипотезы? На первый взгляд может показаться, что это именно так. Однако нужно отдавать себе отчет в том, что, изучая проблему происхождения звезд и звездных систем, мы выходим за круг явлений, связанных с обычной деятельностью человека. История показывает, что каждый раз, когда наука вторгалась в новую область исследования, старых понятий и закономерностей оказывалось недостаточно для

объяснения наблюдаемых явлений, возникала необходимость введения новых форм существования материи и новой логики для объяснения поведения материи. Исследование микромира, например, показало существование элементарных частиц и потребовало введения таких логических правил, как принцип неопределенности, или принцип неразличимости частиц в квантовой статистике, которые, казалось бы, явно противоречат нашей обыденной логике. Так, например, установлена важная роль в эволюции небесных тел элементарной частицы нейтрино, обладающей непонятной для нашего разума способностью проходить, не испытывая затруднений, сквозь материю. Нейтрино свободно пронизывает Землю и более массивные небесные тела, не изменяя траектории своего движения во Вселенной. Выяснилось, что именно это свойство нейтрино — почти полное отсутствие способности взаимодействовать с материей — мешало до сих пор их обнаружению.

Исследование области больших скоростей потребовало установления таких непривычных для нашей обыденной логики представлений, как различный ход времени в движущихся друг относительно друга системах или изменение инертной массы тела вследствие изменения его скорости.

Сверхплотная материя, если она существует, должна быть недоступна современным средствам наблюдения, так как она занимает очень малые объемы пространства и почти не излучает. Основные ее свойства — необычайно высокая плотность и огромный запас энергии, которая бурно выделяется при распаде такого вещества.

Возможность существований сверхплотных масс материи рассматривалась Г. Р. Оппенгеймером, Г. М. Волковым, В. А. Амбарцумян и Г. С. Саакян показали, что могут существовать массы с сверхплотными ядрами, состоящими из тяжелых элементарных частиц — гиперонов. Радиусы таких объектов составляют всего несколько километров, а массы мало уступают массе Солнца, так что средняя плотность равна миллионам тонн на кубический сантиметр, а в центральных областях она еще намного выше.

Конечно, эти расчеты пока только иллюстрируют возможность существования сверхплотной материи и не определяют ее свойств. Поэтому гипотеза образования звезд из сверхплотного вещества не могла еще дать

начала для подробно разработанной теории эволюции звезд, как это имеет место для гипотезы образования звезд из газа. Но критерием правильности гипотезы является согласие вытекающих из нее следствий с наблюдаемыми явлениями, а не возможность построения в данное время разработанной теории.

Теория важна лишь потому, что она позволяет на основе гипотезы делать больше выводов для сравнения с наблюдениями. Чем разработаннее теория, тем больше возможности проверки гипотезы.

Нужно сказать, что некоторые явления в мире галактик, открытые в самое последнее время (о них будет рассказано ниже), служат серьезным аргументом в пользу гипотезы о происхождении звезд из сверхплотной материи. Для уверенных выводов чрезвычайно важно дальнейшее подробное исследование этих явлений.

Можно указать и на наблюдательные данные, плохо согласующиеся с гипотезой происхождения звезд из сверхплотного вещества в результате бурного процесса. Таким фактом, например, является существование рассеянных звездных скоплений, находящихся в устойчивом состоянии. Для устойчивости рассеянных скоплений нужно, чтобы средние скорости находящихся в них звезд были около $1/2$ км/с, не больше. Наблюдения лучевых скоростей и собственных движений звезд в рассеянных скоплениях подтверждают предсказанные нужные для устойчивости малые значения скоростей членов скопления. Поэтому формирование звезд в рассеянном скоплении не должно было происходить в результате бурного процесса, при котором звездам сообщаются большие скорости.

ГАЛАКТИКИ

История открытия других звездных систем

В 1784 г. наблюдатель комет Мессье составил каталог туманных объектов. Он преследовал цель помочь наблюдателям, которые в поисках комет часто принимали за них иные туманные объекты. Должно было пройти несколько дней, чтобы, убедившись в неподвижности туманного объекта, наблюдатель понял свою ошибку (кометы принадлежат Солнечной системе, поэтому они, как и планеты, перемещаются на звездном небе среди звезд).

Каталог Мессье был небольшой и насчитывал только 108 наиболее ярких туманных объектов. В 1888 г. Дрейер опубликовал значительно более обширный список 7840 туманных объектов, названный им Новым общим каталогом (New General Catalogue) туманностей и скоплений. Этим каталогом теперь обычно пользуются для обозначения туманного объекта. Например, объект, стоящий под № 5139 в каталоге Дрейера (в данном случае шаровое скопление в созвездии Центавр), обозначается NGC 5139. В 1894 и 1908 гг. Дрейер издал дополнения к своему каталогу, так называемые индекс-каталоги (Index Catalogue), насчитывающие в совокупности 5386 туманных объектов, которые обозначаются буквами IC.

Из 108 объектов каталога Мессье 29 оказались, как выяснилось впоследствии, рассеянными скоплениями и 29 — шаровыми скоплениями. Было установлено, что эти объекты лишь при рассмотрении в слабые телескопы кажутся туманностями, в более крупные телескопы они видны как скопления звезд. 11 объектов каталога Мессье оказались действительно газовыми и газопопылевыми туманностями, входящими в состав нашей Галактики. Газовые туманности легче всего распознаются по спектру. Их спектр не содержит линий поглощения, так как здесь нет газовой атмосферы, за которой лежала бы самосве-

тящаяся поверхность звезды, и составлен из ярких, как говорят, эмиссионных линий. Газ, из которого состоит туманность, нагревается излучением близлежащих горячих звезд и излучает сам в тех длинах волн, которые соответствуют его атомному строению.

Природа остальных 39 объектов каталога Мессье — объектов, имеющих спиралевидную или эллиптическую форму, долгое время оставалась неясной. Основной вопрос, являются они галактическими или внегалактическими объектами, разрешился лишь в нашем веке. В 1917 г. Ричи и Кертис обнаружили в спиральном объекте NGC 224 появляющиеся и через несколько дней исчезающие яркие точки. Ричи и Кертис правильно предположили, что это новые звезды, наблюдаемые в момент максимума блеска. У всех новых звезд нашей Галактики в момент максимума блеска абсолютная звездная величина M приблизительно равна -7^m . Если предположить, что она такая же и у новых звезд в NGC 224, то, измерив видимую звездную величину m этих звезд в максимуме блеска, можно из уравнения (6) найти расстояние r . Наблюдаемые m оказались равными приблизительно $+16^m,3$. Это дает расстояние около 460 000 пс, что в пятнадцать раз больше диаметра Галактики. Значит, NGC 224 — внегалактический объект.

Видимая звездная величина всего объекта NGC 224 — туманности, находящейся в созвездии Андромеды и поэтому часто называемой туманностью Андромеды — равна $+4^m,3$. Поэтому если принять ее расстояние от нас равным 460 000 пс, то из равенства (6) можно теперь найти абсолютную звездную величину этой туманности. Получаем $M = -19^m,8$. Так как абсолютная звездная величина Солнца равна $+4^m,9$, а разность в пять единиц звездной величины означает в 100 раз большую светимость, то получается, что NGC 224 имеет светимость, равную светимости приблизительно 8 миллиардов солнц. Но у звезд в окрестностях Солнца средняя светимость приблизительно в 12 раз меньше, чем светимость Солнца. Солнце — сравнительно интенсивно излучающая звезда (хотя ему далеко до звезд-гигантов, а тем более сверхгигантов). Поэтому если предположить, что туманность составлена главным образом из тех звезд, которые преобладают в окрестностях Солнца, то она должна содержать около 100 миллиардов звезд, т. е. приблизительно столько же, сколько и наша Галактика.

Окончательно вопрос прояснился в 1924—1926 гг., когда Хаббл при помощи 2,5-метрового телескопа обсерватории Маунт Вилсон, применяя большие экспозиции, получил фотографии туманности в созвездии Андромеды, на которых ее спиральные ветви вышли в виде множества слабых светящихся точек — звезд. Туманность, как говорят, была разрешена на звезды. То же удалось сделать для спиральных ветвей еще нескольких туманностей. В 1944 г. Бааде, используя введенный в действие 5-метровый телескоп обсерватории Маунт Паломар, разрешил на звезды ядро туманности в Андромеде и ядро спиральной туманности NGC 598, а также несколько эллиптических туманностей.

Таким образом, стало ясным, что эти объекты являются звездными системами наподобие нашей Галактики. Поэтому их стали называть галактиками, и этот термин в наши дни уже совершенно вытеснил применявшийся сначала термин внегалактические туманности. Но иногда термин «туманность» по привычке употребляется в отношении определенных галактик; например, говорят «туманность Андромеды» или «туманность Треугольника», имея в виду галактики.

Началась новая эпоха в астрономии. Оказалось, что миллионы туманных объектов, наблюдаемых почти во всех уголках неба, — это разнообразные, отличающиеся друг от друга формой, размерами, населенностью звездные системы. Самые слабые из них, еще наблюдаемые в современные телескопы, находятся на расстоянии сотен миллионов парсек. Таким образом, в десятки тысяч раз увеличился радиус исследуемого человеком мира, а объемом исследуемого мира возрос, следовательно, в тысячи миллиардов раз.

История науки показывает, что расширение области исследования никогда не ограничивается простым количественным увеличением материала исследования. Оно приводит к открытию новых качеств, новых неизвестных до тех пор объектов. Конечно, не могло обойтись без новых поразительных открытий и огромное расширение области Вселенной, доступной научному исследованию.

Во Вселенной нет ничего единственного и неповторимого в том смысле, что в ней нет такого тела, такого явления, основные и общие свойства которых не были бы повторены в другом теле, другом явлении. В то же время каждое тело, каждое явление во Вселенной

неповторимы, единственны в том смысле, что данная комбинация всех свойств тела или явления не могут повториться в точности, ибо множество комбинаций всех свойств тел и явлений является бесконечным множеством более высокого порядка, чем множество всех тел и явлений во Вселенной.

Этот общий закон очень наглядно проявляется в галактиках.

Внешний вид галактик чрезвычайно разнообразен и некоторые из них очень живописны. Для каждой галактики, как бы ни был сложен ее внешний рисунок, можно разыскать другую галактику, очень на нее похожую, на первый взгляд — двойника. Однако более внимательное рассмотрение всегда обнаружит заметные различия в любой паре галактик, а большинство галактик очень сильно отличается друг от друга своим внешним видом.

Одной из первых задач, вставших перед Хаблом, когда он начал систематическое изучение других звездных систем, было введение классификации галактик. Хабл избрал самый простой метод классификации по внешнему виду, и нужно сказать, что хотя впоследствии другими видными исследователями были внесены различные предложения по классификации, а некоторые предложили и иные принципы классификации, первоначальная система, введенная Хаблом, по-прежнему остается основой классификации галактик.

Хабл предложил разбить все галактики на три основных вида: 1) эллиптические, обозначаемые E (elliptical), 2) спиральные, обозначаемые S (spiral), и 3) неправильные, обозначаемые I (irregular).

Эллиптические галактики

Эллиптические галактики внешне, пожалуй, самый невыразительный тип галактик. Они имеют вид гладких эллипсов или кругов с постепенным уменьшением яркости от центра к периферии. Никакого дополнительного рисунка у них нет, потому что эллиптические галактики состоят из второго типа звездного населения. Они построены из звезд красных и желтых гигантов, красных и желтых карликов и некоторого количества белых звезд не очень высокой светимости. Отсутствуют бело-голубые сверхгиганты и гиганты, группировки которых можно было бы наблюдать в виде ярких сгустков, придающих

структурность системе. Нет пылевой материи, которая в тех галактиках, где она имеется, создает темные полосы, оттеняющие форму звездной системы. Поэтому внешне эллиптические галактики отличаются друг от друга в основном одной чертой — большим или меньшим сжатием. Хаббл предложил показателем сжатия считать величину

$$10 \cdot \frac{a-b}{a}, \quad (12)$$

которую легко вычислить, если на фотографии измерены большая a и малая b полуоси эллиптической галактики. Например, у круглой галактики (круг — это частный случай эллипса) полуоси a и b равны, поэтому сжатие получается равным нулю, т. е. его нет. Если у галактики большая полуось вдвое больше малой, то показатель сжатия оказывается равным 5, а в случае чрезвычайно сильного сжатия, когда b очень мало в сравнении с a , показатель сжатия равен 10. Конечно, в общем случае показатель сжатия будет чаще дробным числом, но Хаббл предложил всегда округлять его до целого числа и обозначать тип эллиптической галактики при помощи буквы E со следующим за ней показателем сжатия.

Как выяснилось, очень сильно сжатых эллиптических галактик нет, показатели сжатия 8, 9 и 10 не встречаются. Наиболее сжатые эллиптические галактики — это E7.

На рисунках 30, 31 и 32 приведены фотографии трех галактик: NGC 4636, NGC 4406 и NGC 3115, относящихся соответственно к типам E0, E3 и E7.

Мы видим, что яркость у всех изображенных галактик плавно убывает с удалением от центра и граница очерчена не резко. Это естественно, поскольку эллиптическая галактика не твердое и не жидкое тело, а система, состоящая из огромного числа светящихся частиц — звезд.

В наблюдательной науке, какой является астрономия, обычной является задача определения по видимым свойствам объектов истинных их свойств.

Мы наблюдаем галактику в форме эллипса. Но очевидно, что галактика — это не плоская фигура, а тело, которое, если его рассматривать из некоторой точки, представляется эллипсом. К сожалению, мы не можем, и никогда не сможем рассматривать эту галактику еще и из другой точки. Тем не менее нужно как-то выяснить, какую

действительную форму имеет наблюдаемая галактика. Если бы на небе существовала только одна эллиптическая галактика, то поставленная задача была бы, по-видимому, неразрешимой, так как существует бесчисленное множество форм тел таких, что с некоторого одного направления они видны как эллипс. К счастью, эллиптических галактик много. И все они наблюдаются в виде

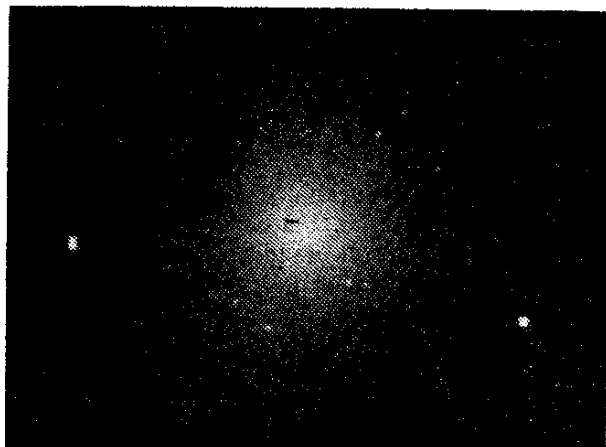


Рис. 30. Галактика NGC 4636 типа E0.

эллипсов. Естественно в таком случае считать, что эллиптические галактики обращены к нам различными сторонами и, следовательно, имеют такую форму, которая при наблюдении с любой точки представляется в виде эллипса. В природе известно единственное тело, обладающее таким свойством, — это эллипсоид. Любая проекция эллипсоида на плоскость дает эллипс.

Этот вывод подтверждается и теоретическими соображениями. В механике доказано, что всякое вращающееся жидкое тело, находящееся под действием только своих собственных сил притяжения, принимает в равновесном состоянии форму эллипсоида.

В частности, планеты имеют форму сжатых эллипсоидов вращения, потому что в масштабе всей планеты ее вещество ведет себя как жидкое. Сжатие, однако, у планет невелико. Показатель сжатия (12), вычисленный для

Земли, дал бы 0,03, для Юпитера 0,65, для самой сильно сжатой планеты Сатурн 1,03. Это зависит от угловой скорости вращения тела и его средней плотности. Чем

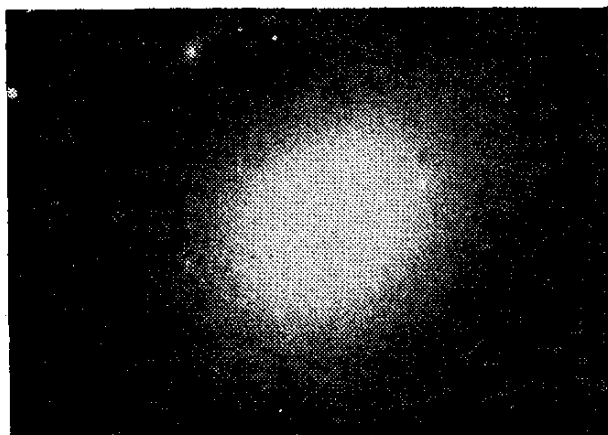


Рис. 31. Галактика NGC 4406 типа E3.

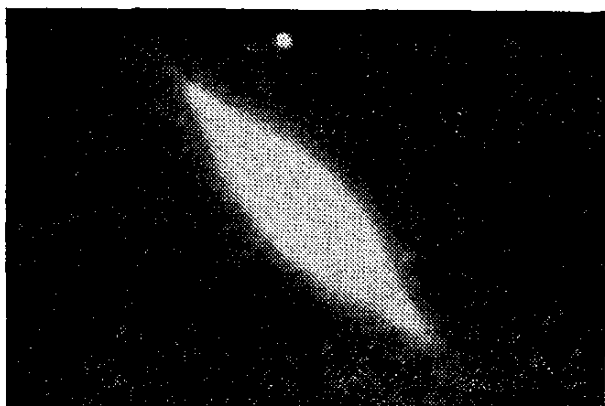


Рис. 32. Галактика NGC 3115 типа E7.

больше угловая скорость вращения и чем меньше плотность, тем больше сжатие.

Хотя звездная система не есть жидкое тело, можно привести серьезные аргументы в пользу того, что она в

состоянии равновесия также принимает форму, близкую к форме эллипсоида. Если к тому же использовать данные, известные о планетах, то можно принять, что эллиптические галактики имеют форму сжатых эллипсоидов вращения.

В зависимости от того, с какой стороны наблюдать сжатый эллипсоид вращения, он представляется более сжатым или менее сжатым эллипсом. Самое большое сжатие будет наблюдаться, если луч зрения перпендикулярен к оси вращения, т. е. галактика наблюдается с ребра. В этом случае сжатие эллипса характеризует форму эллипсоида и мы его назовем истинным сжатием эллиптической галактики. Чем меньше угол между лучом зрения и осью вращения эллипсоида, тем менее сжат наблюдаемый эллипс, а при совпадении луча зрения с осью вращения, т. е. при наблюдении в плане, будет виден круг.

Таким образом, истинное сжатие эллиптической галактики или больше ее видимого сжатия или равно ему.

Теперь невольно возникает вопрос, не является ли различное сжатие эллиптических галактик следствием одной только причины — различием ориентаций этих галактик по отношению к лучу зрения. Может быть, все эллиптические галактики имеют показатель истинного сжатия, равный 7, но в результате всевозможных ориентаций получаются различные у разных галактик показатели видимого сжатия — от 0 до 7?

Оказывается, на этот вопрос можно получить точный ответ, если сделать естественное предположение, что все направления осей вращения эллиптических галактик равновероятны, т. е. что все направления осей вращения встречаются одинаково часто. Это чисто математическая задача — по распределению видимых сжатий эллиптических галактик найти распределение их истинных сжатий — впервые была поставлена Хаблом. Впоследствии ее подробно исследовала К. В. Каврайская.

Решение задачи показало, что среди эллиптических галактик, входящих в состав скоплений галактик, преобладают показатели истинного сжатия 4, 5, 6, 7 и почти нет слабо сжатых и сферических галактик. А среди эллиптических галактик вне скоплений, наоборот, подавляющее большинство — галактики с очень слабым сжатием или сферические, т. е. с показателем истинного сжатия 1 и 0.

Интересно, что это различие не ограничивается формой. Эллиптические галактики в скоплениях галактик — это гигантские галактики, в то время как эллиптические галактики вне скоплений — это карлики в мире галактик. Таким образом, мы впервые встретились с явлением различия типажа галактик в разных областях Вселенной.

Спиральные галактики

С несколько однообразными эллиптическими галактиками контрастируют спиральные галактики, являющиеся, может быть, самыми живописными объектами во Вселенной. У эллиптических галактик внешний вид говорит о статичности, стационарности. Спиральные галактики, наоборот, являют собой пример динамичности формы. Их красивые ветви, выходящие из центрального ядра и как бы теряющие очертания за пределами галактики, указывают на мощное, стремительное движение. Поражает также многообразие форм и рисунков спиральных ветвей. Несмотря на это многообразие, Хабл уловил возможность разбить спиральные галактики на подклассы. Мерой служит степень развития ветвей и размер ядра галактики. Спиральями, обозначаемыми Sa , он назвал галактики, у которых ветви развиты слабо, в некоторых случаях только намечаются. Ядра у таких галактик всегда большие, обычно составляют около половины наблюдаемого размера самой галактики. Из спиральных галактик Sa наименее выразительны, в них есть черты эллиптических галактик. Примером галактики типа Sa является NGC 3898 (рис. 33). Эта галактика расположена в созвездии Большой Медведицы. Последнее выражение нужно понимать так, что галактика на видимом небе занимает место в области этого созвездия, но она, конечно, находится далеко за пределами нашей Галактики.

Другой пример — галактика NGC 1302, у которой спиральные ветви обозначены совсем слабо (рис. 34), а у NGC 3368 они несколько более развиты (рис. 35).

Как правило, у галактики имеются две спиральные ветви, берущие начало в противоположных точках ядра, развивающиеся сходным, симметричным образом и теряющиеся в противоположных областях периферии галактики. Однако известны примеры большего, чем двух, числа спиральных ветвей в галактике. В других случаях

спирали две, но они неравноправны — одна значительно более развита, чем другая.

Следующий подкласс — Sb. У галактик этого типа спиральные ветви уже заметно развиты, но не имеют богатых разветвлений. Ядра меньше, чем у Sa. Примерами могут служить галактики NGC 488, NGC 3521 и NGC 6384 (рис. 36—38).



Рис. 33. Галактика NGC 3898 типа Sa.

Мы их расположили в порядке возрастания (небольшого) развития ветвей. Для этих трех галактик характерна множественность спиральных ветвей. В отличие от них, у галактики NGC 210 также типа Sb (рис. 39) только две четко выраженные почти не разветвленные спиральные ветви.

Галактикой Sb является также известная туманность Андромеды (NGC 224), которую мы подробнее опишем ниже.

Галактики с сильно развитыми, разделяющимися на несколько рукавов ветвями и малым в сравнении с ними

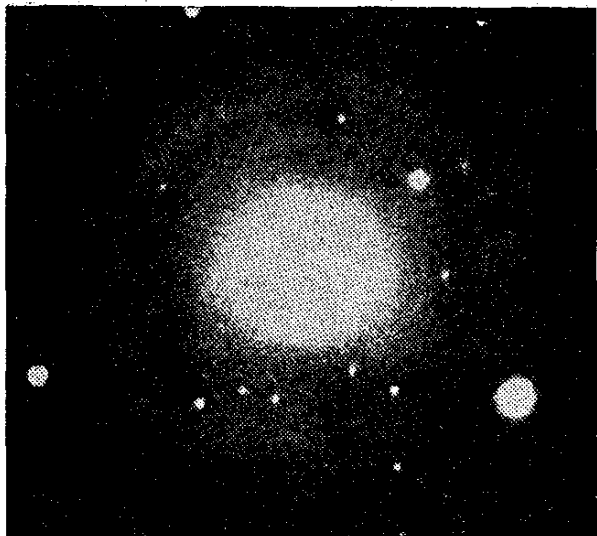


Рис. 34. Галактика NGC 1302 типа Sa.

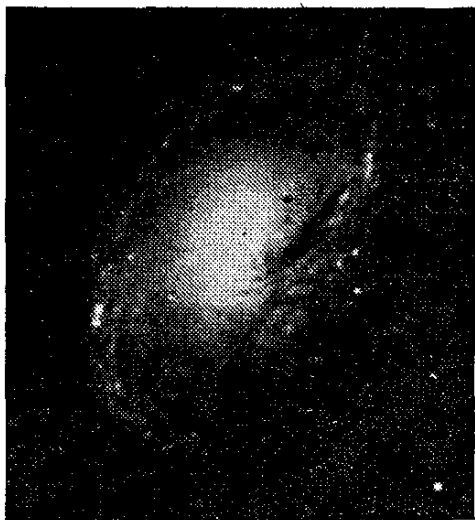


Рис. 35. Галактика NGC 3368 типа Sa.



Рис. 36. Галактика NGC 488 типа Sb.



Рис. 37. Галактика NGC 3521 типа Sb.



Рис. 38. Галактика NGC 6384 типа Sb.



Рис. 39. Галактика NGC 210 типа Sb.

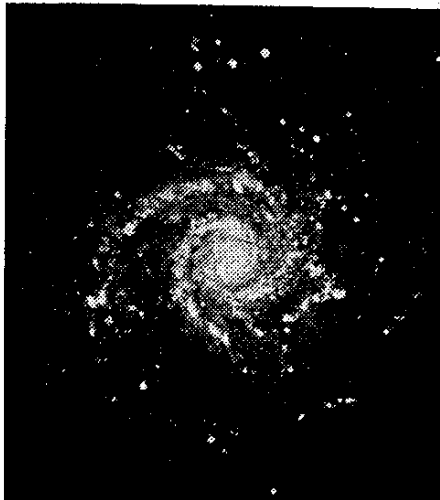


Рис. 40. Галактика NGC 628 типа Sc.

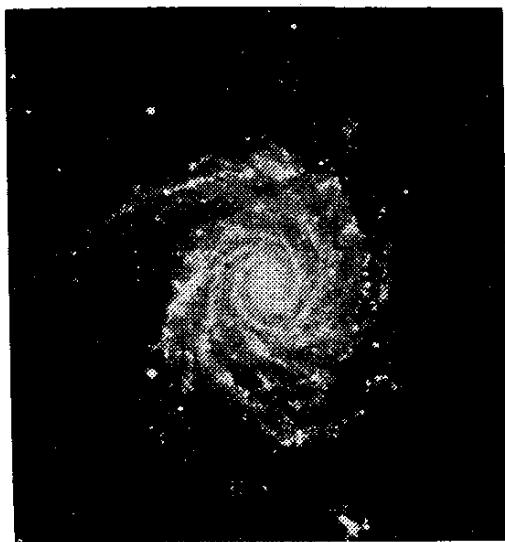


Рис. 41. Галактика NGC 1232 типа Sc.

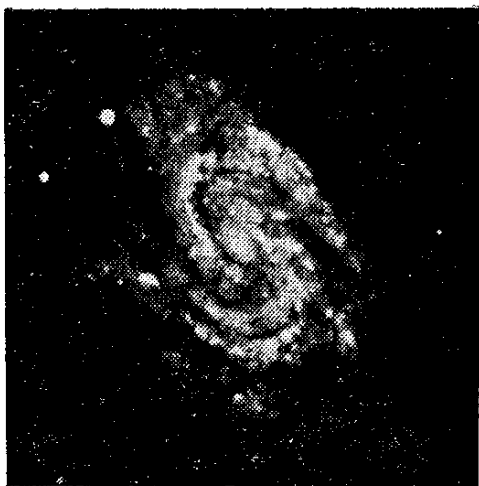


Рис. 42. Галактика NGC 157 типа Sc.

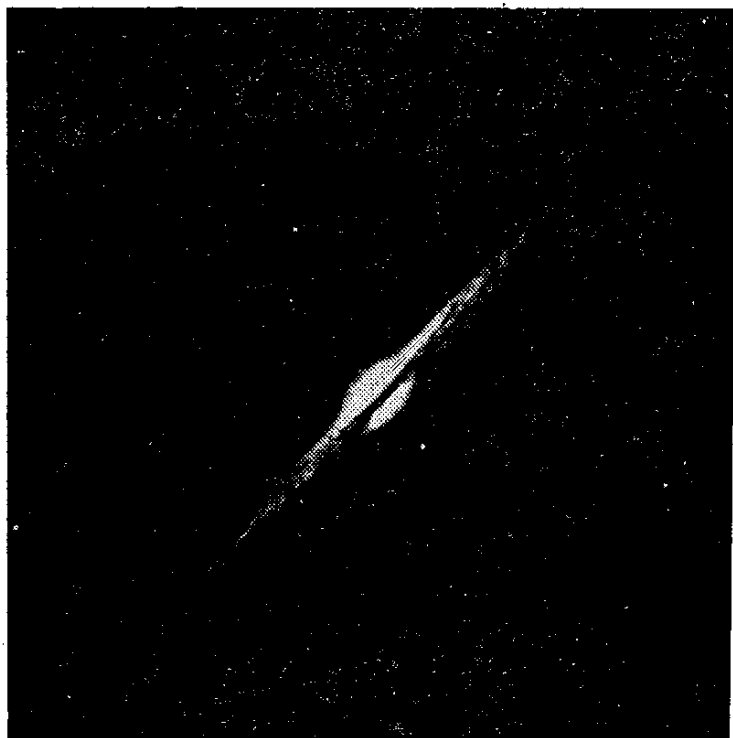


Рис. 43. Галактика NGC 4565 типа Sb, наблюдаемая с ребра.

ядром относятся к типу Sc. Яркими примерами спиралей такого типа являются NGC 628 (рис. 40), NGC 1232 (рис. 41) и NGC 157 (рис. 42).

Спиральные галактики, фотографии которых приведены на рис. 33—42, наблюдаются нами либо в плане, либо в три четверти. Как же выглядят спиральные галактики, если наблюдать их с ребра? Ответ на это дают фотографии на рис. 43, 44 и 71. Галактика NGC 4594 (см. рис. 71),



Рис. 44. Галактика NGC 4244 типа Sc, наблюдаемая с ребра.

принадлежащая к типу Sa, менее сильно сжата и имеет большое ядро; NGC 4565 (тип Sb) сжата сильнее и ядро ее меньше, наконец, у типа Sc(NGC 4244) — самое сильное сжатие и самое маленькое ядро.

У всех трех описанных галактик и вообще у всех спиральных галактик, наблюдаемых с ребра, видна темная полоса, как бы разделяющая галактику на две части (у NGC 4244 она выражена слабо). Эти темные полосы являются поразительным свидетельством общности наблюдаемых с ребра спиральных галактик и нашей звездной системы. Ведь в нашей Галактике около ее плоскости симметрии сосредоточена темная пылевая материя, поэтому внегалактический наблюдатель, рассматривая Галактику с ребра, тоже должен видеть темную полосу, как бы разделяющую Галактику на две части. Следовательно,

темная полоса, наблюдаемая в других спиральных галактиках, показывает, что и в них, как в нашей Галактике, имеется темная пылевая материя, сосредоточенная около плоскости симметрии.

Если вычислить по формуле (12) коэффициент сжатия у наблюдаемых с ребра спиральных галактик, то он всегда больше семи. Для спиралей Sa получается величина, близкая к 8, для спиралей Sb — от 8,5 до 9, для спиралей Sc — больше 9. В то же время, как отмечалось выше, у эллиптических галактик истинное сжатие никогда не превосходит значения 7.

Это очень важный наблюдательный факт. Он показывает, что в слабо сжатых звездных системах спиральная структура почему-то не может появиться. Для ее появления необходимо, чтобы система была сильно сжата, имела коэффициент сжатия 8 или больше.

Это обстоятельство было давно замечено. Шведский астроном Линдблад развил теорию, показывающую, как в сильно сжатой звездной системе вследствие неустойчивости движений звезд может развиваться спиральная структура. В этой теории недостаточно учтены астрофизические стороны вопроса — то, что спиральные ветви составлены в основном горячими гигантами, а не всеми звездами, и что в спиральных ветвях сосредоточены основные массы диффузной материи — межзвездного газа и межзвездной пыли.

Уверенно доказано, что сильно сжатая звездная система в ходе эволюции не может стать слабо сжатой. Невозможен и противоположный переход. Значит, эллиптические галактики не могут превращаться в спиральные, а спиральные в эллиптические. Эти два типа галактик не представляют собой две различные стадии общего эволюционного пути, а являются примером разных эволюционных путей, вызванных различным сжатием систем. А различное сжатие обусловлено разным количеством вращения систем. Те галактики, которые при формировании получили достаточное количество вращения, приняв сильно сжатую форму, в них развились спиральные ветви. Галактики, материя которых после формирования имела меньшее количество вращения, оказались менее сжатыми и эволюционируют в виде эллиптических галактик.

Если принять эту точку зрения, то нужно еще ответить на вопрос, почему в сильно сжатых системах — спиральных галактиках — наблюдаются и пылевая, и газовая

материи, а в слабо сжатых системах, эллиптических галактиках, диффузной материи обнаружить не удастся. Разве наличие пыли и газа может зависеть от сжатия системы? Ответ возможен такой. Пылинки и частицы газа, двигаясь по некоторым траекториям в звездных системах и встречаясь друг с другом, сталкиваются. Эти столкновения в значительной мере не упруги, вследствие чего после столкновения должна уменьшиться энергия



Рис. 45. Галактика NGC 5866.

движения частиц. А результатом уменьшения энергии движения должно быть оседание частиц в те места системы, где меньше потенциальная энергия. Точно так же, если неупруго столкнутся и потеряют скорость два движущихся навстречу друг другу искусственных спутника Земли, то они упадут на поверхность Земли, так как чем ближе тело к поверхно-

сти Земли, тем меньше его потенциальная энергия.

В сильно сжатых звездных системах областью низкого значения потенциальной энергии является главная плоскость системы. Сюда и оседает диффузная материя. В дальнейшем в главной плоскости движение газа и пыли происходит по круговым орбитам почти параллельно друг другу, так что столкновения между частицами почти не случаются, а если и случаются, то с ничтожной потерей энергии. Поэтому перемещение частиц в направлении центра системы, где потенциальная энергия еще меньше, практически не происходит.

Иное дело — слабо сжатые системы. В таких системах главная плоскость не является резко выраженной областью низких значений потенциальной энергии. Сильное уменьшение потенциальной энергии происходит только в направлении на центр системы. Поэтому частицы газа и пыли должны оседать у центра. Концентрация диффузной материи около одной точки создаст, конечно, гораздо более высокую плотность, чем концентрация ее около плоскости. Образовавшееся близ центра системы облако

из пыли и газа станет сжиматься под действием своего собственного притяжения, станет малым по размерам.

Что будет происходить дальше, определенно сказать нельзя. Возможно, что из масс диффузной материи станут формироваться звезды. Но очевидно уже, что малое по размерам плотное облако в центре звездной системы, вообравшее в себя весь газ и всю пыль системы, становится незаметным, не обнаруживает себя при наблюдениях.

Можно указать на случай критического для характера оседания пыли и газа сжатия. На рис. 45 показана наблюдаемая с ребра галактика NGC 5866, сжатие которой недостаточно сильно, чтобы пыль и газ собрались вдоль всей главной плоскости, и недостаточно слабо, чтобы они сконцентрировались у самого центра. Наблюдается промежуточный случай концентрации диффузной материи около небольшой плоской области, окружающей центр.

Спиральные галактики с перемычкой

У обычных спиральных галактик ветви выходят непосредственно из круглого ядра. Но встречаются спиральные галактики особого вида. У них ядро находится в середине прямой перемычки и спиральные ветви начинаются лишь у концов этой перемычки. Новая своеобразная структурная деталь — перемычка — определила название таких спиральных галактик. На рис. 46 и 47 приведены фотографии галактик NGC 4548 и NGC 1073 с перемычкой или, как их еще называют, пересеченных спиралей.

Пересеченные спирали, как и обычные, по степени развития их ветвей подразделяются на три подкласса, обозначаемые SBa, SBb и SBc. Добавление прописной буквы B указывает на присутствие перемычки (от английского слова *bar* — перемычка, брусок). NGC 4548 принадлежит к типу SBb, а NGC 1073 — к типу SBc.

Причина появления перемычек у некоторых спиральных галактик, в то время как у других они отсутствуют, пока неясна.

Мы писали выше, что наша звездная система имеет спиральную структуру, следовательно, это спиральная галактика. К какому же подклассу спиральных галактик ее следует отнести? Исследования, основанные на сравнении звездного состава, размеров ядра и некоторых свойств спиральных ветвей, приведут к выводу, что Галактика принадлежит к типу Sb или Sc. Полной определенности



Рис. 46. Галактика NGC 4548 типа SBb.

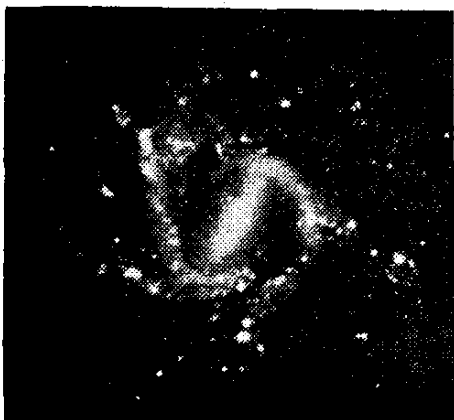


Рис. 47. Галактика NGC 1073 типа SBc.

здесь еще нет, к тому же подтипы не разграничены строго. Признаков перемычки у Галактики обнаружить не удастся, так что это обыкновенная спираль, а не спираль с перемычкой.

Чечевицеобразные галактики

Спиральные галактики, наблюдаемые с ребра, имеют вид сильно сжатого эллипса с утолщением — ядром в центре и полосой темной материи, тянущейся вдоль ребра.

Поэтому если в каком-нибудь участке неба имеется (наряду с галактиками иных типов) некоторое число сильно сжатых, наблюдаемых с ребра галактик, то там же обычно можно видеть и спиральные галактики с отчетливым рисунком спиральных ветвей, наблюдаемые в плане. Это станет понятным, если считать, что у спиральных галактик нет преимущественной ориентации в пространстве и потому часть из них в данной области обращена к нам своим ребром, а часть наблюдается в плане.

Но есть области неба, в которых упомянутое правило нарушается. Там, где галактики расположены очень тесно друг к другу (образуют плотные скопления галактик), иногда можно наблюдать значительное число сильно сжатых обращенных к нам ребром галактик, при отсутствии галактик, наблюдаемых в плане и показывающих рисунок спиральных ветвей. Там же имеются эллиптические галактики различных видимых сжатий, в том числе почти круглые.

Это явление можно было бы объяснить, предположив, что в данном скоплении все спиральные галактики одинаковым образом ориентированы в пространстве, а именно ребром к нам. Но исследования показали, что повсюду в других областях неба удовлетворяется условие равной вероятности всех ориентаций галактик. Кроме того, представляется невероятным, чтобы во всех тех, правда, немногих случаях, когда правило равной вероятности ориентаций нарушается и господствует одна ориентация, это была обязательно ориентация ребром к нам.

Естественнее допустить, что в некоторых областях пространства встречаются галактики сильно сжатые и имеющие ядро, как спиральные галактики, но лишенные спиральной структуры и поэтому при наблюдении в плане похожие на эллиптические галактики. Эта точка зрения находит подтверждение в том, что в данном случае у наблюдаемых с ребра галактик нет обычной полосы темной материи, тянущейся вдоль ребра. Спиральная структура всегда связана с темной материей и отсутствие последней показывает, что галактика лишена спиральной структуры.

Такой ход рассуждений привел к установлению существования в некоторых случаях галактик сильно сжатых, как спиральные, и имеющих ядра, но в остальном схожих с эллиптическими галактиками. Эти галактики получили обозначение S0. Обозначение, может быть, не

очень удачное, поскольку буква S означает спиральную структуру, которой в данном случае как раз нет. Галактики S0 иногда называют чечевицеобразными.

На рис. 48 приведена фотография галактики NGC 524 типа S0, наблюдаемой в плане. От эллиптических галактик ее отличает наличие ядра и более разреженной внешней области. При наблюдении с ребра эта галактика показала бы сильное сжатие.

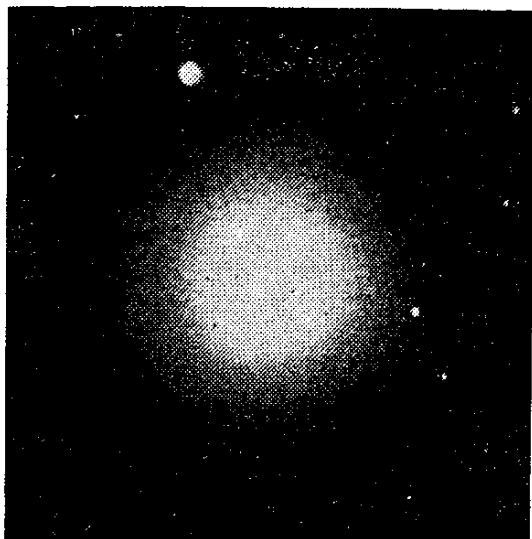


Рис. 48. Галактика NGC 524 типа S0.

На рис. 49 дана фотография галактики NGC 4762 типа S0. Эта галактика — наиболее сильно сжатая из известных галактик, наблюдаемых с ребра. От спиралей, наблюдаемых с ребра, ее отличает полное отсутствие полосы темной материи.

Американские астрономы Спидер и Шварцшильд предложили гипотезу, согласно которой галактики S0 образуются в результате выметания пылевой и газовой материи из спиральных галактик. Это, например, может происходить в тех случаях, когда две спиральные галактики сталкиваются. Так как расстояния между звездами чрезвычайно велики в сравнении с их размерами, столкновений между звездным составом происходить не будет;

одна галактика пройдет сквозь другую, не потеряв ни одной из своих звезд. Иное дело пылевая и газовая материя. Они столкнутся с большой скоростью и будут выброшены из обеих галактик. Правильнее будет сказать, что при столкновении двух галактик системы звезд пройдут одна сквозь другую и разойдутся, а столкнувшаяся диффузная материя останется на месте встречи.

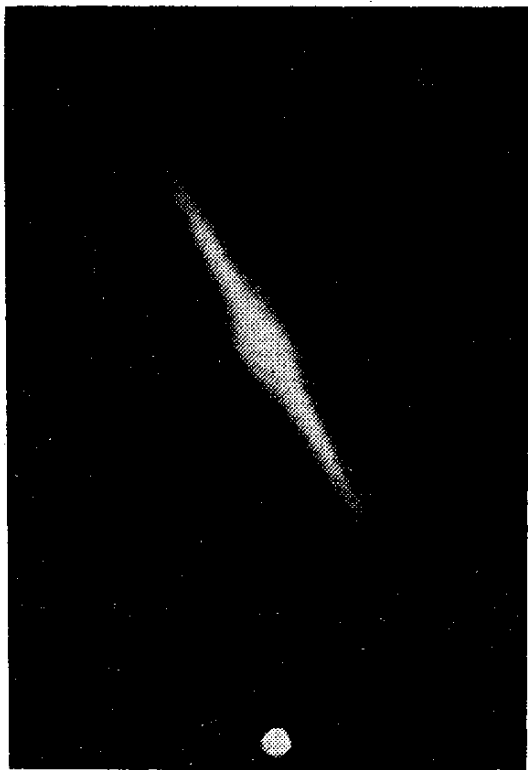


Рис. 49. Галактика NGC 4762 типа S0, наблюдаемая с ребра.

Другая возможность утраты диффузной материи появляется, когда спиральная галактика проходит вблизи центра скопления галактик, где должны постепенно сосредотачиваться газ и пыль, уже выброшенные из других галактик при их столкновениях. Снова столкновение газа и пыли, находящихся в галактике, с расположенными вне

ее приведет к их выметанию из галактики. Как нам кажется, именно этот процесс — потеря диффузной материи при прохождении галактик через область около центра скопления — может играть основную роль при образовании галактик S0. Именно в богатых и плотных скоплениях обычно многочисленны галактики типа S0.

Неправильные галактики

Перечисленные нами до сих пор типы галактик характеризовались симметричностью формы и определенным характером рисунка. Но встречается большое число галактик неправильной формы, без какой-либо общей закономерности структурного строения. Хаббл дал им обозначение I от английского слова *irregular* — неправильный.

Почему у одних галактик форма правильная, а у других неправильная?

Если в момент своего формирования галактика имела неправильную форму, то по истечении определенного времени в результате движений звезд в общем силовом поле системы и их перемешивания форма галактики станет симметричной, правильной. Теоретическое изучение этого вопроса показывает, что время, необходимое для принятия правильной формы, зависит от средней плотности материи в системе. А именно, требуемое время обратно пропорционально корню квадратному из средней плотности материи в системе, так что чем плотнее система, тем быстрее протекает процесс принятия правильной формы. В системах со средней плотностью материи 10^{-24} г/см³, какую можно предположить для нашей Галактики, нужное время составляет около 1 миллиарда лет, что в несколько раз меньше времени существования Галактики. Поэтому Галактика имеет в целом форму равновесного эллипсоида вращения.

Неправильная форма у галактики может быть вследствие того, что она не успела принять правильной формы из-за малой плотности в ней материи или из-за молодого возраста. Есть и другая возможность: Галактика может стать неправильной вследствие искажения формы в результате взаимодействия с другой галактикой.

По-видимому, оба эти случая встречаются среди неправильных галактик и, может быть, с этим связано разделение неправильных галактик на два подтипа.

Подтип I I характеризуется сравнительно высокой поверхностной яркостью и сложностью неправильной структуры. На рис. 50 и 51 изображены галактики NGC 2574 и NGC 5204 подтипа I I.

Французский астроном Вокулер в некоторых галактиках этого подтипа, например в Магеллановых Облаках,

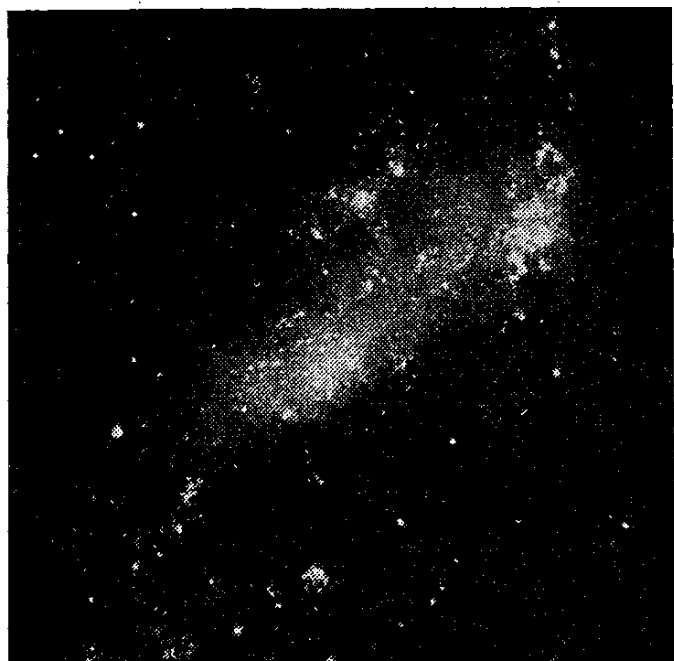


Рис. 50. Галактика NGC 2574 подтипа II.

обнаружил признаки разрушенной спиральной структуры. Некоторые черты спиральной формы можно усмотреть и у NGC 5204 (рис. 51). Кроме того, Вокулер заметил, что галактики подтипа I I часто встречаются парами. Например, пары расположенных близко друг к другу галактик NGC 4027 и NGC 4038, NGC 4618 и NGC 4625, сходных с Магеллановыми Облаками, несомненно, относятся к подтипу I I. Поэтому Вокулер пришел к выводу, что эти галактики в прошлом были правильными, некоторые, в частности, спиральными. Однако в результате взаимодействия с другой, находящейся или находившейся близко галактикой, форма галактики исказилась, а если

имелась спиральная структура, то она в значительной степени разрушилась. То что такие галактики часто встречаются парами, говорит в пользу предположения Вокулера, так как в этом случае как раз и должно наблюдаться искажение формы у обеих галактик вследствие их взаимодействия.

Существование одиночных галактик этого типа также может быть объяснено. Встреча с другой галактикой могла иметь место в прошлом, теперь галактики разошлись,

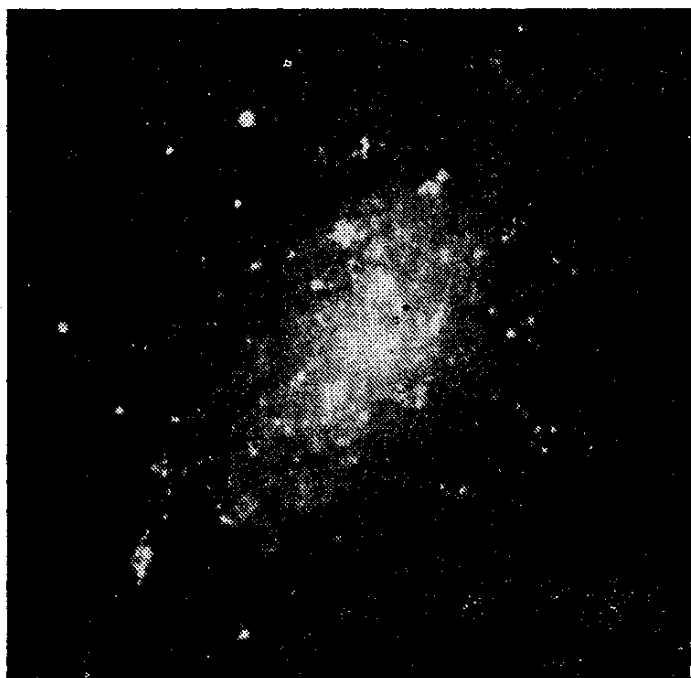


Рис. 51. Галактика NGC 5204 подтипа I I.

по для того, чтобы принять снова правильную форму, им требуется длительное время.

Неправильные галактики другого подтипа, обозначаемого I II, отличаются очень низкой поверхностной яркостью. Эта черта выделяет их среди галактик всех других типов. В то же время она препятствует обнаружению этих галактик, вследствие чего удалось выявить только несколько галактик подтипа I II, расположенных срав-

нительно близко. На рис. 52 приведена фотография такой галактики в созвездии Льва. Мы не имеем возможности привести другие фотографии этих галактик, так как вследствие их низкой поверхностной яркости фотографии непригодны для воспроизведения в книге. Галактики I II отличаются также отсутствием ярко выраженной структуры. В этом отношении они несколько напоминают

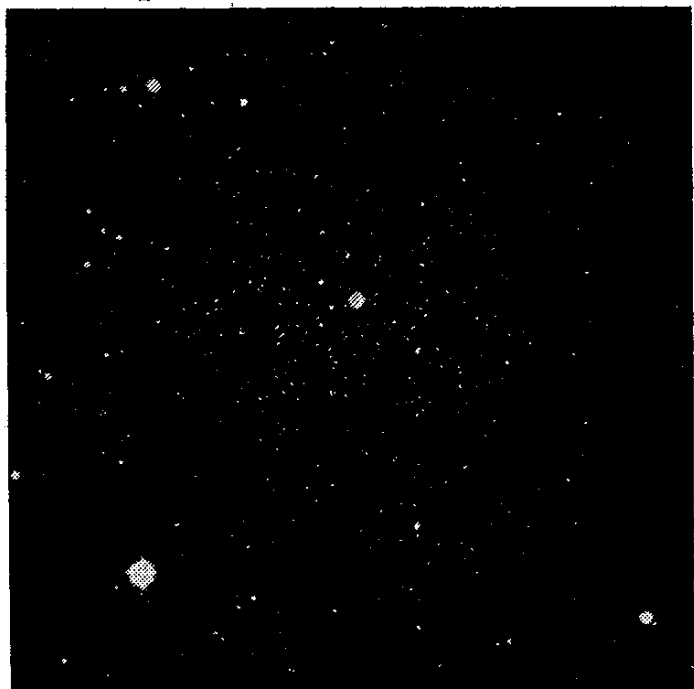


Рис. 52. Галактика в созвездии Льва подтипа I II.

эллиптические галактики и некоторые исследователи склонны относить их именно к этому типу, а не к неправильным галактикам. Но форма их не вполне правильная.

Если галактика имеет очень низкую поверхностную яркость при обычных линейных размерах, то это означает, что в ней очень мала звездная плотность и, следовательно, очень мала плотность материи. Поэтому в галактиках I II дольше, чем в других галактиках, должен длиться процесс перехода к правильной форме и, вероятно, поэтому эти рыхлые, некомпактные системы имеют до сих пор неправильную форму.

Иглообразные галактики

Вращающееся жидкое тело под действием внутренних сил в равновесном состоянии принимает форму эллипсоида. В общей теории этой задачи доказывается, что при определенных соотношениях между плотностью жидкости и угловой скоростью вращения эллипсоид может быть и сжатым эллипсоидом вращения и вытянутым трехосным эллипсоидом напоминающим сигару или даже иглу.

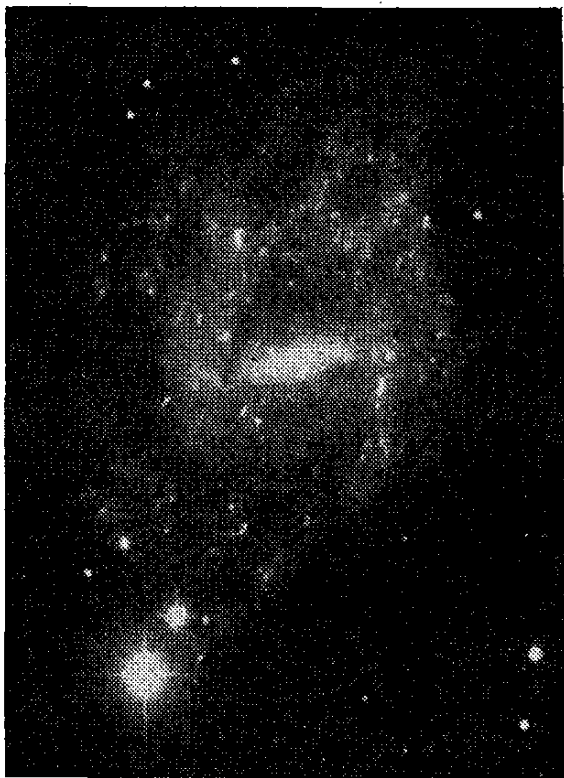


Рис. 53. Галактика NGC 7741 с сигарообразной перемычкой (на рисунке горизонтальна).

Эта теория может быть приложена к изучению фигур планет и крупных спутников планет, потому что в масштабе всей планеты ее материя ведет себя как жидкое вещество. Среди планет и их спутников нет очень быстро



Рис. 54. Галактика, состоящая из перемычки и слабо развитых ветвей.



Рис. 55. Галактика NGC 2685 с кольцевой структурой и сигарообразным телом.

вращающихся, поэтому применение теории всегда приводит к фигурам равновесия в виде сжатых эллипсоидов вращения, которые действительно очень хорошо представляют наблюдаемые фигуры планет.

Таким образом, из возможных фигур равновесия природа до сих пор реализовывала как будто только сжатые эллипсоиды вращения.

По этой причине исследователи галактик долгое время молчаливо предполагали, что и вращающиеся звездные системы, придя в равновесие, должны обязательно принять форму сжатого эллипсоида вращения. Однако в 1956 г. К. Ф. Огородников, специально рассмотрев вопрос о применимости теории фигур равновесия жидких тел к звездным системам, пришел к выводу, что среди звездных



Рис. 56. Галактика, вероятно, имеющая удлиненную форму.

систем могут быть и такие, которые приняли форму вытянутого трехосного эллипсоида.

Оказалось, что можно привести и наблюдательные аргументы в пользу этого предположения. Прежде всего ими являются перемычки пересеченных спиральных галактик. В самом деле, например, у галактики NGC 7744 на рис. 53 главная плоскость параллельна плоскости рисунка. Поэтому ясно, что перемычка — это не диск, наблюдаемый с ребра, а сигарообразное тело.

Перемычка — это еще не целая галактика, но она тоже составлена из звезд, и существование большого числа таких равновесных, составленных из звезд, сигарообразных тел весьма знаменательно. В некоторых случаях перемычка составляет большую часть спиральной галактики, спиральные ветви еще мало развиты, как это видно, например, на рис. 54.

Еще более наглядный пример представляет своеобразная галактика NGC 2685 (рис. 55). Хорошо видно, что главное тело окружает кольцевая структура. Расположение ее с очевидностью показывает, что главное тело галактики имеет сигарообразную форму, а не форму диска, иначе кольцообразная структура не могла бы его охватывать. Но если бы слабая кольцевая структура этой галактики не проявилась на снимке, мы приняли бы NGC 2685 за обычную галактику Е, наблюдаемую с ребра.

Наконец, К. Ф. Огородников приводит примеры галактик (одна из них изображена на рис. 56), которые, вероятно, имеют форму вытянутых трехосных эллипсоидов — сигар, а не являются дисками, наблюдаемыми с ребра. Для таких галактик характерно отсутствие ядра — утолщения, наблюдаемого в центральной части. К. Ф. Огородников назвал эти галактики иглообразными.

Видимые звездные величины и светимости галактик

Только три галактики можно наблюдать невооруженным глазом — Большое Магелланово Облако, Малое Магелланово Облако и туманность Андромеды. Магеллановы Облака наблюдаются простым глазом легко, блеск Большого Облака соответствует блеску звезды видимой звездной величины $+1,2$, а Малого Облака — блеску звезды с $m = +2,8$. Но эти две галактики находятся на южном небе и мы, жители северного полушария Земли, лишены возможности их видеть. Туманность Андромеды (NGC 224) находится на северном небе. Она имеет видимую звездную величину $+4,3$, поэтому ее можно видеть в виде слабого пятнышка в созвездии Андромеды в ясную безлунную ночь.

Следующая по блеску галактика NGC 598 в созвездии Треугольника должна уже наблюдаться в бинокль. Ее видимая звездная величина $+6,0$.

В табл. 6 приведены данные о десяти ярчайших галактиках неба (БМО, ММО — Большое и Малое Магеллановы Облака).

Абсолютные звездные величины галактик вычислены по формуле (6) на с. 18.

Среди галактик, как и среди звезд, можно встретить галактики-карлики, галактики средней светимости, галактики-гиганты и галактики-сверхгиганты. На нашу с Вами, читатель, долю выпал редкий случай. Мы живем в сверхгигантской системе, сверхгигантской галактике. Такие выдающиеся по светимости, размерам и числу звезд галактики попадаются не более одной на тысячу галактик. И еще редкое событие состоит в том, что одна из ближайших к нам галактик NGC 224 (туманность Андромеды) — тоже является сверхгигантской галактикой. Так что не все обыденно в нашем положении во Вселенной. Плана, на которой мы живем, занимает скромное положение

Т а б л и ц а 6. Десять ярчайших галактик

Название или № по NGC	Видимая звездная величина	Тип	Расстояние, кпс	Абсолютная звездная величина	Угловые размеры в минутах дуги
БМО	$1^m,2$	I II	46	$-17^m,4$	780
ММО	2,8	I II	46	-16,0	180
224	4,3	Sb	460	-19,8	197×92
598	6,0	Sc	480	-17,6	83×53
253	7,6	Sc	4200	-21,4	30×5
55	7,8	Sc	1900	-19,1	24×6
5236	8,0	Sc	1800	-19,1	10×8
3031	8,1	Sb	1540	-18,7	16×10
4594	8,6	Sb	5000	-20,7	$7 \times 1,5$
5457	8,6	Sb	1800	-18,5	22×22

среди планет Солнечной системы, наша звезда — Солнце — заурядное светило звездной системы, но сама наша звездная система — выдающаяся в мире галактик. Не единственная, не исключительная, но выдающаяся.

В списке ярчайших галактик фигурируют еще сверхгигантские галактики NGC 4594 и NGC 253, их светимость даже больше светимости Галактики и туманности Андромеды. Но это уже сравнительно удаленные звездные системы и в число ярчайших они попадают из-за своей чрезвычайно высокой светимости. Еще более выдающимися

ся сверхгигантами, чемпионами светимости, являются две галактики, NGC 4874 и NGC 4889, находящиеся в центре скопления галактик в созвездии Волос Вероники. Их абсолютная звездная величина равна -22^m . Следовательно, каждая из них светит как семь галактик, подобных нашей. Сверхгигантскими мы можем считать такие галактики, абсолютные звездные величины которых меньше чем $-19^m,0$, а к числу гигантских отнести галактики с абсолютной звездной величиной, заключенной между $-17^m,0$ и $-19^m,0$. Мы видим, что все ярчайшие галактики, кроме Малого Магелланова Облака, относятся к сверхгигантским или гигантским. Малое Магелланово Облако оказалось среди ярчайших потому, что это ближайшая (наряду с Большим Магеллановым Облаком) к нам галактика. Другие близкие галактики средних светимостей и галактики-карлики в число ярчайших, несмотря на их близость, не попадают. Галактики средних светимостей имеют абсолютную звездную величину, заключенную между $-15^m,0$ и $-17^m,0$, а у карликов абсолютная звездная величина больше $-15^m,0$. Очень многочисленны карликовые галактики с $M = -14^m$ и -13^m .

Самой слабой по светимости карликовой галактикой из обнаруженных до сих пор является неправильная галактика в созвездии Козерога, которую открыл Цвикки. Ее абсолютная звездная величина $-6^m,5$. Она слабее, чем обычные шаровые скопления.

Итак, диапазон значений M известных галактик простирается от -22^m до $-6^m,5$. Рекордсмены по светимости среди галактик излучают в миллион раз интенсивнее, чем самая слабая карликовая галактика.

Выработав систему классификации галактик, Хабл изучил 600 ярких галактик и получил их распределение по типам в процентах, приведенное в табл. 7. Неправильных галактик и галактик S0 оказалось очень мало и Хабл их в статистику не включил.

Т а б л и ц а 7. Распределение галактик по типам

E	Sa+SBa	Sb+SBb	Sc+SBe
17%	19%	26%	38%

Можно ли считать, что данные табл. 7 отражают реальное соотношение галактик различных типов в пространстве и притом более или менее повсюду? Так можно было бы считать, если бы галактики всех типов обнаруживались одинаково легко, т. е. если бы они имели одинаковую светимость и одинаковую поверхностную яркость. Но на самом деле спирали имеют в среднем большую светимость, чем эллиптические галактики. Поэтому спирали различаются на больших расстояниях и они были взяты Хаблом из большего объема, чем эллиптические галактики. Из этого следует, что действительная доля эллиптических галактик больше, а спиральных меньше, чем показано в табл. 7.

Особенно ошибочны данные таблицы в отношении неправильных галактик. Их численность предполагалась пренебрежимо малой. Неправильные галактики в среднем имеют низкие светимости, в особенности галактики типа I II, у которых к тому же очень слабая поверхностная яркость. Если бы было возможно рассмотреть все галактики типа I I и особенно I II, в том же объеме пространства, из которого выбраны в статистике Хабла спиральные галактики, то число их составило бы много сотен, а процент, по-видимому, был бы наибольшим.

Ван ден Берг, исследовав расстояния галактик до 12-й видимой звездной величины, установил, как распределяются по численности галактики различной абсолютной звездной величины. Он пришел к выводу, что в 1000 Мпс^3 метagalактического пространства содержатся в среднем следующие количества спиральных галактик совместно с неправильными и отдельно эллиптических галактик (табл. 8).

Т а б л и ц а 8. Распределение галактик по абсолютным величинам

Абсолютная звездная величина	Количество галактик S и I в 1000 Мпс^3	Количество галактик E в 1000 Мпс^3
от $-21^m,0$ до $-22^m,0$	0,025	—
от $-20,0$ до $-21,0$	0,52	0,091
от $-19,0$ до $-20,0$	6,9	1,7
от $-18,0$ до $-19,0$	19	5,5
от $-17,0$ до $-18,0$	30	6,9
от $-16,0$ до $-17,0$	55	9,1
от $-15,0$ до $-16,0$	155	

Мы видим, что сверхгигантские галактики встречаются чрезвычайно редко: с M от -20^m до -21^m — одна на 2000 Мпс³, а с M от -21^m до -22^m — одна на 40 000 Мпс³. Галактики умеренной светимости и в особенности карликовые гораздо многочисленнее.

Два типа населения в звездных системах

Описывая строение Галактики, мы отмечали особенности расположения в ней звезд различных типов и диффузной материи. Совокупность одинаковых объектов образует свою подсистему определенной толщины. Спиральные ветви составлены в основном звездами — горячими гигантами и диффузной материей. Здесь же располагаются рассеянные скопления, а шаровые наоборот, находятся на значительных расстояниях от плоскости галактики.

Исследование галактик показало, что эти особенности характерны и для других спиральных галактик. Если же использовать еще данные о звездном составе эллиптических и неправильных галактик, то можно сформулировать следующую закономерность. Существует два типа звездного населения. В звездное население I типа входят: звезды — горячие гиганты и сверхгиганты, долгопериодические цефеиды, новые и сверхновые звезды, рассеянные скопления, водородные облака, пылевые туманности. Звездное население I типа располагается близ главных плоскостей спиральных галактик, концентрируясь при этом в ветвях и избегая ядер. Население I типа богато представлено также в неправильных галактиках подтипа I I, что снова указывает на возможную связь этих галактик со спиральными галактиками. Звездное население II типа складывается из звезд-субкарликов, красных карликов, красных гигантов, короткопериодических цефеид, шаровых скоплений. Звездное население II типа образует ядра спиральных галактик. Оно преобладает в областях спиральных галактик, удаленных от главной плоскости; из него составлены эллиптические галактики и неправильные галактики подтипа I II.

Объекты населения I и II типов как бы избегают друг друга. Например, долгопериодические цефеиды не встречаются в шаровых скоплениях, где много короткопериодических цефеид. В эллиптических галактиках и шаровых

скоплениях много красных гигантов, но в них нет горячих сверхгигантов, пыли и газа.

В среднем объекты, принадлежащие к населению I типа, характеризуются более высокой температурой. Места, где они располагаются — ветви спиральных галактик, неправильные галактики I I — имеют более бело-голубой цвет, тогда как области, заполненные населением II типа — эллиптические галактики, неправильные галактики I II, ядра спиралей — заметно желтее.

Еще одна особенность состоит в том, что количество излучаемой энергии, приходящейся на единицу массы, у объектов населения I типа значительно, в сотни раз, выше, чем у объектов населения II типа. Это объясняется тем, что голубые гиганты и сверхгиганты, характеризующие в основном население I типа, излучают в тысячи и миллионы раз больше энергии, чем субкарлики и красные карлики, определяющие население II типа, а превосходство в массах у них только 10- — 100-кратное.

Если ввести физическую характеристику f , равную отношению массы звезды к ее светимости

$$f = \frac{m}{L},$$

причем массу выражать в единицах массы Солнца, а светимость в единицах светимости Солнца, так что для Солнца $f = 1$, то у звезд — горячих гигантов f будет получаться очень малым, а у красных карликов большим. В табл. 9 приводятся вычисленные значения f для звезд различных спектральных классов главной последовательности.

Т а б л и ц а 9. Отношение массы к светимости у звезд различных спектральных классов

Спектральный класс	f	Спектральный класс	f
O5	0,0001	(CG2 олице)	1,0
B5	0,01	K0	3
A0	0,05	K5	12
F0	0,2	M0	65
G0	0,8	M5	120

Если каким-нибудь способом определить массу галактики и ее светимость, то можно вычислить величину f и для нее. Эта работа была проделана для галактик различ-

ного типа американскими астрономами супругами Бер-бидж. Получились результаты, приведенные в табл. 10.

Трудность здесь заключается в определении масс галактик. Поэтому полученные результаты не очень точны. Однако, как и следовало ожидать, в эллиптических галактиках, где нет звезд горячих гигантов и сверхгигантов, преобладают желтые и красные карлики спектральных классов К и М, значение f велико. Оно значительно меньше у неправильных галактик I I и спиральных галактик Sc, в состав которых наряду с другими звездами входит много горячих гигантов и сверхгигантов спектральных классов О и В. В спиралях Sb, где спиральные ветви менее развиты, чем у Sc, горячих гигантов меньше и потому величина f больше. Еще больше она у Sa и S0, хотя и

Т а б л и ц а 10. Среднее значение отношения массы к светимости у галактик различных типов

Тип галактики	I I	I II	Sc	Sb	Sa	S0	E
Среднее значение f	5	10	7	14	20	21	41
Число изученных галактик данного типа	3	1	6	5	1	2	2

не так велика, как у эллиптических галактик. Что касается неправильных галактик I II, то полученный Бер-биджами для них результат $f=10$ представляется спорным. Карликовые галактики I II составлены звездным населением II типа. В них совершенно нет звезд — горячих гигантов и значение f должно быть существенно больше. Неверный результат объясняется тем, что для галактик I II очень трудно найти надежное значение массы, и тем, что результат основывается только на одной галактике данного типа.

Спектры галактик

Излучение галактики есть результат сложения света всех ее звезд. Также и спектр галактики есть суммированный спектр ее звезд. Поэтому по спектру галактики можно вынести определенное суждение о ее звездном составе, хотя, конечно, решить точно задачу, сколько звезд какого спектрального класса содержится в галакти-

ке, по ее спектру нельзя. Зная слагаемые, можно точно определить сумму, но иметь сумму недостаточно, чтобы определить слагаемые.

Самый простой способ изучения спектра галактики состоит в сравнении его со спектрами звезд, нахождении похожего спектра и определении на основании сходства «спектрального класса» галактики. Сравнение выполняется достаточно уверенно, хотя, конечно, нет такой звезды и такой галактики, у которых спектры совпадали бы во всех подробностях.

Если у галактики оказывается более ранний спектральный класс, то можно утверждать, что в ее излучении значительную роль играют звезды ранних спектральных классов, по-видимому, в ней преобладает население I типа, много горячих гигантов и сверхгигантов. Если, наоборот, спектральный класс галактики более поздний, то это служит указанием на большое число звезд поздних спектральных классов, многочисленность красных гигантов и сверхгигантов, отсутствие населения I типа или бедность его.

Результаты исследования спектров галактик различных типов подтверждают данные о составе их звездного населения. Самые ранние спектральные классы у неправильных галактик I I, затем у спиралей Sc, Sb, Sa и самые поздние у эллиптических галактик. Если у большого числа галактик каждого типа определить средний спектральный класс, то получатся результаты, приведенные в табл. 11, которые можно объяснить тем, что по мере последовательного перехода от галактик I I к E доля звездного населения I типа в галактике уменьшается.

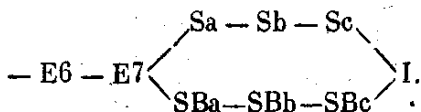
Т а б л и ц а 11. Средние спектральные классы галактик различных типов

Тип галактики	Средний спектр	Тип галактики	Средний спектр
II	F2	Sa	G1
Sc	F6	SO	G2
Sb	F9	E	G4

Как и у звезд, в соответствии со спектром изменяется цвет галактики. Чем более ранний спектр, тем галактика белее, голубее, чем более поздний спектр, тем она желтее, краснее.

Последовательность типов галактик

Хабл, произведя классификацию галактик, построил последовательность их типов, имеющую следующий вид: E0 — E1 — E2 — E3 — E4 — E5 —



Хабл полагал, что последовательность типов имеет эволюционный смысл и основывался на гипотезе выдающегося английского астронома Джинса о происхождении и эволюции галактик. Согласно этой гипотезе эллиптические галактики считались гигантскими газовыми туманностями. Предполагалось, что газовая туманность, охлаждаясь, сжимаясь и вращаясь вследствие этого быстрее, становилась все более сжатой, проходя последовательно стадии E0 — E1 — E2 — E3 — E4 — E5 — E6 — E7, после чего скорость вращения становилась критической и на экваторе образовывалась зона неустойчивости, вызывающая выброс материи. Истекающая газовая материя двигалась по спиралям и в это время в ней конденсировались звезды. После этого спиральные ветви расслаивались и звездная система принимала бесформенный вид. Таким образом, согласно Джинсу газовая туманность проходила весь путь вдоль последовательности от E0 до I I, превращаясь постепенно в звездную систему. Согласно Джинсу в спиральных галактиках ядро должно еще состоять из газа, а ветви уже наполнены звездами. Теперь мы знаем, что и эллиптические галактики и ядра спиральных галактик — это не газовые туманности, а звездные системы. Гипотеза Джинса оказалась опровергнутой наблюдениями. Однако она оставила след в терминологии. В те дни, когда эта гипотеза считалась весьма правдоподобной, галактики, расположенные в левой части последовательности, стали называть галактиками ранних типов, поскольку они по гипотезе находились на ранних стадиях эволюции. Соответственно галактики на другой части последовательности стали называть галактиками поздних типов. Эта терминология сохранилась и в наши дни, несмотря на то, что она противоречит нынешним представлениям об эволюции галактик. Сейчас последовательность Хабла понимают не как эволюционную, а как последователь-

ность типов. Одна галактика, не проходя в ходе эволюции всю последовательность от одного конца до другого. Но у любых двух галактик, занимающих соседние положения в последовательности, мало отличающиеся физические характеристики и сходный путь эволюции. Впрочем, участок последовательности $Sa - Sb - Sc$, по-видимому, имеет и эволюционный смысл. Но, скорее всего, здесь эволюция протекает в направлении, обратном предположенному Джинсом, т. е. от Sc к Sb и от Sb к Sa . Так можно считать потому, что в спиральных Sc больше всего молодых звезд — горячих гигантов и сверхгигантов, а в спиральных Sa их меньше всего. А чем больше молодых звезд в галактике, тем, надо полагать, моложе и она сама.

Спиральная галактика не может в ходе эволюции превратиться в эллиптическую, а эллиптическая в спиральную. Слишком велико у них различие в сжатиях. Не существует механизма, который мог бы у звездной системы в ходе эволюции так сильно изменить сжатие.

Старая, принятая во времена Джинса терминология, как мы видим, не может быть в наше время обоснована. Более того, сейчас имеются основания считать, что моложе те звездные системы, которые в принятой терминологии называются галактиками позднего типа. Звездное население в них более молодое, чем в галактиках раннего типа. Но уж такова сила условности. Менять терминологию трудно. Это может привести к путанице. Легче примириться с тем, что галактики поздних типов моложе галактик ранних типов и в них больше звезд ранних спектральных классов, в то время как галактики ранних типов состоят из звезд поздних спектральных классов.

Местная система галактик

Наша Галактика и ее ближайшие соседи образуют группу сравнительно тесно примыкающих друг к другу галактик — Местную систему. За ее пределами пространство в среднем менее плотно заполнено галактиками, чем внутри нее. Поэтому имеются основания считать, что галактики Местной системы связаны как-то и физически, и общностью происхождения. Точное число членов Местной системы неизвестно, не все слабые галактики, входящие в ее состав, уже выявлены. В этом убеждают открытия последних лет. Приведем список 17 известных членов Местной системы (табл. 12).

На рис. 57 показано взаимное расположение членов Местной системы галактик.

Галактики Местной системы представляют для нас особый интерес, так как они расположены к нам ближе других галактик и их звездный состав можно исследовать

Т а б л и ц а 12. Список членов Местной системы галактик

№ п.п.	Название или обозначение	Тип	Видимая звездная величина, m	Абсолютная звездная величина, M	Расстояние, кпс	Угловые размеры в минутах дуги	Лучевая скорость, км/с
1	Наша Галактика	Sb или Sc		-19,5— -19,8			
2	Большое Магелланово Облако	I I	1,2	-17,4	46	780	+280
3	Малое Магелланово Облако	I I	2,8	-16,0	46	180	+160
4	Система в Скульпторе	I II	8,8	-12,1	90	45	
5	Система в Печи	I II	9,1	-13,4	290	50	+149
6	NGC 6822	I I	9,1	-13,9	330	20	-34
7	NGC 147	E3	10,5	-13,4	400	18×22	
8	NGC 185	E1	10,2	-13,7	400	14×12	-270
9	NGC 224	Sb	4,3	-19,8	460	197×92	-267
10	NGC 205	E5	8,9	-15,0	460	26×16	-239
11	NGC 221	E2	9,1	-14,8	460	12×18	-220
12	IC 1613	I I	10,0	-13,5	460	23×23	-235
13	NGC 598	Sc	6,0	-17,6	480	83×53	-190
14	Система Лев I	I II	12,0	-9,7	220	38	
15	Система Лев II	I II	12,0	-9,7	220	41	
16	Система в Драконе	I II	10	-10	100	50	
17	Система в Малой Медведице	I II	10	-9	67	130	

в деталях. Большая удача, что в Местной системе наблюдается такое разнообразие галактик. Имеются спирали Sc и Sb (в том числе сверхгигантские), неправильные галактики типов I I и I II, карликовые эллиптические галактики. К сожалению, нет спиралей Sa и спиралей с перемычкой. Эллиптические галактики в Местной системе карликовые, нет ни одной гигантской эллиптической галактики, подобной тем, которые распространены в скоплениях галактик.

Все открытые в последние годы члены Местной системы галактик принадлежат к карликовым галактикам типа I II. Обнаруживать их очень трудно ввиду их общей малой светимости и особенно вследствие их низкой поверхностной яркости. Недавно поступили сведения об

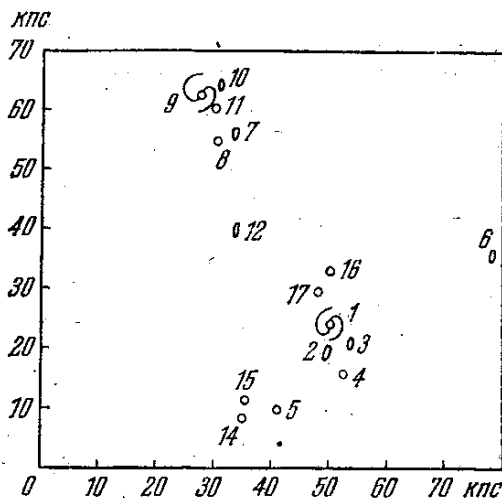


Рис. 57. Схема расположения галактик в Местной системе. Номера, поставленные около обозначений галактик, соответствуют их порядковым номерам в табл. 12.

открытии еще четырех таких объектов, но мы не включили их в список ввиду предварительности данных.

По числу содержащихся в них звезд галактики I II сравнимы с наиболее богатыми шаровыми скоплениями, но размеры их намного больше и по сравнению с шаровыми скоплениями в них очень слаба концентрация звезд к центру. Поэтому поверхностная яркость галактик I II крайне низка не только на периферии, но и в центральных областях. Вместе с четырьмя недавно открытыми и еще не включенными в наш список объектами карликовые галактики I II составляют почти половину всех членов Местной системы. А так как имеются основания ожидать открытия новых близких объектов этого типа, особенно на южном небе, которое значительно хуже исследовано, чем северное, то нужно думать, что в Местной системе число галактик I II существенно превышает число галак-

тик всех остальных типов. Таким образом, в окрестностях нашей Галактики, по крайней мере в сфере с радиусом 500 кпс, карлики I II являются наиболее распространенным типом галактик. Но, может быть, это особенность населения Местной системы галактик? Оказывается, нет. Американский астроном Ривс обнаружил большое число карликовых галактик в скоплении галактик в Деве. Оценка их числа показывает, что в этом ближайшем к нам большом скоплении их, как и в Местной системе, больше, чем других галактик. В 1956 г. то же было сделано для скопления галактик в Печи. Выяснилось даже, что отношение числа карликовых галактик к числу остальных галактик в этом скоплении по крайней мере равно 5. Все это позволяет считать, что карликовые галактики составляют большинство галактик во Вселенной, подтверждая закон, согласно которому в природе малые особи более распространены, чем крупные.

Иным будет, однако, результат, если мы станем оценивать вклад различного типа галактик в общую светимость или в общую массу Местной системы галактик. Нетрудно подсчитать, что светимость каждой из сверхгигантских галактик, нашей звездной системы или туманности Андромеды (NGC 224), значительно больше светимости всех остальных членов Местной системы вместе взятых. Оказывается также, что и масса каждой из сверхгигантских галактик больше суммарной массы остальных галактик Местной системы. Следовательно, о Местной системе можно с некоторым основанием сказать, что это — двойная система сверхгигантов, окруженная пятнадцатью спутниками. Основание так говорить было бы полным, если бы была уверенность в устойчивости Местной системы. Такой уверенности нет. Наоборот, Местная система, скорее всего, неустойчива и должна распасться.

В последнем столбце табл. 12 приведены лучевые скорости некоторых галактик Местной системы. Эти лучевые скорости непосредственно получаются в результате измерения положения линий в спектрах галактик. Они означают скорость по отношению к Солнечной системе, поскольку из нее производятся наблюдения. Но Солнечная система движется в Галактике, обращаясь вокруг ее центра, со скоростью 220 км/с. Поэтому скорость по отношению к Солнечной системе и скорость по отношению к центру инерции Галактики — не одно и то же. Именно

последнюю нужно было бы знать для изучения движений галактик внутри Местной системы. Необходимый переход к лучевым скоростям по отношению к центру Галактики совершить нетрудно, поскольку скорость Солнца в Галактике известна. Тогда, например, получится, что Большое Магелланово Облако имеет скорость $+82$ км/с, а Малое $+15$ км/с. Часть галактик Местной системы удаляется от нашей Галактики, другие, в том числе NGC 224, IC 1613, приближаются, имеют отрицательную лучевую скорость.

Но полной картины движений галактик в Местной системе получить нельзя потому, что нам остается неизвестной скорость галактик поперек луча зрения. Собственные движения невозможно измерить ввиду их исключительной малости. А малость их вызвана очень большими расстояниями до галактик. Можно, например, подсчитать, что если у самой близкой галактики, Большого Магелланова Облака, скорость поперек луча зрения была бы равна 100 км/с, то на расстоянии 46 кпс она должна была бы вызвать собственное движение всего только в $0",0005$ в год. Эта величина совершенно неуволнима для современных методов измерения собственных движений. А все остальные галактики расположены еще дальше, или намного дальше, поэтому их собственные движения должны составлять стотысячные, миллионные или еще меньшие доли секунды. Не боясь прослыть пессимистами, можно утверждать, что еще нескоро появятся хотя бы какие-нибудь наблюдательные данные о скоростях галактик поперек луча зрения.

Это существеннейшая черта внегалактической астрономии — полное неведение, абсолютная слепота в отношении движений галактик или движения материи внутри галактик в направлении, перпендикулярном к лучу зрения. Во всем необозримом внегалактическом мире удаётся определять, и это делается с высокой степенью точности, только ту часть движения, которая направлена к нам или от нас. Движение поперек луча зрения остается скрытым, никакие ухищрения, никакие усовершенствования методов наблюдений не позволяют надеяться их обнаружить. В трехмерном движении галактик нам доступна только одна компонента — лучевая.

Перейдем к описанию главных членов Местной системы, а также некоторых интересных галактик, лежащих за ее пределами.

Далеко на южном небе, недостижимые для глаз обитателей северного полушария Земли, неуловимые для больших телескопов, которые построены и установлены в северном полушарии, находятся два замечательнейших объекта неба, два сокровища астрономии — Большое и Малое Магеллановы Облака.

Первое дошедшее до нас описание наблюдений Магеллановых Облаков принадлежит Пигафетте, спутнику и историографу Магеллана в первом кругосветном путешествии. Когда в 1519—1522 гг. корабли Магеллана шли по южным водам Атлантического, а затем Тихого и Индийского океанов, Пигафетта обратил внимание на стоящие высоко в небе, неуклонно сопровождавшие экспедицию две сияющие туманности и описал их. Ничего подобного на северном небе не наблюдается.

Огромное значение Магеллановых Облаков для науки определяется тем, что это ближайшие к нам галактики. Следующий сосед, система в Скульпторе, находится в два раза дальше. Кроме того, Магеллановы Облака — это галактики с чрезвычайно богатым и разнообразным составом объектов. В этом отношении им принадлежит пальма первенства в Местной системе галактик. Система же в Скульпторе — значительно менее интересная галактика, лишенная звезд-сверхгигантов, звездных скоплений, газовых туманностей и других объектов, имеющих важное значение для изучения эволюции звезд и звездных систем. Ближайшими галактиками, сравнимыми по богатству состава с Магеллановыми Облаками, являются туманность Андромеды (NGC 224) и туманность Треугольника (NGC 598). Но они расположены в 10 раз дальше. А это означает, что при помощи 60-сантиметрового телескопа Магеллановы Облака можно изучать с той же подробностью, с какой изучают NGC 224 и NGC 598, используя гигантский 6-метровый телескоп. Какие же интересные сведения можно было бы получить, наведя на Магеллановы Облака 6-метровый телескоп! Однако, как заметил один наблюдатель, «бог решил пошутить, поселив астрономов в северном полушарии Земли, а Магеллановы Облака поместив на южном небе».

Страны северного полушария давно уже располагают 5-метровым телескопом и большим числом телескопов с диаметром объектива от двух до трех метров. А в 1976 г.

в Советском Союзе вошел в строй шестиметровый телескоп.

В южном же полушарии до последнего времени имелось лишь два 180-сантиметровых телескопа. С их помощью в основном и наблюдали Магеллановы Облака. Лишь совсем недавно южное полушарие обогатилось, наконец, 4- и 3,7-метровыми телескопами. Пройдут годы, десяток лет, прежде чем эти телескопы внесут существенный вклад в изучение Магеллановых Облаков.

Многие объекты исследуются в Магеллановых Облаках даже успешнее, чем в самой нашей Галактике. Это связано, во-первых, с тем, что наиболее интересные объекты Галактики лежат очень близко к ее главной плоскости, а так как и мы находимся около этой плоскости, то наблюдениям сильно мешает поглощение света темной пылевой материей, которая тоже сконцентрирована у главной плоскости. Направления на Большое и Малое Магеллановы Облака составляют углы 33 и 45° с плоскостью Галактики, поэтому поглощение света влияет очень слабо. Другим преимуществом Магеллановых Облаков является возможность, сравнивая видимые величины их звезд, сравнивать и абсолютные величины, светимости. Такое сравнение возможно потому, что размеры Магеллановых Облаков малы в сравнении с расстоянием до них и все звезды каждого Облака можно считать приблизительно одинаково удаленными от нас. Это условие для звезд нашей Галактики, разумеется, не выполняется, а сколь важным может быть его значение, видно из следующего исторического примера.

В 1910 г. Г. Ливитт (США), наблюдая цефеиды в Малом Магеллановом Облаке, обнаружила, что долгопериодические цефеиды, имеющие большой блеск, имеют и большой период изменения блеска. Довольно точно выполнялось правило, согласно которому вдвое большему периоду соответствовала меньшая на $0^m,6$ видимая звездная величина цефеиды. Так как для звезд в Магеллановых Облаках разность абсолютных звездных величин равна разности видимых звездных величин, то был установлен физический закон — вдвое большему периоду у цефеид Малого Магелланова Облака соответствует меньшая на $0^m,6$ абсолютная звездная величина, т. е. в 1,7 раза большая светимость. Впоследствии выяснилось, что этот закон является универсальным. Он справедлив для долгопериодических цефеид Большого Магелланова Облака,

Галактики, туманности Андромеды и других галактик. Аналогичное соотношение было установлено и для короткопериодических цефеид. Открытая зависимость позволила разработать новый метод определения расстояний, сыгравший большую роль в астрономии. Если нужно определить расстояние до звездного скопления или галактики, то достаточно обнаружить в этой системе цефеиду, пронаблюдать изменение ее блеска и определить период, затем по соотношению между периодом и абсолютной звездной величиной M определить последнюю. Нужно также измерить видимую звездную величину m , и тогда из равенства

$$\lg r = \frac{1}{5} m - \frac{1}{5} M + 1,$$

которое мы вывели в первой главе, вычисляется неизвестное расстояние r .

Насколько велико значение метода определения расстояний по цефеидам, можно судить по тому, что он стал основой определения расстояний до других галактик.

Если бы долгопериодические цефеиды не наблюдались в Магеллановых Облаках, то соотношение, связывающее их периоды и абсолютные звездные величины, удалось бы установить лишь значительно позднее, так как различные расстояний до долгопериодических цефеид Галактики мешает видимым образом проявиться этой зависимости.

Расстояние до каждого из Магеллановых Облаков, 46 кпс, лишь в полтора раза превосходит диаметр Галактики, а расстояние между Большим и Малым Облаками составляет около 20 кпс. Эти расстояния во много раз меньше, чем средние расстояния между соседними галактиками вообще и даже чем средние расстояния между соседними галактиками в Местной системе галактик. Поэтому правильнее считать, что Галактика и Магеллановы Облака образуют тройную галактику. Взаимное влияние в этой тройной системе, где Галактика должна считаться главным телом, а Магеллановы Облака спутниками, прослеживается в том, что, как показывают радионаблюдения, оба Магеллановых Облака погружены в общую оболочку нейтрального водорода и связаны дополнительно между собой водородным мостом, а водород, расположенный близ главной плоскости Галактики, образует выступ, направленный в сторону Магеллановых Облаков. Из Большого Облака тянется в противоположную от Галактики сторону нечто вроде спиральной ветви и

тогда должна быть аналогичная, неразличимая вследствие перспективы ветвь в сторону Галактики. Возможно, что Большое Облако и Галактика связаны между собой газовым мостом.

Большое Магелланово Облако имеет в поперечнике приблизительно 10 кпс. У него сложная и разнообразная структура (рис. 58).

Явно вырисовывается удлинненное тело, напоминающее перемычки у пересеченных спиралей. Имеется много мелких деталей, являющихся результатом группировок звезд



Рис. 58. Большое Магелланово Облако.

сверхгигантов. В Большом Облаке доминирует звездное население I типа и оно изобилует выдающимися представителями этого типа населения. В этом отношении Большое Магелланово Облако превосходит даже область спиральных ветвей нашей Галактики. В нем очень много голубых сверхгигантов чрезвычайно высокой светимости. Французский астроном Вокулер насчитал в Большом Облаке 4700 сверхгигантов, каждый из которых излучает мощнее, чем 10 000 солнц, и именно здесь находятся рекордсмены по светимости среди известных нам звезд.

В табл. 13 приводится список известных звезд наибольшей светимости в различных галактиках.

Мы видим, что чемпионом по светимости среди всех различаемых нами звезд (в далеких галактиках мы не можем различать отдельных звезд) является белая звезда HD 33579, находящаяся в Большом Магеллановом Обла-

ке. Эта звезда называется также S Золотой Рыбки. Ее абсолютная звездная величина равна $-10^m,1$ и она светит приблизительно как миллион солнц. Если бы на месте ближайшей к нам звезды вместо α Центавра находилась HD 33579, то человечество на Земле было бы обеспечено дополнительным и более ярким, чем в настоящее время,

Т а б л и ц а 13. Звезды наибольшей светимости в ближайших галактиках

Название звезды	Спектр звезды	Абсолютная звездная величина	Название галактики
N 12 VI Лебедя	B5	$-9,8^m$	Наша Галактика
ϵ Скорпиона	B1	$-9,4$	
ρ Ориона	B8	$-8,8$	
HDE 26970	B2	$-9,8$	Большое Магелланово Облако
HDE 269781	B9	$-9,5$	
HD 33579	A2	$-10,1$	
HD 7583	A0	$-8,8$	Малое Магелланово Облако
HD 6884	B9	$-8,5$	
Средняя абсолютная величина нескольких ярчайших звезд в галактиках		$-8,6$	NGC 224
		$-8,9$	NGC 598
		$-8,3$	NGC 6822

ночным освещением. На этом расстоянии HD-33579 светила бы как пять лун.

Таблица 13 показывает, что по мощности звезд-сверхгигантов на первом месте стоит Большое Магелланово Облако; наша Галактика и туманность Треугольника (NGC 598) среди близких галактик находятся на втором месте, а Малое Магелланово Облако, туманность Андромеды (NGC 224) и NGC 6822 — на третьем.

Ввиду того, что все звезды Большого Магелланова Облака находятся практически на одинаковом расстоянии от нас, в этой системе удобнее, чем в нашей Галактике, определять относительную численность звезд различной светимости.

Подсчитав число звезд различной видимой звездной величины в одном из участков Большого Облака и зная расстояние, Теккерей получил результаты, представленные в табл. 14.

К сожалению, Теккерей смог подсчитывать только сверхгиганты и яркие гиганты. Если бы 5-метровый телескоп находился в южном полушарии, то подсчеты можно

было бы распространить до звезд с $M = +5^m$, т. е. таких, как наше Солнце. Это дало бы очень интересные сведения о звездном населении Магеллановых Облаков. Из результатов Теккерера следует, что по мере уменьшения светимости сверхгигантов и гигантов число звезд этой светимости возрастает. Было бы интересно знать, до каких

Т а б л и ц а 14. Численности звезд-сверхгигантов в одном из участков Большого Магелланова Облака

М	Число звезд	М	Число звезд
От $-6,5^m$ до $-6,01^m$	3	от $-4,0$ до $-3,51$	34
от $-6,0$ до $-5,51$	6	от $-3,5$ до $-3,01$	44
от $-5,5$ до $-5,01$	5	от $-3,0$ до $-2,51$	80
от $-5,0$ до $-4,51$	12	от $-2,5$ до $-2,01$	143
от $-4,5$ до $-4,01$	12	от $-2,0$ до $-1,51$	258

абсолютных звездных величин распространяется эта закономерность. Достигается ли при некотором значении светимости максимальная численность звезд, после которого при дальнейшем уменьшении светимостей число звезд данной светимости уже уменьшается?

Размеры Малого Магелланова Облака (рис. 59) приблизительно в четыре раза меньше, чем Большого — 2,2 кпс. Несмотря на сходство во внешнем облике, взаимную близость и, по-видимому, общность происхождения, в звездном населении Облаков обнаруживаются различия. В Малом Облаке I тип звездного населения представлен не так богато и представители его не являются столь выдающимися экземплярами, как в Большом Облаке.

Мы наблюдаем другие галактики сквозь нашу Галактику. Для определения характеристик отдельных звезд других галактик нужно уметь отличать, отделять их от проектирующихся на эти галактики звезд нашей Галактики. Иначе, если мы примем слабую и близкую, находящуюся, например, на расстоянии 46 пс звезду за звезду, входящую в состав Большого Магелланова Облака, расположенного в тысячу раз дальше, то светимость звезды будет преувеличена в $1000^2 =$ миллион раз. Так можно получить много фиктивных «сверхгигантов». Надежным способом оградить исследование от подобных ошибок является определение лучевой скорости звезды. Если, на-

пример, звезда, находящаяся в направлении Большого Магелланова Облака, имеет лучевую скорость, не очень сильно отличающуюся от лучевой скорости самого облака $+280$ км/с, а именно, если эта лучевая скорость лежит в интервале $+250 - +310$ км/с, то, без сомнения, звезда принадлежит Большому Магелланову Облаку. Если звезда принадлежит Галактике и лишь проектируется на



Рис. 59. Малое Магелланово Облако.

Большое Магелланово Облако, то ее скорость не будет превосходить $+60 - +70$ км/с. В этом направлении другие лучевые скорости, лежащие, например, в интервале от $+70$ до $+260$ км/с, не встречаются.

Можно также использовать собственные движения. У звезд других галактик они всегда из-за очень больших расстояний равны нулю. Если у звезды обнаруживается собственное движение, это определенно звезда нашей Галактики.

Для звездного населения I типа характерно присутствие больших газовых — водородных туманностей. И в этом отношении Большое Магелланово Облако, изобилующее водородными туманностями, выделяется среди близких галактик. В обоих Магеллановых Облаках насчитывается 532 крупные газовые туманности, преобладающая часть из них входит в состав Большого Облака. Здесь же находится самая грандиозная из известных газовых туманностей — 30 Золотой Рыбки, имеющая в диаметре около 200 пс и массу, равную массе 500 000 Солнц. Для сравнения укажем, что самая большая известная водородная туманность нашей Галактики имеет в диаметре 6 пс и ее масса равна лишь 100 солнечным массам.

Очень много в Магеллановых Облаках звездных скоплений. Еще в 1847 г. Джон Гершель, ездивший специально в Южную Африку, чтобы наблюдать Магеллановы Облака, насчитал в Большом Облаке 919, а в Малом Облаке 214 звездных скоплений и облаков диффузной материи. В настоящее время общее число занесенных в каталоги рассеянных скоплений в Большом Облаке составляет 1600, а в Малом Облаке свыше 100. Все эти скопления по своим размерам и светимостям сравнимы с самыми богатыми рассеянными скоплениями нашей Галактики. Нужно думать, что в Магеллановых Облаках имеется большое количество еще не выявленных рассеянных скоплений меньших размеров и менее богатых звездами.

Шаровых скоплений, подобных шаровым скоплениям Галактики, открыто в Большом Облаке 35 и в Малом Облаке 5. Но обнаружены и новые объекты, каких в Галактике нет — шаровые скопления, содержащие множество голубоватых и белых гигантов и потому имеющие белый цвет, в то время как так называемые «обычные» шаровые скопления, в том числе все шаровые скопления Галактики, располагают только красными гигантами и их цвет желтый — оранжевый. Эти шаровые скопления нового типа представляют большой интерес. Есть предположение, что их возраст невелик, в то время как «обычные» шаровые скопления — старые образования. Нужно найти ответ на вопрос, почему в Большом Магеллановом Облаке имеются голубые шаровые скопления, а в Галактике их нет.

Магеллановы Облака изобилуют переменными звездами различных типов. Только в этих двух галактиках, не считая нашей, можно в настоящее время наблюдать и

долгопериодические, и короткопериодические цефеиды. Это обстоятельство, как мы увидим дальше, чрезвычайно важно для выработки правильных способов определения внегалактических расстояний.

Впервые вспышка новой звезды в Малом Облаке наблюдалась в 1897 г., а в Большом Облаке в 1926 г. К настоящему времени зарегистрирован уже не один десяток таких вспышек.

Богаты Магеллановы Облака и диффузной материей. Исследование приходящего от них радиоизлучения с длинной волны 21 см показывает, что водород в них не только сконцентрирован в отдельных облаках, но распространен и по всему объему галактик. В то время как в нашей Галактике водород составляет лишь 1—2% общей массы, в Магеллановых Облаках его доля оценивается в 6%.

Пылевую материю в Магеллановых Облаках непосредственно наблюдать не удастся. Прямое наблюдение материи в галактиках обычно возможно только в тех случаях, когда сильно сжатые галактики мы видим с ребра или почти с ребра. Лишь в этом случае толща пылевой материи вдоль луча зрения настолько значительна, что обнаруживается явно. Поэтому для выявления пылевой материи в Магеллановых Облаках применяют оригинальный способ, который впервые употребил Шепли. Подсчитывают число далеких галактик, наблюдаемых сквозь Магеллановы Облака, и сравнивают с числом галактик в соседних областях. Например, число далеких галактик, наблюдаемых сквозь центральную область Большого Облака, приблизительно в 10 раз меньше, чем число галактик такой же видимой величины, наблюдаемых на такой же площади в соседней области неба. Это различие должно объясняться тем, что в Большом Магеллановом Облаке имеется пылевая материя, ослабляющая свет далеких галактик. Поэтому более далекие и слабые из них становятся невидимыми. Из того что число галактик при наблюдении сквозь Большое Облако уменьшается в 10 раз, можно заключить, что находящаяся там пылевая материя ослабляет блеск всех объектов в среднем на $1^m,7$. Для сравнения укажем, что согласно наблюдениям и произведенным расчетам блеск галактик, которые рассматривались бы сквозь нашу Галактику в направлении, перпендикулярном к ее главной плоскости, ослаблялся бы в среднем только на $0^m,7$. По-видимому, и пылевой материей Боль-

шное Облако богаче нашей Галактики. Поглощение света обнаруживается и в Малом Магеллановом Облаке.

Изучение Магеллановых Облаков показало единство, общность различных звездных систем. Все объекты — звезды различных спектральных классов, различных светимостей, переменные и стационарные, различные типы звездных скоплений, газовая и пылевая материя, все то разнообразие, которое поражает исследователя Галактики, находит свое место и в Магеллановых Облаках. Значит, законы, управляющие формированием звезд и звездных скоплений, в нашей Галактике и в Магеллановых Облаках одинаковы.

Туманность Андромеды (NGC 224)

Следующим интереснейшим внегалактическим объектом является знаменитая туманность Андромеды (NGC 224) (рис. 60). Она расположена на нашем северном небе, и каждый вводимый в строй большой телескоп направляется на эту галактику, чтобы получить новые данные.

Туманность Андромеды — сверхгигантская спираль типа Sb со светимостью, по-видимому, даже несколько большей, чем светимость нашей Галактики. Она повернута к нам так, что ее главная плоскость составляет угол в 15° с лучом зрения. Значит, она видна почти с ребра. Но все-таки угол в 15° недостаточно мал для того, чтобы пылевая материя, расположенная у главной плоскости этой галактики, могла проявиться в виде темной полосы. Угловые размеры туманности Андромеды, измеренные Хаблом по фотографии, составили $160'$ на $40'$, что при расстоянии 460 кпс дает линейные размеры 20 на 5 кпс. Но нужно сказать, что понятие «размеры галактики», как мы это уже отмечали в гл. II, говоря о нашей Галактике, не является вполне определенным, поскольку у галактик нет резких границ. Размеры галактик на фотографиях зависят от светосилы телескопа, от чувствительности пленки, от экспозиции. Поэтому угловые размеры галактик, фигурирующие в табл. 12, нужно считать весьма условными. Значительно дальше, чем на фотографии, прослеживаются границы галактик при применении фотоэлектрического метода, основанного на том, что свет падает на фотоэлемент и вызывает электрический ток, силу которого можно измерить. Американские астрономы Стеббинс и Уитфорд, применив фотоэлектрический метод, нашли, что границы

туманности Андромеды простираются гораздо дальше, чем это следует на основании фотографий, и оценили ее угловые размеры в $450'$ на $110'$, что соответствует линейным



Рис. 60. Туманность Андромеды NGC 224.

размерам 60 на 15 кпс. Конечно, если бы туманность Андромеды наблюдалась строго с ребра, то второй размер был бы в несколько раз меньше, чем 15 кпс; он определял бы толщину этой галактики.

Если согласиться с тем, что диаметр туманности Андромеды равен 60 кпс, то окажется, что по размерам она вдвое превосходит нашу Галактику. Но нужно иметь в виду, что возможность проследивать материю в далеких областях периферии нашей Галактики еще более затруднена, чем в других галактиках. Ведь мы находимся внутри Галактики и не можем наблюдать ее со стороны. Поэтому надо полагать, что размеры туманности Андромеды, как и ее светимость, лишь немного больше, чем размеры нашей Галактики.

Туманность Андромеды имеет большое яркое ядро, из которого выходят две спиральные ветви. Сильный наклон галактики к лучу зрения несколько скрадывает рисунок ветвей, но все-таки они ясно различимы. На рис. 60 видно, что, выходя со спиральной ветвью из ядра и направляясь по ней к ее концу, нужно совершать поворот по часовой стрелке. Спиральные ветви развиты умеренно, тесно прилегают к ядру, медленно отходят от него, что характерно для типа Sb, в то время как у спиралей типа Sc (см., например, рис. 40 и 65) спиральные ветви быстро удаляются от ядра.

Как и наша Галактика, туманность Андромеды имеет весьма разнообразный звездный состав. В ее спиральных ветвях преобладает звездное население I типа, сконцентрированы голубые звезды-гиганты и сверхгиганты. Там же собрано большое число переменных звезд различных типов. Американский астроном Арп в течение 290 ночей за полтора года получил около 1000 фотографий туманности Андромеды. Исследование этих снимков позволило ему обнаружить 30 вспышек новых звезд. Тогда можно рассчитать, что за год в туманности Андромеды вспыхивает в среднем 26 новых звезд. Это очень важная оценка. Она, по-видимому, вообще характеризует среднее число вспышек новых звезд в галактиках Sb, а возможно, и Sc. И в нашей Галактике должно за год вспыхивать примерно столько же новых звезд, но большую часть из них наблюдать не удастся, так как вспышки происходят близ главной плоскости Галактики, и далекие новые звезды не могут наблюдаться из-за сильного поглощения света.

Туманность Андромеды находится от нас в 10 раз дальше, чем Магеллановы Облака, поэтому наблюдение рассеянных звездных скоплений в ней уже затруднительно. Но шаровые скопления, как более яркие объекты, наблюдаются уверенно. Здесь их обнаружено около 300.

В шаровых скоплениях туманности Андромеды, как и в шаровых скоплениях Галактики, должны, по-видимому, находиться короткопериодические цефеиды. Но туманность Андромеды далека и светимость короткопериодических цефеид недостаточна для того, чтобы их можно было наблюдать даже в 6-метровый телескоп.

Радиоисследования показали, что в туманности Андромеды имеется, как и ожидалось, межзвездный водород, сконцентрированный сильнее около главной плоскости, но распространенный по всему объему звездной системы. Вся масса водорода оценена в $2,5 \cdot 10^9$ масс Солнца, что должно составить, как и в нашей Галактике, около 2% массы всей звездной системы.

Очень близко к туманности Андромеды расположены две карликовые эллиптические галактики NGC 221 и NGC 205. Они хорошо видны на рис. 60. NGC 221 проектируется на видимую границу туманности Андромеды. Эта система имеет слабое видимое сжатие (тип E2). NGC 205 расположена несколько в стороне (на рис. 60 справа вверху). У этой галактики видимое сжатие сильнее — тип E5.

Расстояние до всех трех галактик — спиральной NGC 224 (туманность Андромеды) и эллиптических NGC 205 и NGC 221 практически одинаковы. Поэтому их видимая взаимная тесная близость на небе означает и взаимную тесную близость в пространстве. Это тройная система, тройная галактика.

Равенство расстояний до трех галактик означает также, что каковы соотношения их светимостей и размеров на рис. 60, таковы эти соотношения и на самом деле. Мы видим, что NGC 224 действительно сверхгигант в сравнении с расположенными около нее карликовыми эллиптическими галактиками. Интересен также контраст между сложной структурной формой спиральной галактики NGC 224 и гладкими бесструктурными NGC 205 и NGC 221.

Масса туманности Андромеды значительно превосходит массу ее эллиптических соседей, поэтому в тройной галактике она должна рассматриваться как центральное тело, а NGC 205 и NGC 221 как спутники. Но, оказывается, еще две эллиптические галактики, входящие в состав Местной системы галактик, а именно NGC 147 и NGC 185, также расположены близко к туманности Андромеды и находятся от нас приблизительно на том же

расстоянии, что и она. Это также карликовые галактики. Поэтому можно считать, что у туманности Андромеды не два спутника, а четыре. Следовательно, это не тройная, а пятерная система, пятерная галактика.

Пример двух кратных систем — тройной, состоящей из нашей Галактики и Магеллановых Облаков, и пятерной — туманности Андромеды с ее четырьмя эллиптическими спутниками, должен убеждать нас в том, что кратность — весьма распространенное явление в мире галактик. Можно также считать, что сверхгигантские галактики обычно располагают спутниками, что, конечно, неудивительно. Огромная масса, большая сила притяжения сверхгигантских галактик позволяет им удерживать около себя близких соседей.

Некоторые интересные галактики

Спутник туманности Андромеды NGC 185. На рис. 61 изображен эллиптический спутник туманности Андромеды NGC 185, сфотографированный при помощи 5-метрового телескопа. Этот спутник, а также NGC 147, находятся на большем расстоянии от туманности Андромеды, чем NGC 205 и NGC 221, и поэтому на рис. 60 не попали.

Как можно видеть по рис. 61, 5-метровый телескоп позволяет разложить эту близкую, слабо сжатую эллиптическую галактику на звезды. Хорошо также видна особенность галактики — маленькая, но очень четкая темная черточка близ центра. На первый взгляд может показаться, что эта черточка просто дефект пластинки. Но на самом деле она видна на всех фотографиях и является волком темной пылевой материи.

Система Лев II. Как выглядит неправильная галактика типа I II, сфотографированная на 5-метровом телескопе, показано на рис. 52. Это близкая к нам (расстояние 220 кпс) система Лев II. Примерно такой же вид имеют некоторые другие неправильные галактики типа I II, также являющиеся членами Местной системы галактик. Бросаются в глаза низкая поверхностная яркость галактики и очень слабая концентрация звезд к центру. Яркие светила, видимые на фотографии, не принадлежат системе Лев II: это звезды нашей Галактики, проектирующиеся на нее.

Кажется, что звезд в системе так мало, что их легко можно пересчитать. Но на самом деле это не так. Видны только яркие звезды с абсолютной величиной, равной нулю или меньше. В галактике помимо них имеется несколько миллионов более слабых звезд. Однако, как мы видим, нескольких миллионов слабых звезд недостаточно, чтобы на фотографии создать заметный общий яркий фон.

Среди ярких звезд обнаружено несколько короткопериодических цефеид, а звезд-гигантов и сверхгигантов

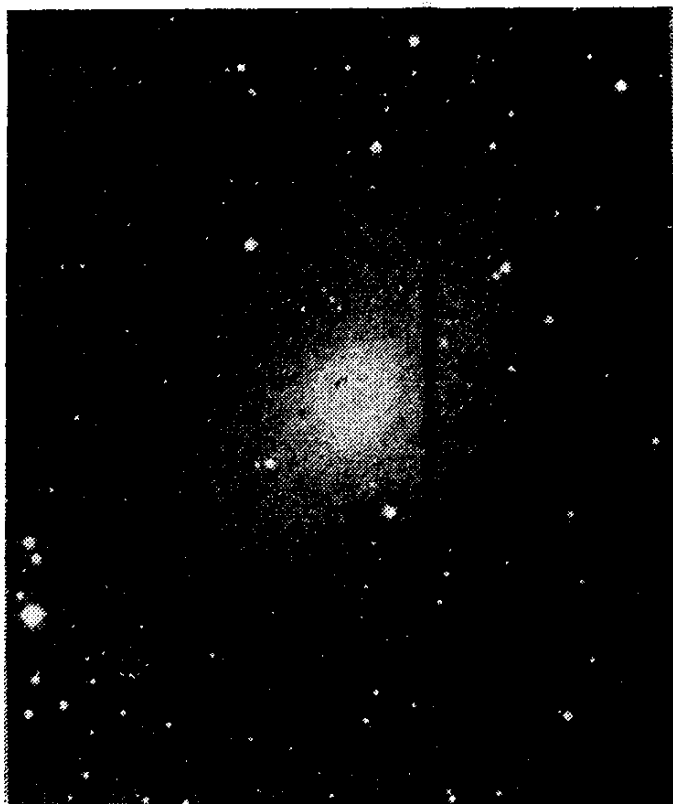


Рис. 61. Спутник туманности Андромеды NGC 185.

спектральных классов О и В нет. Оба эти признака свидетельствуют о том, что галактика Лев II состоит из второго типа звездного населения.

Система в Секстанте. На рис. 62 приведена полученная на 5-метровом телескопе фотография другой галактики типа I II, члена Местной системы, находящейся в созвездии Секстанта. Она тоже сравнительно близка к нам (расстояние 500 кпс) и потому отчетливо разложена на звезды, но поскольку расстояние до нее значительно больше, чем до системы Лев II, в ней видны лишь звезды с абсолютной величиной — 2^m и ярче. Поверхностная яркость у этой Галактики хотя и низкая, но все-таки значительно выше, чем у системы Лев II. Это объясняется иным звездным составом. Здесь звездное население I типа. На фотографии видны крупные и мелкие группировки

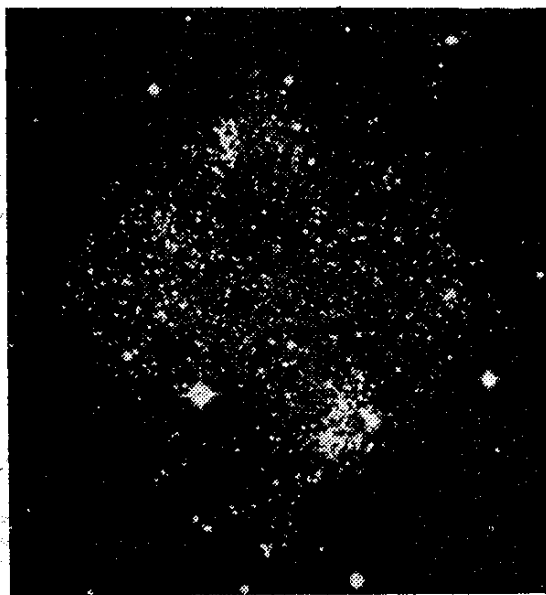


Рис. 62. Галактика в Секстанте.

ярких звезд. Это звездные ассоциации, состоящие из звезд спектральных классов O и B, т. е. из горячих гигантов и сверхгигантов, сообщающих системе в Секстанте сравнительно высокую светимость, несмотря на общую малочисленность звезд. Выделяется богатая звездная ассоциация в верхней части рисунка, имеющая диаметр 200 пс.

Галактика NGC 598 в Треугольнике. Эта галактика — член Местной системы и ближайшая к нам



Рис. 63. Галактика NGC 598 в Треугольнике.

после туманности Андромеды спиральная звездная система (рис. 63). Она принадлежит к типу Sc: спиральные ветви сильно развиты, ядро маленькое, богато представлено звездное население I типа. В этой галактике и некоторых других ветви спиралей кажутся даже переразвиты-

ми, обнаруживают признаки распада (или, может быть, это, наоборот, несобранность?). Выдвигалось предложение для таких галактик ввести специальный подкласс Sd.

Ввиду близости NGC 598 она в большие телескопы хорошо разлагается на звезды. В ней могут изучаться объекты ярче абсолютной звездной величины — $1^m,5$. Обнаружено большое количество O и B звезд, цефеид, рассеянных скоплений, областей H II. Наблюдались вспышки новых звезд. Имеется несколько десятков шаровых скоплений и около трех тысяч звезд красных сверхгигантов. На фотографии (см. рис. 63), полученной при помощи 5-метрового телескопа, в спиральных ветвях хорошо видны отдельные звезды и сгустки, являющиеся группировками ярких звезд и газовых туманностей.

По светимости NGC 598 должна быть отнесена к гигантским галактикам. Она излучает приблизительно в 6,5 раза меньше, чем наша звездная система и туманность Андромеды, являющиеся сверхгигантами.

Галактика NGC 3031 в Большой Медведице. Недалеко от Местной системы галактик находятся еще две группы галактик. Обе они наблюдаются в направлении Большой Медведицы и находятся на расстоянии приблизительно полутора тысяч килопарсек.

В одной из групп главенствует красивая спиральная галактика NGC 3031 (рис. 64). Она принадлежит к типу Sb и внимательное исследование ее внешнего вида приводит к выводу о ее сходстве с туманностью Андромеды (см. рис. 60). У нее имеется такое же большое яркое ядро, две длинные спиральные ветви, тесно прилегающие к ядру на первом витке, а затем от него отходящие. Различие во внешнем виде между туманностью Андромеды и NGC 3031 вызывается главным образом тем, что у первой основная плоскость наклонена к лучу зрения под углом около 15° , а у NGC 3031 этот угол значительно больше и равен приблизительно 35° . Большой угол наклона делает галактику NGC 3031 эффектнее, позволяет яснее видеть ее структуру, изучать форму и строение спиральных ветвей.

И в этой, сравнительно близкой галактике, при помощи 5-метрового телескопа достигается разрешение спиральных ветвей на звезды. На фотографии отчетливо видны отдельные сверхгиганты и сгустки, являющиеся группировками звезд высокой светимости и газовых облаков. Очень интересно располагается темная материя. Основные полосы и волокна ее тянутся вдоль спиральных ветвей,

но в верхней части рисунка можно ясно видеть систему полос, идущих поперек спиральной структуры. Менее отчетливые и короткие волокна темной материи, не согласующиеся с ходом спиральных ветвей, можно разглядеть



Рис. 64. Галактика NGC 3031 в Большой Медведице.

и в нижней части рисунка. В NGC 3031 наблюдалось 25 вспышек новых звезд, имеется много переменных звезд, в том числе цефеиды. Светимость ее в 2,5 раза меньше светимости туманности Андромеды, так что ее нельзя отнести к категории сверхгигантских галактик,

но среди гигантских галактик она одна из наиболее ярких. Около NGC 3031 нет близких галактик — спутников, как около туманности Андромеды, но она явно доминирует в своей группе, включающей еще две спиральные и шесть неправильных галактик. Можно считать, что все эти галактики являются ее спутниками.

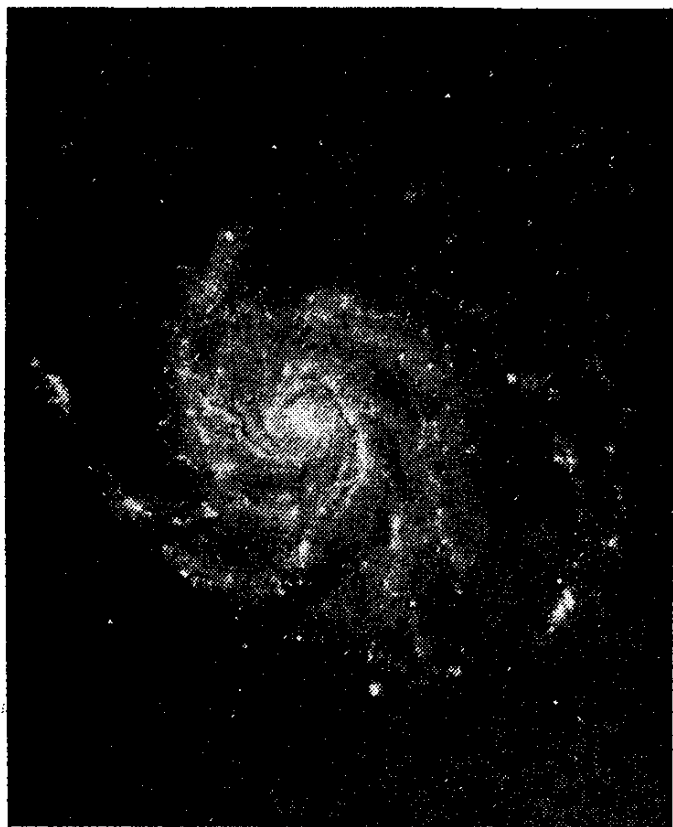


Рис. 65. Галактика NGC 5457 в Большой Медведице.

Галактика NGC 5457 в Большой Медведице. Во второй из упомянутых на с. 152 групп выделяется галактика NGC 5457, принадлежащая к гигантским спиральям типа Sc. Эта звездная система (рис. 65) поражает тонкостью и изяществом форм. У нее очень маленькое, ослепительно яркое ядро, из которого выходит несколько

быстро отходящих к периферии спиральных ветвей. Многочисленность спиральных ветвей—характерная особенность этой галактики, но все-таки можно выделить, в особенности в области около ядра, две спиральные ветви, являющиеся основными. Внешние области галактики на фотографии разложены на звезды и сгустки материи. Некоторые сгустки, особенно яркие и крупные,— это гигантские звездные ассоциации, называемые иногда сверхассоциациями. Внешние области спиральных ветвей не являются непрерывными, но расположение ветвей легко прослеживается на большом протяжении благодаря очерчивающим их ярким сгусткам материи. Хорошо видны тонкие волокна пыли, следующие в основном вдоль спиральных ветвей.

В галактике NGC 5457, имеющей бело-голубоватый цвет, богато представлено население I типа. В группу, где она является наиболее ярким членом, входят еще четыре спиральные и одна неправильная галактика. По-видимому, в ней имеется еще несколько карликовых галактик, в том числе типа I II с низкой поверхностной яркостью, но вследствие удаленности они еще не выявлены.

Галактика NGC 5194 в Гончих Псах. Как и звездная система, описанная выше, спиральная галактика NGC 5194 (рис. 66), наблюдающаяся в созвездии Гончих Псов, принадлежит к типу Sc. Но ее не назовешь тонкой и изящной. Могучие, яркие, туго закрученные спиральные ветви, динамическая форма— вот что привлекает внимание в этой галактике. И полосы темной материи в ней многочисленные, широкие и густые. Они тянутся в основном вдоль спиральных ветвей, но имеют большое число мелких отростков, ответвлений, направленных часто под прямым углом к полосам. Некоторые волокна темной материи проникают в ядро галактики, подбираются почти к самому ее центру. Расстояние до NGC 5194 около 1300 кпс.

Замечательной особенностью этой галактики является удлинённая, несколько деформированная спиральная ветвь, на конце которой находится еще одна галактика. Да, большое светлое пятно на конце спиральной ветви в нижней части рис. 66 — это не деталь галактики NGC 5194, а другая галактика, типа I, имеющая самостоятельное обозначение — NGC 5195. В ней различается своя система полос темной материи, но часть волокон проходит из спиральной ветви в тело NGC 5195, удостоверяя, что две

галактики действительно между собой связаны и наблюдаемая картина не есть результат случайной проекции NGC 5195 на спиральную ветвь NGC 5194. Мы здесь впервые встречаемся с явлением взаимодействия двух галактик.



Рис. 66. Галактика NGC 5194 в Гончих Псах.

Галактика NGC 5364 в Деве. Еще один образец интересной спиральной галактики представляет NGC 5364 (рис. 67). Принадлежит она к подтипу Sc и находится от нас на расстоянии почти 7 Мпс. У этой галактики две особенности. Во-первых, имеется яркое кольцо, окружаю-

щее на некотором расстоянии ядро. Спиральная структура наблюдается не только вне кольца. Определенные признаки ее обнаруживаются и внутри кольца. Вторая особенность состоит в полном отсутствии разветвлений у спиральных ветвей. Ветви тянутся как ленты и одна из них может быть прослежена до оборота на 450° , а вторая даже до 540° . Толщина их достигает 700 пс. NGC 5364

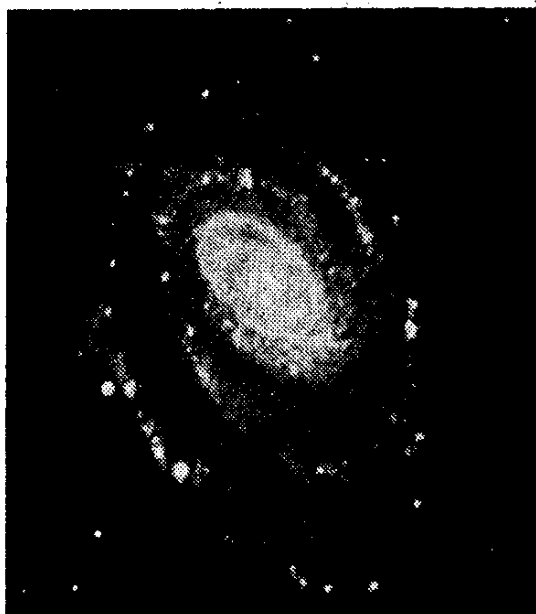


Рис. 67. Галактика NGC 5364 в Деве.

слишком далека, чтобы быть разложенной на звезды, но тянущиеся веревками сгустки в спиральных ветвях видны хорошо.

Галактика NGC 5236 в Гидре. Эта яркая спиральная галактика (рис. 68) типа Sc наблюдается на южном небе; от нас, жителей северного полушария, она заслонена земным шаром. Спиральных ветвей у нее несколько и они быстро отходят от очень маленького и яркого ядра. Полосы темной материи тянутся вдоль спиральных ветвей и местами сливаются с черным пространством, окружающим галактику.

Галактика NGC 1300 в Эридане. Замечательным, можно сказать, классическим образцом спирали с

перемычкой является NGC 1300 (рис. 69). Принадлежит она к типу SBb. Из маленького ядра в обе стороны выступает совершенно прямая перемычка. На некотором расстоянии концы перемычки резко, даже под острым углом, изгибаются и дают начало спиральным ветвям, которые затем тянутся на протяжении $200-220''$. Наиболее яркие области галактики — это ядро и места, где из перемычки выходят спиральные ветви. Темная материя

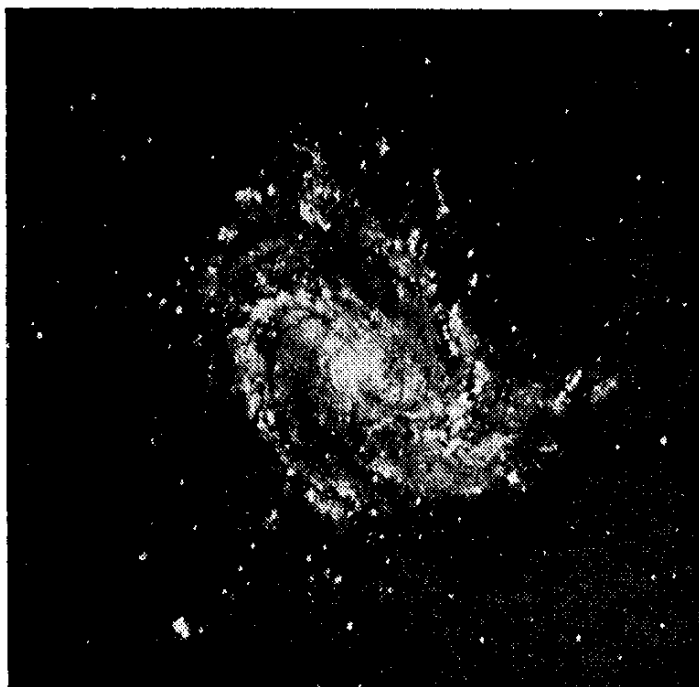


Рис. 68. Галактика NGC 5236 в Гидре.

наблюдается в виде двух полосок, начинающихся при выходе перемычки из ядра и тянущихся вдоль перемычки. Эти полоски смещены нижняя влево, а верхняя вправо от центральной части полосы. На концах перемычки темные полосы резко поворачивают и идут вместе со спиралью. Хорошо видны вереницы ярких сгустков материи у выхода спиралей из перемычки и близ концов ветвей. Полностью отсутствует явление разветвлений.

Еще одна галактика в Андромеде — NGC 891. Ближайшей к нам спиральной галактикой, наблюдаемой точно с ребра, является NGC 891 (рис. 70). Она принадлежит к подтипу Sb. NGC 891 очень богата пылевой материей. Темная полоса, тянущаяся вдоль ребра, почти полностью застилает периферийные области галактики. Лишь ядро достаточно широко и ярко, чтобы наблюдаться отчетливо. Множество небольших волокон пылевой



Рис. 69. Галактика NGC 1300 в Эридане.

материи выступает из темной полосы в направлении, перпендикулярном к ней. Длина их достигает 30 пс. Расстояние до NGC 891 около 2,5 Мпс.

Галактика NGC 4594 в Деве. Иначе выглядит галактика NGC 4594, наблюдаемая с ребра. У нее тоже имеется интенсивная полоса темной материи. Но эта по-

лоса ровнее и глаже, а сама звездная система значительно толще, тип ее Sa, поэтому лишь небольшая часть светящихся областей галактики затемнена пылевой материей.

Воспроизведенный на рис. 71 превосходный снимок NGC 4594, сделанный на 5-метровом телескопе, замечателен тем, что позволяет видеть разбиение всего звездного



Рис. 70. Галактика NGC 891 в Андромеде.

поселения этой галактики на две составляющие — плоскую и сферическую. Плоская составляющая заключена в основном диске, по ребру которого стелется полоса темной материи, а из диска, как туманное облако, выступает в обе стороны сферическая составляющая. Можно также видеть несколько десятков точек, частью окружающих галактику, частью погруженных в ее сферическую составляющую. Это — шаровые скопления. Галактика NGC 4594 находится приблизительно на расстоянии 5 Мпс. Своей формой она напоминает широкополую шляпу, и потому ее называют галактикой «Сомбреро».

Галактика NGC 5128 в Центавре. Наш обзор близких и интересных галактик мы закончим одним из самых уди-

вительных по внешнему виду объектов на небе NGC 5128 (рис. 72). Фон ее напоминает эллиптическую галактику почти без видимого сжатия. По этому фону тянется мощная и причудливая полоса темной материи, имеющая посередине разрыв. Эта темная полоса намного шире и хаотичнее, чем у обычных спиральных галактик, наблюдаемых с ребра.

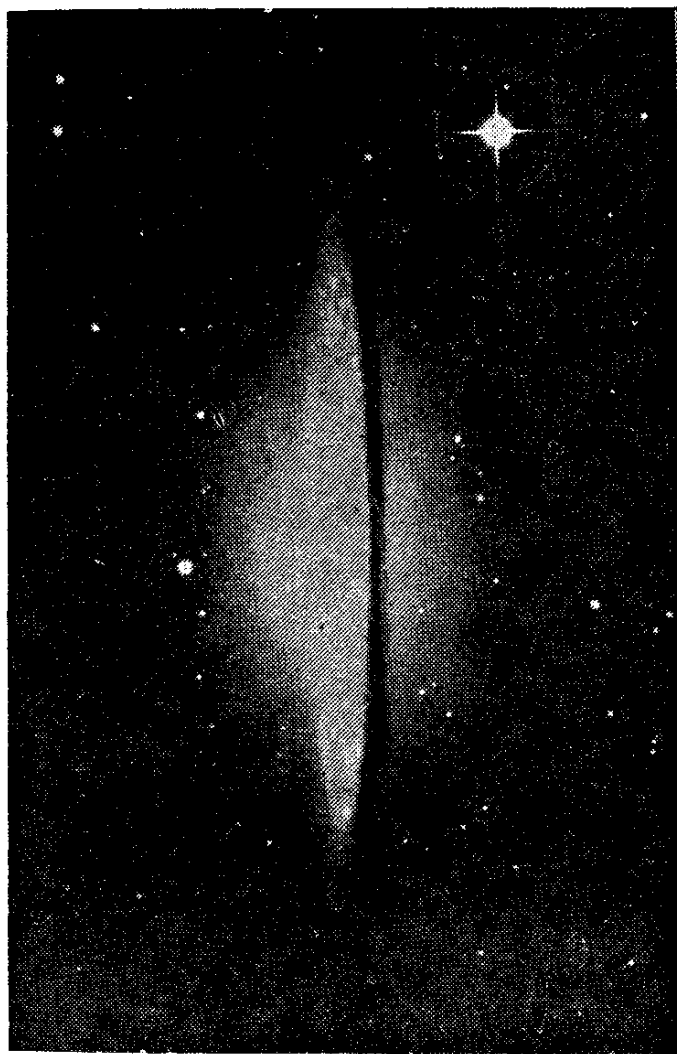


Рис. 71. Галактика NGC 4594 в Дельфе.



Рис. 72. Галактика NGC 5128 в Центавре.

Обнаружено, что NGC 5128 является довольно сильным источником радиоизлучения, причем большую часть радиоизлучения посылают области, где располагается темная материя. Кроме того, слабое радиоизлучение идет к нам из круга с диаметром около 2° . Область радиоизлучения намного больше области оптического излучения этой удивительной галактики.

Вращение галактик

Невращающаяся звездная система по истечении некоторого времени должна принять форму шара. Такой вывод следует из теоретических исследований. Он подтверждается на примере шаровых скоплений, которые не вращаются и имеют шарообразную форму.

Если же звездная система сплюснута, сжата, то это означает, что она вращается. Следовательно, должны вращаться все спиральные галактики. Должны вращаться и эллиптические галактики, за исключением тех из них,

которые шарообразны, не имеют сжатия. Вращение происходит вокруг оси, которая перпендикулярна к главной плоскости симметрии. Галактика сжата вдоль оси своего вращения.

Как обнаружить вращение галактик? Если галактика наблюдается в плане, ориентирована так, что ось вращения совпадает с лучом зрения, то движения ее частей вследствие вращения направлены перпендикулярно к лучу зрения и мы не способны эти движения уловить, так как собственные движения, ввиду огромного расстояния, исчезающе малы. Если же Галактика наблюдается с ребра — ось вращения лежит в картинной плоскости, то вследствие вращения одна часть диска должна приближаться к нам, а другая удаляться. Это отразится на лучевых скоростях, и таким образом, скорость вращения может быть измерена.

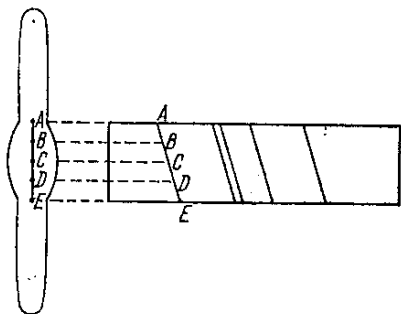


Рис. 73. Наклон линий спектра, вызываемый вращением галактики.

Впервые вращение галактик обнаружил в 1914 г. американский астроном Слайфер. Он направил щель спектрографа вдоль большой оси видимого эллипса галактики (т. е. вдоль линии AE на рис. 73) и снял ее спектр. Обычно линии в спектрах бывают направлены вертикально, а в данном случае они оказались наклоненными, как это показывает правая часть рисунка. Наклон линий вызван тем, что точка A галактики вследствие вращения движется в нашу сторону и имеет меньшую лучевую скорость, чем точка C , соответствующая центру. Поэтому согласно эффекту Доплера в спектре соответствующая точка линии должна быть смещена к фиолетовому концу. Точка B тоже приближается к нам, но медленнее, чем точка A , поэтому она смещена меньше. Точки D и E , расположенные ниже центра, в результате вращения галактики удаляются от нас, поэтому соответствующие им точки на спектральной линии смещены в красную сторону спектра.

Поверхностная яркость галактик недостаточна, чтобы можно было получить линии спектра, простирающиеся

вверх и вниз до самых границ наблюдаемых областей галактик. Линии спектра можно разглядеть только на участке, соответствующем ядру, которое значительно ярче периферийных областей звездной системы. Следовательно, наклон линий указывает лишь на то, что вращается ядро галактики.

Важной особенностью спектра является то, что линии, наклоняясь, остаются прямыми, не изгибаются. Это означает, что смещения точек A , B , D , E на спектральной линии пропорциональны расстояниям соответствующих точек на диске галактики от ее центра. Следовательно, и лучевые скорости, вызываемые вращением, пропорциональны расстояниям от центра диска. Это показывает, что ядро галактики вращается как твердое тело. В самом деле, линейная скорость вращения v , угловая скорость ω и расстояние R до центра вращения связаны равенством

$$v = \omega \cdot R. \quad (13)$$

Поэтому только при вращении, подобном вращению твердого тела, при постоянстве угловой скорости ω , у всех точек линейная скорость вращения пропорциональна расстоянию от центра.

Измеряя углы наклона линий, можно вычислить угловую скорость вращения и период полного оборота для ядер галактик. Это было сделано для ряда звездных систем. Наименьший период оборота — 2,8 млн. лет — оказался у ядра галактики NGC 411 типа S0. На следующем месте по быстроте вращения стоит NGC 2683, тип Sc, период 6,4 млн. лет. Затем идет NGC 3115 (см. рис. 32), тип E7 — 8,8 млн. лет. Медленнее всего вращаются ядра галактик NGC 7640 типа SBc и NGC 4559 типа Sc. Периоды их вращений превосходят 400 млн. лет.

Ядра галактик, как и сами звездные системы, вследствие вращения испытывают сжатие. Сжатие тем больше, чем больше скорость вращения и чем меньше плотность. Зависимость между скоростью вращения, сжатием и плотностью ядра можно использовать для нахождения любой из этих характеристик, если две другие известны. В данном случае оказываются известными сжатие, которое можно измерить непосредственно на снимке, и скорость вращения ядра. Поэтому можно вычислить плотность материи в ядрах галактик. Она оказывается различной в различных галактиках, колеблясь от 10^{-26} до 10^{-22} г/см³. Плотность материи в окрестностях Солнца

составляет приблизительно $2 \cdot 10^{-24}$ г/см³. Значит, в ядрах галактик плотность материи в сотни и тысячи раз выше, чем на периферии звездных систем. По-видимому, и ядро нашей Галактики в сотни, а может быть, и тысячи раз плотнее той области звездной системы, которая окружает Солнце. Но это данные о средней плотности ядер. В центральных областях самих ядер плотность материи, согласно последним данным, еще в сотни и даже тысячи раз выше названных величин.

Итак, ядра галактик вращаются как твердые тела. Для того чтобы определить закон вращения для областей вне ядра, метод наклона спектральных линий применить не удастся, мала поверхностная яркость этих областей. Но был найден другой путь. В спиральных галактиках звезды горячие гиганты и сверхгиганты совместно с водородными облаками образуют яркие сгустки. Используя большие телескопы, можно получать отдельные спектры этих сгустков и, измеряя положения спектральных линий, вычислять лучевую скорость. Иногда в одной галактике можно найти более десятка таких сгустков, расположенных на различных, иногда значительных расстояниях по обе стороны от ядра, и измерить их лучевую скорость.

Рассмотрим, например, фотографию галактики NGC 5055 и график, на котором показаны лучевые скорости различных точек (сгустков) в этой галактике, измеренные Е. М. Бербидж, Г. Р. Бербиджем и К. Х. Прендергастом (рис. 74). По вертикали для наглядности отложены не полные лучевые скорости, а разности между лучевыми скоростями сгустков и лучевой скоростью ядра, так как именно эти разности характеризуют вращение галактики. Как и следовало ожидать, по одну сторону от центра все разности лучевых скоростей положительны, эта сторона в результате вращения движется от нас, а по другую сторону от центра отрицательны, эта сторона, вращаясь, движется к нам. Через полученные точки на графике проведена сглаженная кривая, которая характеризует закон изменения скорости вращения различных областей галактики в зависимости от расстояния до центра и которая поэтому называется кривой скоростей. То, что точки ложатся не точно на кривую, а несколько разбросаны вокруг нее, объясняется, во-первых, тем, что яркие сгустки, лучевая скорость которых определялась, не лежат в картинной плоскости, проходящей через центр

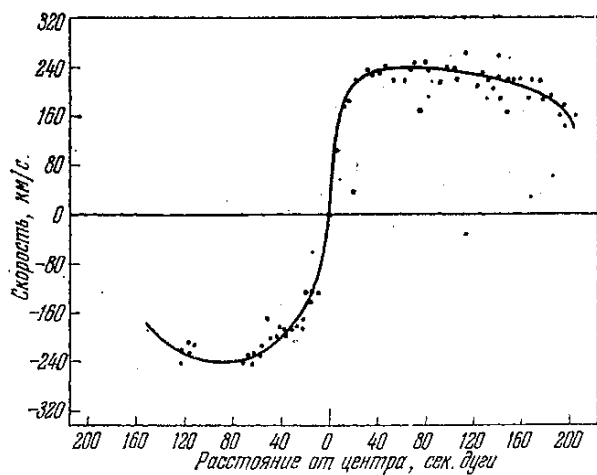


Рис. 74. Кривая скоростей галактики NGC 5055.

галактики, и скорость их вращения около центра галактики составляет различные углы с лучом зрения. Во-вторых, каждый сгусток, кроме скорости общего вращения,

имеет свою индивидуальную скорость. Наконец, разброс точек вызван и ошибками измерения.

Мы видим, что у NGC 5055 кривая скоростей сначала, близ центра, близка к прямой. Это подтверждает вращение ядра как твердого тела, так как указывает, что линейная скорость вращения пропорциональна расстоянию от центра галактики, а угловая скорость постоянна. Затем кривая отклоняется от прямой, линейные скорости продолжают возрастать, но не так быстро, как получалось бы по прямой. Это означает, что угловая скорость вращения начинает убывать по мере удаления от центра галактики.

За некоторой точкой уменьшение угловой скорости уже не может компенсироваться увеличением расстояния, произведение ωR , а следовательно, и линейная скорость начинают убывать, приближаясь постепенно к нулю.

Для получения наклонных линий в спектре ядра галактики или для построения кривой скоростей по лучевым скоростям отдельных ярких сгустков в теле галактики нет необходимости, чтобы галактика была обращена к нам строго ребром. Угол i между лучом зрения и главной плоскостью галактики может и не равняться нулю, хотя чем он больше, тем вращение определяется менее уверенно. Если этот угол отличен от нуля, то разности лучевых скоростей рассматриваемой точки и центра галактики равны линейной скорости вращения, умноженной на $\cos i$. Поэтому для определения линейной скорости вращения по разности лучевых скоростей нужно последнюю делить на $\cos i$. Значит, нужно еще уметь оценивать угол i наклона главной плоскости галактики к лучу зрения. Это обычно можно делать с точностью до $2-3^\circ$ по фотографии спиральной галактики. Например, для галактики NGC 5055 (см. рис. 74) угол i оценивается в 31° .

Вопрос о направлении вращения спиральных галактик

Уже много лет между астрономами идет дискуссия о том, в каком направлении вращаются спиральные галактики. Вращаются ли они, волоча за собой спиральные ветви, т. е. закручиваясь? Так было бы, например, если бы спиральная галактика NGC 4303 (рис. 75) вращалась по часовой стрелке. Или же они вращаются кон-

цами спиральных ветвей вперед, раскручиваясь? В этом случае NGC 4303 вращалась бы против часовой стрелки.

Но вращение галактики, наблюдаемой в плане, как NGC 4303, обнаружить невозможно. Если же спиральная галактика наблюдается с ребра, то вращение ее легко определяется, но при этом неразличимы спиральные ветви.

Значит, нужно обратиться к спиральным галактикам, наблюдаемым, так сказать, в три четверти, т. е. таким,



Рис. 75. Галактика NGC 4303 типа Sc.

у которых угол i наклона главной плоскости к лучу зрения отличен и от 0° и от 90° и составляет от 15 до 60° . У таких галактик и спиральные ветви можно разглядеть, и измерить лучевые скорости, вызываемые вращением. Однако и в этом случае вопрос о направлении вращения оказывается не простым. Вот, например, галактика NGC 5055 (см. рис. 74). Ее спиральные ветви различимы, они выходят из ядра и затем огибают его против часовой стрелки. Измерение лучевых скоростей показало, что вследствие вращения правая часть этой галактики от нас удаляется, а левая часть приближается. Достаточно ли этих данных, чтобы определить, как вращается NGC 5055 — концами ветвей вперед или назад? Нет, недостаточно. Необходимо еще знать, какая часть галакти-

ки NGC 5055 к нам ближе — верхняя или нижняя. Если ближе к нам верхняя часть, то NGC 5055 вращается концами ветвей вперед, если же ближе нижняя часть, то вращение происходит концами ветвей назад. Но вот это и труднее всего определить; мы не знаем как сориентирована NGC 5055 в пространстве, какая ее сторона к нам ближе, а какая дальше. Единственный шанс определить ориентацию дает располагающаяся в галактике темная материя. Если галактика наблюдается почти

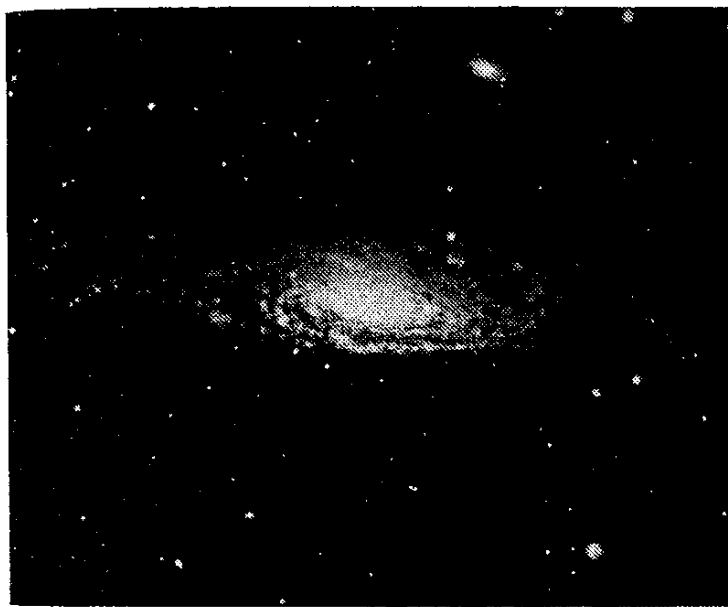


Рис. 76. Галактика NGC 7334, позволяющая определить, что спиральные галактики закручиваются.

с ребра, как, например, NGC 4594 на рис. 71, то темная материя отчетливо указывает, что нижняя на снимке часть плоской составляющей галактики к нам ближе, а верхняя дальше. Но у этой галактики неразличимы спиральные ветви. Если же i больше 30° , то плохо видна темная материя.

Поэтому для решения задачи нужно рассмотреть спиральную галактику с углом наклона главной плоскости к лучу зрения от 15 до 30° и: 1) суметь определить в ней расположение спиральных ветвей, 2) по распреде-

лению темной материи выяснить, какая из сторон галактики к нам ближе, 3) по наклону спектральных линий или по лучевым скоростям ярких сгустков определить, какая часть галактики к нам приближается в результате вращения. Тогда задача решится. Но первые два пункта препятствуют друг другу. Если хорошо видны спиральные ветви, то обычно плохо различима темная материя, и наоборот. Поэтому на примере ряда галактик мнения астрономов расходились. Как сторонники предположения вращения галактик концами назад, так и сторонники противоположной гипотезы находили во внешнем облике этих галактик аргументы в пользу своей точки зрения.

В настоящее время, однако, становится ясным, что наблюдения подтверждают гипотезу закручивания спиральных ветвей при вращении. Найдены галактики, для которых вопрос разрешается достаточно уверенно. Для примера приведем фотографию NGC 7331 (рис. 76), рассмотренную Вокулером. По расположению темной материи видно, что нижняя часть эллипса ближе к нам, а верхняя дальше. Изучение элементов спиральных ветвей, в особенности их концов в правой и левой части рисунка, показывает, что спирали на фотографии направлены против вращения часовой стрелки. Наконец, спектрограмма показывает, что правая на снимке часть галактики вследствие вращения приближается к нам, а левая удаляется. Сопоставление этих данных приводит к выводу о закручивании спиральных ветвей. Галактики вращаются концами ветвей назад.

Определение масс галактик

Вращение галактик дает ключ к определению их масс. В каждой точке галактики центробежная сила, вызываемая вращением, уравнивается центростремительной силой, вызываемой притяжением к центру галактики, а сила притяжения зависит от распределения масс в галактике. Поэтому по ходу кривой лучевых скоростей можно определить, как изменяется плотность материи в галактике и оценивать общую массу галактики.

Это — важное достижение внегалактической астрономии, так как масса звездной системы является одной из ее главнейших характеристик.

К сожалению, для эллиптических галактик и карликовых галактик I II нельзя построить кривую скоростей. Эти галактики вращаются медленнее. Кроме того, они составлены из звездного населения II типа, в них нет горячих гигантов, сверхгигантов и водородных облаков, образующих яркие сгустки материи, лучевые скорости которых можно было бы измерить. Поэтому для галактик E и I II пришлось разработать другой метод, менее точный, но все же позволяющий оценивать массы. Он основан на том, что в звездных системах, которые не вращаются или вращаются очень медленно, звезды движутся в одинаковой степени или почти в одинаковой степени по всем направлениям. Так, например, движутся и молекулы окружающего нас воздуха: в каждом маленьком объеме в каждый момент есть молекула, которая движется вертикально вверх, молекула, которая движется вертикально вниз, и молекулы, движущиеся по всем другим направлениям.

В невращающейся звездной системе среднюю скорость звезд можно определить спектральным методом. На какое бы место звездной системы ни была наведена щель спектрографа, в этом месте окажутся и звезды, движущиеся к нам, и звезды, движущиеся от нас, и звезды, движущиеся по всем другим направлениям. У всех этих звезд лучевая скорость по отношению к нам различна, и если бы мы могли получить спектры каждой из этих звезд по отдельности, то вследствие эффекта Доплера смещения линий в спектрах были бы различны. Но спектр галактики — это суммарный, составной спектр всех входящих в нее звезд. Если сложить все спектры с разными из-за разных лучевых скоростей положениями линий, то в составном спектре линии окажутся расширенными. При этом расширение линий будет тем сильнее, чем больше скорости звезд в галактике.

Наблюдения показывают, что спектральные линии в невращающихся или медленно вращающихся звездных системах действительно расширены. Измеряя это расширение, можно определять среднюю скорость звезд в системе.

Между массой невращающейся галактики, ее объемом и средней скоростью движущихся в ней по всем направлениям звезд имеется зависимость. Если при равенстве объемов у одной звездной системы больше масса, то должны быть больше и скорости звезд, иначе под действием

большого притяжения звездная система с большей массой стала бы сжиматься. Зависимость между массой, объемом и средней скоростью звезд исследована теоретически. Поэтому если две из этих трех величин как-то измерены, то, используя зависимость между ними, можно вычислить и третью. Объем галактики E или I II можно получить, измерив ее угловые размеры и определив ее расстояние. Среднюю скорость звезд можно вычислить

Т а б л и ц а 15. Массы галактик

Название галактики	Тип галактики	Масса в миллиардах солнечных масс	Отношение σ_R/L
NGC 3556	I I	14	1,4
Большое Магелланово Обла- ко	I I	13	4
NGC 55	I I	40	6
NGC 3034	I I	15	7,4
NGC 2146	Sc	18	3
NGC 598	Sc	18	11
NGC 5457	Sc	14	13
NGC 157	Sc	60	1,9
NGC 5248	Sc	50	3
NGC 5055	Sc	55	2,8
NGC 2903	Sb	49	4
NGC 3646	Sb	250	3,2
NGC 253	Sb	300	10
NGC 5005	Sb	90	6
NGC 3031	Sb	150	20
NGC 224	Sb	340	16
NGC 3623	Sa	250	15
Система в Скульпторе	I II	0,002	3
Система в Печи	I II	0,02	3
NGC 221	E2	1,8	13
NGC 4111	S0	12	13
NGC 3379	E0	100	12
NGC 3115	E7	110	19
NGC 4486	E0	1000	60

по расширению спектральных линий. Тогда находится и масса галактики.

В табл. 15 приводятся результаты определения масс галактик по кривым скоростей вращения или по расширению спектральных линий. Большая часть этих результатов получена американскими астрономами Бербиджами.

Бросается в глаза чрезвычайно малая масса карликовых галактик I II. У одной из них масса только 2 мил-

лиона, у другой 20 миллионов солнечных масс. Очень мала также масса эллиптического спутника NGC 221 туманности Андромеды. Все остальные галактики в списке пекарликовые. Можно заметить, что массы в среднем растут, если переходить от галактик типа II к Sc, а затем к Sb и Sa.

Чемпионом по массивности среди галактик с измеренными массами является эллиптическая галактика NGC 4486 типа E0, т. е. не имеющая видимого сжатия.

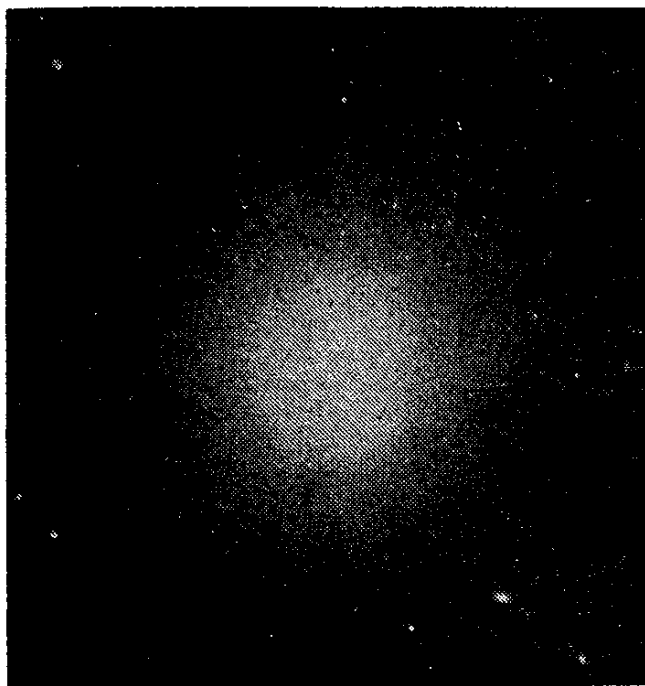


Рис. 77. NGC 4486 — самая массивная из галактик, массы которых измерены.

Ее масса равна тысяче миллиардов масс Солнца. Фотография этой галактики приведена на рис. 77. NGC 4486 замечательна также окружающей ее богатейшей системой шаровых скоплений. И в этом отношении она чемпион среди галактик, так как число этих шаровых скоплений превышает 4000. Многие из них настолько яркие, что отчетливо видны на рис. 77 и представляют вместе с

NGC 4486 грандиозное, захватывающее дух зрелище. Напомним, что в сверхгигантских галактиках — туманности Андромеды и нашей звездной системе — насчитано соответственно около 300 и 132 шаровых скопления.

В последнем столбце табл. 15 даны отношения масс галактик к их светимостям, причем и те и другие выражены в массах и светимостях Солнца. Можно видеть, что M/L сравнительно мало у галактик I I и Sc и велико у Sb и E. Это еще раз подтверждает, что в галактиках II и Sc преобладает первый тип звездного населения, для которого значение M/L , как мы уже указывали в гл. I мало. В галактиках Sb I тип звездного населения представлен менее обильно, а в галактиках E доминирует звездное население II типа. Особенно велико отношение M/L у чемпиона по массе — галактики NGC 4486. Из сравнений величин M и M/L видно, что масса NGC 4486 в три раза больше массы туманности Андромеды (NGC 224), но светимость ее уступает светимости туманности Андромеды.

У эллиптических галактик велики массы и, кроме того, сравнительно малы размеры, объемы. Поэтому их плотности значительно выше плотности спиральных галактик. Недавно Г. Р. Бербидж предложил космогоническое объяснение наблюдаемому отсутствию в эллиптических галактиках представителей звездного населения I типа. Бербидж придерживается гипотезы происхождения звезд из газовой материи и считает, что высокая плотность материи в эллиптических галактиках указывает на то, что они были более плотны и на стадии протогалактики, т. е. до того, как в них начали формироваться звезды. Чем выше плотность материи в протогалактике, тем более дружно и интенсивно происходит в ней звездообразование. Можно считать, что скорость массового звездообразования пропорциональна квадрату плотности материи. Поэтому в эллиптических галактиках практически в самом начале вся газовая материя сконденсировалась в звезды и все звезды успели пройти длительную эволюцию, приведшую их к тому типу, который мы называем звездным населением типа II. Спиральные же галактики на стадии протогалактики имели, как и сейчас, сравнительно низкую плотность, звездообразование в них поэтому происходило медленно и тянется до настоящего времени, вследствие чего мы наблюдаем в них молодые звезды, в том числе горячие гиганты и сверхгиганты.

В этих галактиках осталось еще некоторое количество газовой материи, которая может служить материалом для дальнейшего звездообразования. Впрочем, как мы уже указывали выше, малое количество газовой материи в Галактике, около 2% общей массы, плохо согласуется с продолжающимся в ней интенсивным звездообразованием. Между тем о последнем свидетельствует большое число горячих гигантов и сверхгигантов.

Вспышки сверхновых звезд в галактиках

Одно из поразительнейших явлений природы — вспышки сверхновых звезд. Это событие крайне редкое в жизни звезд. В Галактике свыше 100 миллиардов звезд, однако за время существования телескопической астрономии в нашей звездной системе не наблюдалось ни одной вспышки сверхновой. Невооруженный глаз человека видел, как сейчас считают, семь вспышек сверхновых, отмеченных в китайских, японских, корейских, арабских и европейских летописях. Их список дан в табл. 16.

Т а б л и ц а 16. Сверхновые звезды

Год	Созвездие	Видимая звездная величина	Галактическая широта
185	Центавр	-8^m	0°
393	Скорпион	-1	$+2$
1006	Волк	-9	$+14,5$
1054	Телец	-5	$-5,8$
1181	Кассиопея	0	$+2$
1572	Кассиопея	-4	$+1,4$
1604	Змееносец	$-2,5$	$+6,8$

Из таблицы видно, что сверхновая 393 года в 100 раз, а сверхновая 185 года в 40 раз в максимуме блеска были ярче Венеры, видимая звездная величина которой в максимуме блеска равна -4^m . Галактические широты вспышек показывают, что все они происходили поблизости от плоскости симметрии Галактики. Моменты вспышек, очевидно, совершенно случайны. В двух случаях промежутки между ними меньше 50 лет, но есть и промежуток в 6 столетий. Последняя вспышка сверхновой в нашей Галактике наблюдалась в 1604 г., за 5 лет до того как Галилей впервые навел телескоп на небо. Неверно было

бы считать, что после этого в Галактике не было вспышек сверхновых. Можно быть уверенным, что за прошедшие почти 4 столетия они и не один раз происходили в далеких областях Галактики близ ее плоскости, скрытые от нас непроницаемым слоем поглощающей свет пылевой материей.

В некотором отношении изучение свойств имевших место в прошлом семи вспышек сверхновых в нашей Галактике производится и сейчас. В результате вспышки в окружающем звезду объеме образовывалась газовая туманность — реликт сверхновой. Эти туманности продолжают в наше время посылать по всем направлениям радиоизлучение, и благодаря этому их возможно исследовать. В случае же вспышки сверхновой 1054 г. ее результатом является красивая Крабовидная туманность, хорошо наблюдаемая и в оптические телескопы. Оптически наблюдаемая туманность есть и на месте вспышки сверхновой 1604 г.

Однако наибольший интерес представляют наблюдения сверхновых в моменты быстрого изменения их блеска, в особенности около максимума блеска. Поэтому вспышки сверхновых, происшедшие в Галактике, не дают достаточно материала для изучения природы этого редкостного явления. Возможно даже, что если бы их наблюдали только в Галактике, то не было бы оснований для выделения их в особый класс вспыхивающих звезд, отличающихся от обыкновенных новых.

К счастью, сверхновые вспыхивают и в других галактиках. В максимуме блеска их светимость колоссальна, абсолютная звездная величина заключается в пределах от -12^m до -18^m . Если допустить, что вспышка сверхновой может наблюдаться, когда ее видимая звездная величина в максимуме блеска не превосходит $+16^m$, то это означает, что сверхновая с абсолютной звездной величиной -16^m будет обнаружена на расстоянии до 25 Мпс. Это огромное расстояние. Десятки тысяч галактик расположены к нам ближе 25 Мпс. Поэтому, наблюдая другие галактики, мы в десятки тысяч раз увеличиваем возможность наблюдать сверхновые звезды.

Первая вспышка сверхновой в другой галактике была зарегистрирована в 1885 г. Она произошла в туманности Андромеды. В максимуме блеска сверхновая имела видимую звездную величину $+7^m,2$ и могла наблюдаться в бинокль. Можно подсчитать, зная расстояние, что ее абсо-

лютная звездная величина была близка к -17^m . Следующие вспышки наблюдались в 1919 г. в NGC 4486 и в 1926 г. в NGC 4303.

С 1933 г. систематический поиск сверхновых предпринял Цвикки. За период до 1942 г. было обнаружено 19 вспышек. Однако вторая мировая война прервала работу. Только с 1954 г. возобновился систематический поиск. Особый прогресс был достигнут после того как в 1959 г. для этих целей стал использоваться 48-дюймовый (120 см) телескоп Шмидта обсерватории Маунт Паломар. Это мощный телескоп, обладающий важной особенностью, — видимая в поле его зрения площадь неба значительно больше, чем у обычных телескопов.

Если до 1959 г. число открываемых сверхновых в год колебалось от двух до четырех, то в 1959 г. было обнаружено 5 вспышек, в 1960 — 18, в 1961 — 22, в 1962 — 16, в 1963 — 22, в 1964 — 11, в 1965 — 14 и в 1966 — 12. С 1961 г. поиски сверхновых в других галактиках ведут 11 стран, в том числе Советский Союз. Общее число всех зарегистрированных сверхновых в других галактиках на 1 сентября 1978 г. составило 456.

Для открытия сверхновой фотографируют последовательно участки неба и сравнивают снимки со снимками, сделанными в предыдущие дни. Если в какой-нибудь галактике появилась яркая точка, которой до этого не было, значит, вспыхнула сверхновая. Тогда эта галактика подвергается многократному фотографированию через определенные промежутки времени. На сверхновую направляют также щель спектрографа, получают ее спектры. Обычно спектры можно получать только в моменты, близкие к максимуму блеска; после этого у сверхновой недостаточно света, чтобы спектр на пластинке проявился. Расширение линий в спектрах показывает всегда, что сверхновые выбрасывают во все стороны газовую материю, которая движется со скоростью в несколько тысяч километров в секунду.

Иногда блеск сверхновой в момент максимума бывает сравним с полным блеском той галактики, в которой произошла вспышка. Чаще он уступает полному блеску галактики, но ненамного. Только в случае сверхгигантских галактик разница блеска значительна.

Число галактик, входящих в область наблюдений и достаточно близких, чтобы происшедшая вспышка сверхновой могла быть замечена, можно оценить в 5000.

Среднее число обнаруживаемых ежегодно вспышек за последние десять лет, когда можно считать, что число пропускаемых вспышек незначительно, равно приблизительно 25. В сверхгигантских галактиках они происходят чаще, чем в гигантских, в гигантских чаще, чем в карликовых. Приблизительно выполняется условие, согласно которому частота вспышек пропорциональна количеству материи в галактике. Но в спиральных галактиках они происходят чаще, чем в эллиптических, а среди спиралей они чаще всего случаются в тех, которые относятся к подтипу Sc, и реже всего в тех, которые относятся к подтипу Sa. Приблизительная оценка частоты вспышек сверхновых в гигантских галактиках равна одной за 50 лет.

Когда же, наконец, произойдет очередная вспышка сверхновой внутри нашей Галактики? Означает ли отсутствие вспышек в течение 360 лет, что теперь они надели и вероятность появления сверхновых в ближайшие годы возросла? Нет, не означает. Во-первых, мы не можем утверждать, что в нашей системе за последние три с половиной столетия действительно не было сверхновых. Вспышки происходят близ галактической плоскости и далекие из них не могут наблюдаться вследствие сильного поглощения света. Не заметить, пропустить явление сверхновой в нашей Галактике легче, чем в любой другой галактике, если только последняя наблюдается не с ребра.

Но даже если длительное отсутствие вспышек реально, оно не увеличивает вероятности появления сверхновых в ближайшее время. Такова закономерность появления случайного события тогда, когда оно может произойти с ничтожно малой вероятностью у каждого из членов коллектива, а членов в коллективе очень много, например, как звезд в Галактике. Поэтому, несмотря на то, что последняя вспышка сверхновой в нашей Галактике наблюдалась в 1604 г., вероятность появления сверхновой в текущем году такая же малая, как и в 1605 г., который следовал за 1604 г.

Об этом стоит пожалеть. Сравнительно близкая вспышка сверхновой — это очень интересное зрелище, и она была бы очень ценным объектом исследования. Ее можно было бы заметить раньше, до достижения максимума блеска, и изучить процесс нарастания яркости сверхновой, ускользающий при наблюдениях вспышек в других галактиках. Наблюдения можно было бы вести долгое

время после ослабления блеска, чтобы узнать, какова окончательная судьба сверхновой — вопрос, не разрешимый для сверхновых в других галактиках. Значительная видимая яркость сверхновой позволила бы получить спектр с большим числом подробностей и произвести детальное исследование.

Но слишком близкая вспышка сверхновой может таить и опасность. Если бы эта катастрофа произошла, например, с нашим ближайшим соседом — α Центавра, то в максимуме блеска сверхновая светила бы как 500 лун. При очень высокой температуре ее поверхности ультрафиолетовое и еще более коротковолновое излучение, достигающее Земли, могло бы представить опасность для жизни на нашей планете.

Ядра и ядрышки галактик

У спиральных галактик, как наблюдаемых в плане, так и обращенных к нам ребром, обычно хорошо различимо ядро. Это наиболее яркая область спиральной галактики. Ядро наблюдается и у чечевицеобразных галактик SO. У эллиптических галактик признаки его можно обнаружить только у наиболее сжатых галактик E6—E7.

Ядро — наиболее плотная область галактики. Это динамически естественно. И у других звездных систем — шаровых скоплений, рассеянных скоплений — центральные области имеют наибольшую звездную плотность.

Однако исследования последних лет показали, что ядра галактик не являются просто несколько более плотными центральными местами звездных систем, и только. Они обладают рядом важных особенностей. Так, выяснилось, что в самом центре ядра можно обычно обнаружить еще одно сильное уплотнение — ядрышко.

Впервые это удалось сделать в 1940 г. Хьюмасону при помощи 2,5-метрового телескопа обсерватории Маунт Вилсон у туманности Андромеды. Оказалось, что в центре большого ядра, имеющего диаметр свыше 100 пс, находится ослепительно яркое ядрышко размерами приблизительно 14 на 10 пс. В 1959 г. удалось измерить вращение этого ядрышка. Вращается оно как твердое тело. На расстоянии 7 пс от центра линейная скорость, определенная по наклону спектральных линий в спектрограмме, равна 87 км/с. Это показывает, что период вращения равен приблизительно 500 тысячам лет. Можно также оценить массу ядрышка — она составляет около 13 млн.

солнечных масс. Отсюда следует, что плотность в ядрышке равна 1500 солнечных масс на 1 пс^3 , т. е. в 20 000 раз больше, чем в окрестностях Солнца.

Ядрышко туманности Андромеды вращается значительно быстрее прилегающих к нему областей. На расстоянии 14 пс от центра линейная скорость уже равна только 42 км/с и период вращения почти в пять раз больше, чем у ядрышка. Можно думать, что ядрышко — самостоятельное образование, вложенное в галактику.

Ядрышко тех же размеров и той же скорости вращения, а значит, той же массы и плотности, обнаружено также у спутника туманности Андромеды NGC 221. Интересно, что у этой эллиптической галактики ядро не наблюдается, а ядрышко все же есть.

Очень маленькие яркие ядра обнаружены и у других галактик, например у NGC 1068 и NGC 4151.

Радиоисследования ядра нашей Галактики тоже свидетельствуют о существовании в его центре ядрышка. Оно круглое с диаметром около 6 пс.

Интересны особенности излучения ядер галактик. Обычно спектры областей вне пределов ядра галактики не содержат эмиссионных (ярких) линий, более интенсивных, чем прилегающая область спектра. Ядра же большей части галактик имеют эмиссионные линии в спектре. Особенно распространена линия с длиной волны $3727 \text{ \AA}$, принадлежащая дважды ионизованному кислороду. Табл. 17 показывает частоту встречаемости этой линии в ядрах галактик различных типов.

Для того чтобы возникла линия $3727 \text{ \AA}$, необходимо, чтобы в ядре имелось достаточное количество кислорода и был возбуждающий механизм (например, достаточное излучение в ультрафиолетовой области спектра), способный дважды ионизовать кислород и затем возбуждать ионизованный атом. Такое достаточно сильное ультрафиолетовое излучение могут давать звезды — горячие гиганты и сверхгиганты. Но звезд этого типа как раз в ядрах галактик нет. Они сосредоточены в спиральных ветвях. Поэтому непонятно, как в ядрах галактик возникает эмиссионная линия $3727 \text{ \AA}$. Таблица показывает, что процент ядер с эмиссионной линией растет по мере перехода от спиральных галактик раннего типа к спиральным галактикам позднего типа. И в то же время ни для одного из типов галактик наличие или отсутствие эмиссионной

линии в ядре не является универсальным правилом. Какое-то количество галактик в каждом типе лишено эмиссионных линий.

В ядрах некоторых галактик, кроме линии $3727 \text{ \AA}$, наблюдаются также линии трижды ионизованного кислорода, дважды и трижды ионизованной серы, трижды ионизованного неона, четырежды ионизованного аргона и

Т а б л и ц а 17. Частота встречаемости линии $3727 \text{ \AA}$ в галактиках разных типов

Тип галактики	Число исследованных галактик данного типа	Процент галактик, у которых в ядре или центральной области обнаружена эмиссионная линия $3727 \text{ \AA}$
E	123	16
S0	85	40
Sa	57	56
Sb	131	71
Sc	159	73
I	17	94

другие. Все эти линии требуют еще более сильного механизма возбуждения атомов соответствующих газов.

Чрезвычайно существенно также, что все перечисленные эмиссионные линии сильно расширены. Это указывает на большую скорость газа по всем направлениям. Если в газе один атом движется быстро к нам, второй от нас и другие по всевозможным направлениям, то длина волны излучения, приходящего от каждого атома, различным образом вследствие эффекта Доплера смещена в спектре. Линия, являющаяся результатом суммирования этих излучений, расширяется. По расширению линии можно определить среднюю скорость газов. Скорости оказались очень большими. Они измеряются тысячами километров в секунду. В одном случае было получено 8500 км/с . Скорости свыше 1000 км/с достаточны, чтобы преодолеть удерживающую силу поля тяготения галактики и уйти в пространство между галактиками. Но быстро движущиеся частицы газа по пути сталкиваются с другими, медленно движущимися частицами газов и удерживаются ими в галактике.

Наличие эмиссионных линий многократно ионизованных газов в ядрах многих галактик и большие скорости этих газов уже говорят о том, что в ядрах галактик про-

исходят какие-то бурные процессы, природа которых нам еще неизвестна. Но оказалось, что ядра некоторых галактик являются ареной космических катастроф совершенно невиданного масштаба.

Грандиозный взрыв в ядре галактики NGC 3034

В 1963 г. американские астрономы Линде и Сендидж опубликовали результаты исследования галактики NGC 3034. Эта неправильная галактика типа II (рис. 78) обладает особенностью — ее цвет не соответствует спектру. Спектр у нее A2 — еще более ранний, чем обычно бывает у галактик типа II, а цвет вместо того, чтобы быть белым, или даже голубым, оказался оранжево-красноватым. В подобных случаях, когда цвет звезды или галактики краснее, чем это следует из ее спектра, наиболее вероятно, что покраснение вызвано наличием диффузной материи. У NGC 3034 контраст между спектром и цветом настолько значителен, что Линде и Сендидж предположили существование в ней очень большого количества газовой и пылевой материи и выполнили специальное исследование. Сендидж получил на 5-метровом телескопе снимки в узкой части спектра около спектральной линии H_{α} и в желтых лучах, в которых газовые и пылевые массы фотографируются более отчетливо. Снимок в лучах H_{α} воспроизведен на рис. 79. Исследование снимков показало наличие плотной системы темных каналов и светлых волокон диффузной материи, связанных с ядром, свидетельствующих своей формой об энергичном движении, простирающихся на расстояние до 3 кпс по обе стороны от ядра в направлении его малой оси. На рис. 79, являющемся негативом, темные каналы кажутся светлыми, а светлые волокна видны как темные.

Спектрограммы показали, что диффузная материя дает эмиссионные линии и, следовательно, какой-то механизм привел газ в возбужденное состояние. Эмиссионные линии обнаруживают расширение. Измерение его показало, что газ движется со скоростью около 1000 км/с прочь от ядра, образуя волокна. Так как волокна обрываются на расстоянии 3 кпс от ядра (газ успел дойти до этого места), то все перечисленные явления позволяют прийти к заключению, что в ядре NGC 3034 около полутора миллионов лет назад произошел грандиозный взрыв, вызвавший выброс со скоростью около 1000 км/с огромных масс

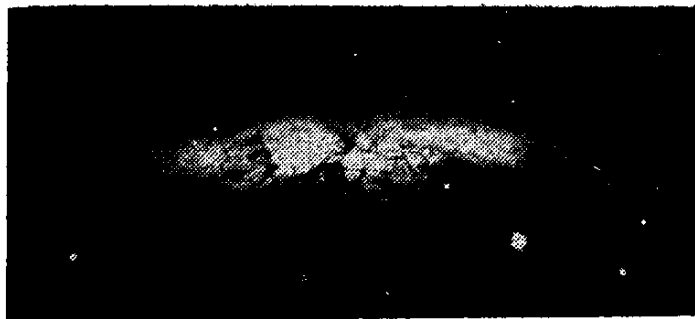


Рис. 78. Галактика NGC 3034.

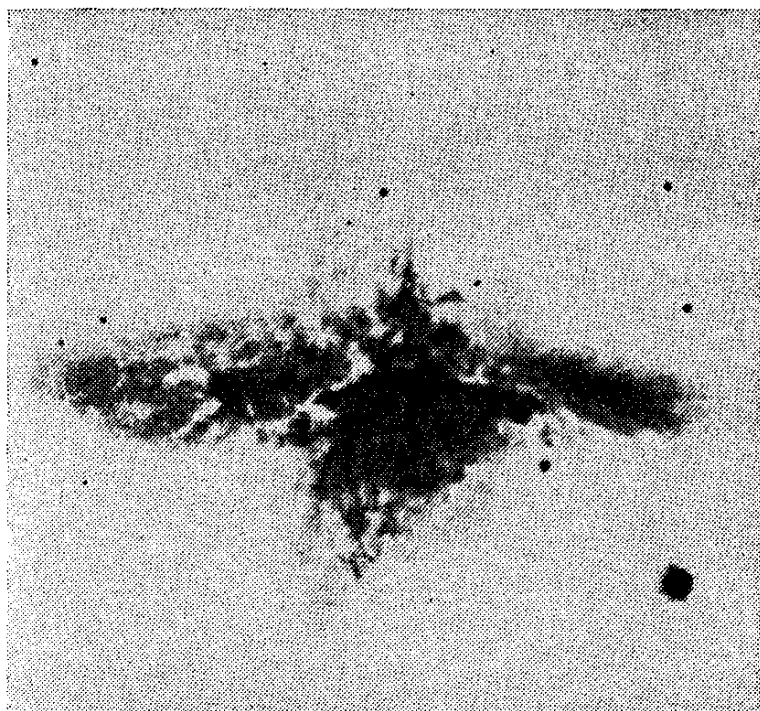


Рис. 79. Снимок галактики NGC 3034, сделанный в лучах H_{α} .

диффузной материи. Энергия, выделившаяся при взрыве, была израсходована, во-первых, на то, чтобы привести в быстрое движение диффузную материю и, во-вторых, на то, чтобы перевести ее атомы в ионизованное и возбужденное состояние. По наблюдаемой интенсивности излучения в линии H_α можно оценить плотность выброшенной диффузной материи, а следовательно, и ее общую массу, которая оказалась равной 5,6 млн. солнечных масс. Это позволяет при известной скорости оценить общую кинетическую энергию движущейся диффузной материи в $2,4 \cdot 10^{48}$ Дж. NGC 3034 излучает в эмиссионных линиях, в непрерывном спектре оптических лучей и, как показали наблюдения Линдса, в радиоволнах. Если оценить общую мощность всего излучения и предположить, что в течение всех полутора миллионов лет от начала взрыва мощность излучения была постоянной и равной нынешней, то оценка энергии взрыва, израсходованной на излучение до настоящего момента, равна $9 \cdot 10^{48}$ Дж.

Итак, по сумме энергий, израсходованных на приведение диффузной материи в движение и на излучение этой материи, можно дать оценку общей энергии взрыва в ядре NGC 3034. Эта энергия больше 10^{49} Дж, т. е. в миллион раз больше, чем энергия, выделяемая при вспышке сверхновой звезды. Еще несколько лет назад вспышки сверхновых считались самыми грандиозными катастрофами во Вселенной. А теперь мы являемся свидетелями катастрофы — взрыва в ядре галактики, масштаб которой еще в миллион раз больше.

Может ли являться взрыв в NGC 3034 уникальным явлением, не имеющим себе подобных во Вселенной? Конечно, нет. Столь значительное событие не может быть результатом случайности. Это, конечно, закономерное явление. Вопрос заключается лишь в том: происходит ли оно со всеми галактиками на некоторой стадии их эволюции или, может быть, только с галактиками некоторого типа, отвечающими определенным физическим требованиям.

То, что явление взрыва в ядре обнаружено пока только у одной галактики, должно объясняться, во-первых, скоротечностью этого процесса, а во-вторых, недостаточной исследованностью даже ярких галактик. Взрыв произошел полтора миллиона лет назад. За это время газовые массы проникли на расстояние трех килопарсек. Еще через 10 млн. лет они дойдут до мест, удаленных от ядра

на 15—18 кпс, т. е. выйдут за границу галактики. Скорость газовых масс, потраченная на преодоление силы тяготения системы, уменьшится, плотность газов после распространения по всему объему галактики станет значительно ниже, вся запасенная энергия излучения успеет израсходоваться. Через 10 млн. лет наблюдатель уже не обнаружит в NGC 3034 признаков взрыва.

Если считать, что:

- 1) мир галактик существует около 10 млрд. лет,
- 2) в каждой из галактик один раз за все время происходит взрыв в области ядра,

- 3) взрывы у разных галактик происходят в разное время и равномерно распределены по всему промежутку времени 10^{10} лет,

- 4) взрыв наблюдается в течение 10 млн. лет,

то только у одной из тысячи галактик в настоящий момент должен наблюдаться взрыв. Неудивительно поэтому, что столь важное и интересное явление не удалось обнаружить раньше, чем через 40 лет после того как началось систематическое изучение галактик. Возможно, однако, что взрывы ядер галактик повторяются, тогда число наблюдаемых взрывов должно быть больше.

Важная задача — проверить другие галактики. Не происходит ли взрыв в ядрах некоторых из них? Недавно Б. А. Воронцов-Вельяминов указал на галактики NGC 5195 и NGC 3077, которые имеют общие черты с NGC 3034. Они тоже принадлежат к типу II и в них примерно по радиусам, идущим от центра, располагаются темные каналы со светлыми волокнами. Необходимо исследовать эти две галактики, хотя у них, в отличие от NGC 3034, не наблюдается радиоизлучение. Возможно, что взрывы в ядрах этих галактик произошли раньше, чем в NGC 3034, радиоизлучение ослабело и не обнаруживается в наши дни, а остальные последствия взрыва еще видны.

Б. Е. Маркарян привел список неправильных галактик, сходных по внешнему виду с NGC 3034. Все они, в отличие от обычных неправильных галактик II, обладают оранжево-красноватым цветом, хотя спектральные классы у них сравнительно ранние: A и F0—F3. Эти галактики, как правило, содержат много темной материи и их светимости в 5—10 раз больше светимостей обычных галактик типа II. Есть основание считать, что исследование спектров и специальных фотографий галактик,

приведенных в списке, позволит обнаружить в некоторых из них гигантские взрывы, исходящие из ядра.

По мнению Бербиджей, взрывающейся галактикой является также VV 144, т. е. галактика, стоящая под номером 144 в каталоге Б. А. Воронцова-Вельяминова.

После обнаружения столь выдающегося явления в ядре NGC 3034 можно полагать, что эмиссионные линии, наблюдаемые в ядрах очень большого числа галактик, являются реликтами значительных событий, происходивших в прошлом. Отсутствие эмиссионных линий в ядрах может свидетельствовать о том, что или галактики испытали взрыв ядра так давно, что успели утратить последние признаки, связанные со взрывом, или же что взрыва не было и некоторые из галактик находятся в предвзрывном состоянии.

Но это — пока только предположения. Одно очевидно — спокойный процесс образования звезд из рассеянного газа путем его сжатия не может объяснить катаклизмов масштаба взрыва в NGC 3034.

Согласно В. А. Амбарцумяну ядра — основная активная область в галактиках и место сосредоточения сверхплотного вещества. Гигантские взрывы перенасыщенного энергией сверхплотного вещества выбрасывают его части из ядра вместе с попутно образующимися звездами и газом вдоль спиральных линий, где в результате непрерывающегося дробления частей сверхплотного вещества продолжается процесс формирования звезд и выделения диффузной материи.

Проблема происхождения спиральных ветвей галактик

Спиральные ветви галактик, пожалуй, самое живописное из космических явлений. У них сложный рисунок, динамичная форма и огромное многообразие структур при единстве главных черт. Излучение, исходящее от спиральных ветвей, составляет большую часть излучения всей спиральной галактики, определяет общий вид звездной системы. Неудивительно поэтому, что спиральным ветвям галактик посвящено много исследований. Изучались их геометрические формы путем сравнения с известными в математике видами спиральных линий, например, со спиралью Архимеда (рис. 80) или логарифмической спиралью (рис. 81).

По-видимому, большая часть спиральных структур галактик напоминает логарифмическую спираль, но это сходство не настолько значительное, чтобы его можно было использовать для динамических и космогонических выводов.

Для выяснения сущности явления спиральных ветвей необходимо определить механизм их образования. Какая причина, какая сила выпуждает материю располагаться вдоль спиральных линий? Почему спиральные ветви устойчивы, не распадаются в течение сотен миллионов или даже миллиардов лет?

Первая гипотеза образования спиральных ветвей принадлежала Джинсу. Мы ее кратко описали в гл. III. Она основывается на предположении, что ядра галактик состоят из газа, а не из звезд, поэтому в наши дни гипотеза Джинса не может претендовать на достоверность.

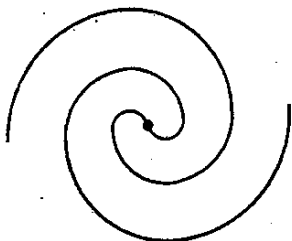


Рис. 80. Две спирали Архимеда.



Рис. 81. Две логарифмические спирали.

Вторая гипотеза была подробно разработана шведским астрономом Линдбладом. Линдблад при помощи строгих математических методов показал, что в звездной системе, имеющей форму сжатого эллипсоида вращения, т. е. такой, как у ядер галактик, на некоторой стадии развития образуется зона недостаточной механической устойчивости, располагающаяся у поверхности близ экватора. Наступает момент, когда из некоторых точек вследствие неустойчивости группы звезд срываются со своих, до этого круговых орбит и устремляются наружу, двигаясь по спиральной линии. Истечение потому происходит из двух противоположных точек, что дополнительный, хотя и небольшой, стимул к истечению звезд создается приближившейся на некоторое расстояние другой галактикой. Тогда неустойчивость достигается в двух точках — ближайшей к соседней галактике и противоположной ей. Линдблад считает, что начавшееся истечение звезд не

устраняет неустойчивости, а усиливает ее, поэтому процесс до определенного времени нарастает и значительная часть массы ядра переходит в спиральные ветви.

Работая над проблемой происхождения спиральных ветвей галактик, Линдблад создал ценную математическую теорию, обогатившую механику и звездную динамику. Ее методы могут успешно применяться для решения различных задач. Однако, как мы уже писали выше, возможность подробного обоснования гипотезы еще не обеспечивает ее правильности. Недостатком гипотезы Линдблада является ее механистичность. Она не учитывает наблюдаемых астрофизических особенностей спиральных ветвей. Как мы уже знаем, спиральную структуру определяют звезды — горячие гиганты и сверхгиганты. Для того чтобы из ядра выбрасывались звезды именно этого типа, нужно, чтобы они в большом количестве населяли ядра галактик. Но ядра галактик, напротив, состоят из звездного населения II типа. Невозможно себе представить, чтобы при выходе из ядра оно превращалось в звездное население I типа.

Из теории Линдблада следовало, что галактики должны вращаться концами спиральных ветвей вперед, т. е. раскручиваясь. Это предсказание не оправдалось: наблюдения показывают обратное — галактики закручиваются, т. е. вращаются концами ветвей назад.

Поэтому, отдавая должное значительному вкладу, внесенному в звездную динамику теорией Линдблада, следует признать необходимым поиск других путей для объяснения спиральной структуры галактик.

Следующая гипотеза, магнитная, основывается на двух важных наблюдательных фактах: концентрации в спиральных ветвях диффузной материи и существовании у Галактики магнитного поля. Она опирается также на гипотезу образования звезд из газовой материи. Сторонниками этой гипотезы являются английский астроном Хойл и некоторые другие исследователи.

Магнитное поле галактики непосредственно наблюдать, конечно, нельзя, но о его существовании свидетельствует ряд признаков. Первым из них является поляризация света звезд, открытая около двадцати лет назад советским астрономом В. А. Домбровским и американским астрономом Хильтнером. Оказалось, что свет звезд обычно на несколько процентов поляризован, т. е. световые волновые колебания происходят не в равной мере во

всех плоскостях, проходящих через луч зрения, а преимущественно группируются у одной определенной плоскости. При этом степень поляризации в среднем тем выше, чем больше темной материи на пути луча, чем больше поглощение, испытанное светом звезды. Единственное объяснение, которое удалось дать этому явлению, состоит в том, что свет поляризуется пылинками темной материи, которые имеют удлиненную форму и ориентированы в пространстве не хаотично, а преимущественно в некотором направлении. Преимущественная ориентация пылинок может происходить лишь в том случае, если в Галактике имеется магнитное поле, а удлиненные пылинки обладают ферромагнитными или парамагнитными свойствами.

Вторым свидетельством в пользу существования магнитного поля Галактики являются космические лучи — заряженные тяжелые элементарные частицы высоких энергий, влетающие со всех сторон в земную атмосферу. Именно то обстоятельство, что космические лучи приходят на Землю равномерно со всех направлений, заставляет думать, что в Галактике имеется магнитное поле. В противном случае космические лучи двигались бы в Галактике прямолинейно, как лучи света, и, как лучи света, они приходили бы только из определенных направлений — из тех, в которых находятся источники, их выбрасывающие. Но космические лучи приходят равномерно из всех направлений. Это можно объяснить тем, что движение заряженных частиц отклоняется от прямолинейного вследствие взаимодействия с магнитным полем Галактики. Возможно, как предположили советские астрофизики В. Л. Гинзбург и И. С. Шкловский, что мощные потоки заряженных тяжелых элементарных частиц высоких энергий образуются при вспышках сверхновых звезд. Если бы у Галактики не было магнитного поля, то эти движущиеся с огромными скоростями частицы пересекли бы Галактику и удалились во внегалактическое пространство. Мы не наблюдали бы космических лучей или наблюдали бы их, в связи со вспышкой сверхновой звезды, из определенного направления. Но магнитное поле Галактики является ловушкой для космических лучей, оно заставляет их сворачивать с прямого пути, двигаться по траекториям, витки которых находятся все время внутри нашей звездной системы. Поэтому заряженные тяжелые частицы не только не покидают Галак-

тику, но, по мере происходящих вспышек сверхновых звезд, постепенно накапливаются в ней.

Сейчас, после того как установлено, что в ядре NGC 3034 произошел взрыв, масштабы которого намного превосходят масштабы взрыва сверхновых звезд, можно предположить, что и в ядре нашей Галактики в прошлом произошел грандиозный взрыв, породивший, наряду с другими явлениями, мощный поток заряженных тяжелых элементарных частиц. Если бы у Галактики не было магнитного поля, эти частицы давно ушли бы во внегалактическое пространство. Но магнитное поле их удержало, они заполнили объем Галактики, движутся в нем по различным направлениям и некоторые из них, влетая в атмосферу Земли, вызывают в ней явления космических лучей.

Если в Галактике имеется магнитное поле, то согласно теории излучения в магнитном поле эмиссионная линия (21 см) нейтрального водорода должна обнаруживать тонкое расщепление. Недавно английский астроном Дэвис и его сотрудники сумели наблюдениями подтвердить это предсказание. Правда, степень расщепления линии указывает на напряженность магнитного поля Галактики около $5 \cdot 10^{-6}$ Гс, в то время как для ориентирования удлиненных пылинок и удержания космических лучей в Галактике требуется напряженность магнитного поля почти в десять раз бóльшая. Это обстоятельство вызывает необходимость пересмотреть соответствующие теории. Тем не менее в результате исследования Дэвиса существование магнитного поля Галактики, хотя и более слабого, чем ранее предполагали, доказано методом, который уже нельзя считать косвенным.

Согласно магнитной гипотезе в первоначальной газовой туманности образовалось магнитное поле, собравшее диффузную материю в два спиральных жгута вдоль магнитных силовых линий. Вследствие различной угловой скорости вращения Галактики на разных расстояниях от центра, магнитно-силовые трубки (жгуты) изогнулись и приняли спиральную форму. Здесь в областях повышенной плотности диффузной материи происходит интенсивное звездообразование, поэтому в области спиральных ветвей много не только газа и пыли, но и молодых звезд — горячих гигантов и сверхгигантов, придающих спиральным ветвям их яркий рисунок. Этим объясняется, почему молодые звезды, в том числе горячие гиганты

и сверхгиганты, расположены в спиральных ветвях. Магнитное поле способно удерживать разреженную диффузную материю, но не плотные тела — звезды. Поэтому после сформирования звезды постепенно выходят из спиральных ветвей и старые звезды уже с одинаковой вероятностью могут быть и в спиральных ветвях и вне их. Самые молодые звезды должны быть только в спиральных ветвях, а в пространстве между спиральными ветвями могут быть только старые звезды. Эти выводы соответствуют наблюдательным данным.

Наибольшие трудности магнитной гипотезы связаны с тем, что наблюдения пока приводят к противоречивым данным о направлении магнитных силовых линий в различных местах нашей звездной системы. Нельзя еще утверждать, что спиральные рукава действительно тянутся вдоль силовых линий магнитного поля Галактики.

Кроме того, различие периодов вращения разных областей Галактики велико и расчет показывает, что спиральные ветви должны были бы, закрутившись, опоясывать Галактику много раз, а не $\frac{1}{2} - 1\frac{1}{2}$ раза, как это обычно наблюдается. Еще одно возражение состоит в том, что наличие магнитного поля, связанного с диффузной (газовой и пылевой) материей, должно препятствовать ее конденсации, формированию из нее звезд.

В последнее время выдвинута новая гипотеза. Спиральные ветви — это движущиеся волны уплотнения в гравитационном поле плоской звездной системы. Как в море движется волна, а вода остается на месте, так и в Галактике, возможно, спиральные ветви лишь временно объединяют материю данного места, а затем смещаются и уплотняют материю другой области. Волна может захватить только звезды, имеющие малые индивидуальные скорости. Такими звездами являются горячие гиганты и сверхгиганты и другие объекты I типа населения. Звезды II типа населения имеют большие индивидуальные скорости; расчет показывает, что волны гравитационного поля не могут их удерживать. Этим объясняется в волновой гипотезе строение спиральных ветвей из объектов I типа населения.

Волновая гипотеза происхождения спиральных ветвей галактик, предложенная американскими астрономами Лином и Шу, в настоящее время подробно теоретически разработана и находит большое число сторонников.

Пятая гипотеза — взрывная. Она опирается на явления, свидетельствующие о большой физической активности ядер галактик, и связана с предположением о формировании звезд из сверхплотного вещества. Основные ее положения, высказанные В. А. Амбарцумяном, состоят в том, что спиральные ветви галактик формируются из вещества, выбрасываемого ядром галактики в результате взрывного процесса. Это вещество — сверхплотное и уже в области спиральных ветвей при продолжающемся процессе распада из него формируются звезды и попутно выделяется диффузная материя. Фактически вся материя ядра переходит в спиральные ветви.

Взрывная гипотеза мало разработана, так как физические свойства сверхплотного вещества неясны. Возможно, что встретятся трудности, связанные с необходимостью существования большого момента вращения у материи до ее выхода из ядра. Для того чтобы выброшенная материя и образованные ею спиральные ветви участвовали во вращении галактики так, как это показывают наблюдения, необходимо, чтобы сверхплотное ядро, из которого они были выброшены, вращалось исключительно быстро.

Шестая гипотеза — гипотеза взаимодействия, предложена американским исследователем галактик Цвикки. Она предполагает, что при сближении двух или нескольких (неспиральных) галактик в результате гравитационного (или, возможно, иного) взаимодействия у них образуются направленные в сторону соседей и в противоположную сторону длинные выступы материи. После того как встретившиеся галактики разойдутся, длинные выступы, отставая во вращении от основного тела (ядра), принимают форму спиралей. Недостаток этой гипотезы в том, что она не может объяснить различия типов звездного населения ядра и спиральных ветвей галактик.

Наконец, английские астрономы Голд и Бонди выдвинули предположение, что спиральные ветви галактик формируются из межгалактического газа, захватываемого галактиками при их движении в межгалактическом пространстве.

Столь большое число развиваемых в наши дни гипотез происхождения спиральных ветвей галактик показывает, что поставленная проблема далеко еще не разрешена. Предпочтение нужно отдать магнитной, волновой и взрывной гипотезам, учитывающим астрофизическую сторону проблемы.

Близко расположенные друг к другу на небе галактики иногда бывают связаны между собой полосой светящейся материи. На это явление впервые указал Цвикки, заметивший, что на каждой пластинке, снятой 48-дюймовым телескопом системы Шмидта, можно найти около дюжины пар или троек галактик, соединенных полосой материи. Часто эти светящиеся полосы являются продолжением спиральных ветвей. Цвет полос, как и у спиральных ветвей, голубоватый, и естественно предположить, что они тоже состоят из звезд горячих гигантов и сверхгигантов. Это предположение подтвердилось, когда удалось разложить на звезды светящуюся полосу, связанную с близкой галактикой NGC 5194 (см. рис. 66). Таким образом, обнаружилась связь — взаимодействие между расположенными близко друг к другу галактиками.

Подробное исследование явления взаимодействия у галактик выполнил Б. А. Воронцов-Вельяминов. Для этого был использован Паломарский атлас неба, о котором мы сначала скажем несколько слов.

В 1952 г. Вильсон при помощи 48-дюймового телескопа системы Шмидта обсерватории Маунт Паломар произвел фотографирование всего неба севернее склонения -33° . Звезды, расположенные южнее, этому телескопу недоступны. Охваченная фотографированием область составляет более $\frac{3}{4}$ всего неба. Каждый участок неба фотографировался дважды: один раз при помощи фильтра, пропускающего преимущественно красные лучи, и второй раз при помощи фильтра, лучше пропускающего голубые лучи. Это делалось для того чтобы, сравнивая яркость изображения какой-нибудь звезды, галактики или туманности на двух снимках, сделанных при помощи разных фильтров, можно было судить о цвете объекта.

Всего понадобилось снять $935 \times 2 = 1870$ пластинок, которые перекрыли всю намеченную область неба. Применялись достаточно длительные экспозиции, в результате чего на снимках, снятых в голубых лучах, получились изображения всех объектов до 21-й видимой величины, а на снимках, снятых в красных лучах, до 20^m. С фотографических пластинок были произведены репродукции на листы бумаги размером 36×44 см и таким образом составлен атлас неба. В настоящее время многие астрономические учреждения имеют Паломарский атлас неба.

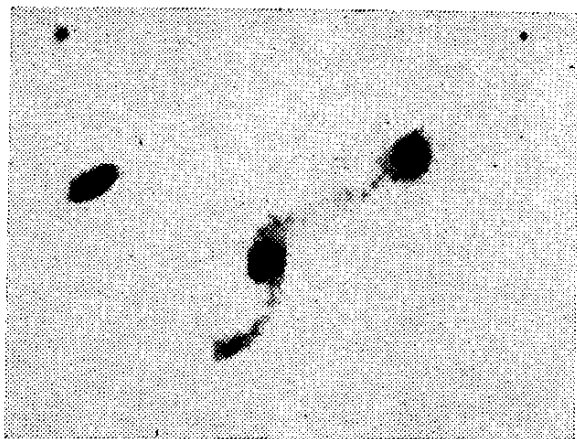


Рис. 82. Взаимодействующая пара галактик VV 13.

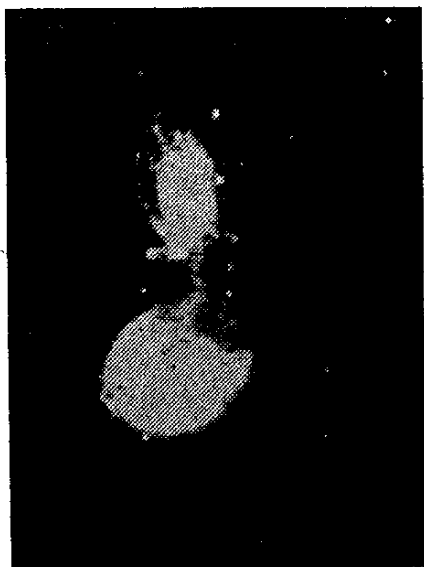


Рис. 83. Взаимодействующая пара галактик VV 21.



Рис. 84. Взаимодействующая пара галактик VV 33.



Рис. 85. Взаимодействующая пара галактик VV 34.



Рис. 86. Тесная группа взаимодействующих галактик VV 115.



Рис. 87. Тесная группа взаимодействующих галактик VV 116.

(Он как бы доставляет звездное небо к столу исследователя, причем воспроизводит небо с большими подробностями вплоть до очень слабых объектов (20-й — 21-й звездной величины), доступных лишь большим телескопам крупных обсерваторий. Конечно, Паломарский атлас не может полностью заменить неба. При его помощи нельзя получить, например, важнейшую характеристику светила — спектр его излучения. Но если требуется исследовать внешний вид многочисленного класса объектов и организовать поиски таких объектов, то использование атласа приводит к большему успеху, чем непосредственное применение телескопа.

Это доказал Б. А. Воронцов-Вельяминов. Он тщательно исследовал Паломарский атлас, выделил галактики, обнаруживающие взаимодействие, переснял с многократным увеличением изображения этих галактик и составил каталог и альбом взаимодействующих галактик. Всего в каталоге и альбоме приводится 355 случаев взаимодействий между галактиками.

Как правило, пары и группы галактик, участвующих во взаимодействии, очень далеки от нас, слабы и не учтены в каталоге NGC. Объекты из каталога Б. А. Воронцова-Вельяминова обозначаются первыми буквами его фамилии в латинской транскрипции с порядковым номером объекта по каталогу. Например, пара галактик на рис. 82 называется VV 13.

Большинство снимков дано в негативе, как и в Паломарском атласе. Для того чтобы правильно их понимать, необходимо отличать от галактик близкие звезды нашей Галактики, наблюдаемые в том же направлении, в каком видны далекие галактики. Звезды всегда видны как четкие круги. Если же объект имеет хотя бы слегка размытые очертания или у него эллиптическая или какая-ни-



Рис. 88. Тесная группа взаимодействующих галактик VV 117.

будь иная, отличная от круговой форма, то это галактика. На рис. 82—85 мы приводим фотографии из альбома Б. А. Воронцова-Вельяминова, когда взаимодействие двух галактик вызвало появление перемычки. Это пары VV 13, VV 21, VV 33 и VV 34. У VV 13, кроме перемычки, связывающей две галактики, наблюдается полоса, выступающая из одной галактики в противоположную сторону. Такие тонкие выступы, часто возникающие при взаимодействии галактик, стали называть хвостами. Хвосты наблюдаются и в случаях взаимодействия VV 33 и VV 34. Но здесь они короче перемычки, которая длинна и очень тонка. На рис. 83 (он и рис. 85, в отличие от других, позитивные) у VV 21 хвосты отсутствуют, но перемычка двойная. Вдоль одной из полос тянутся три крупных сгустка материи.

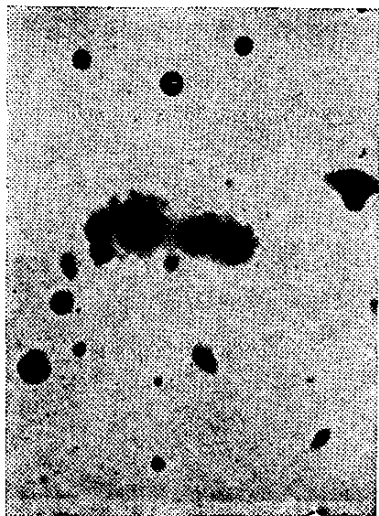


Рис. 89. Цепочка взаимодействующих галактик VV 161.

Явление перемычек и хвостов у близких друг к другу галактик получило в астрономической литературе ряд толкований. Цвикки считает, что это явление вызвано приливными силами тяготения при сближении двух или более галактик. Исследование большого числа взаимодействий привело Б. А. Воронцова-Вельями-

нова к выводу, что при сближении галактик основную роль играют не силы тяготения, а какие-то другие силы, убывающие при взаимном удалении галактик быстрее, чем силы тяготения.

В. А. Амбарцумян считает, что наблюдаемые взаимодействия являются следствием не сближения галактик, а результатом противоположного процесса — разделения одной галактики на две или несколько галактик. Разделение галактик есть бурный процесс взрывного характера, а перемычки — это последние связи, еще оставшиеся между разьединившимися галактиками.

На рис. 86—88 показаны тесные группы галактик VV 115, VV 116 и VV 117. Такого рода группы названы Б. А. Воронцовым-Вельяминовым гнездами галактик.

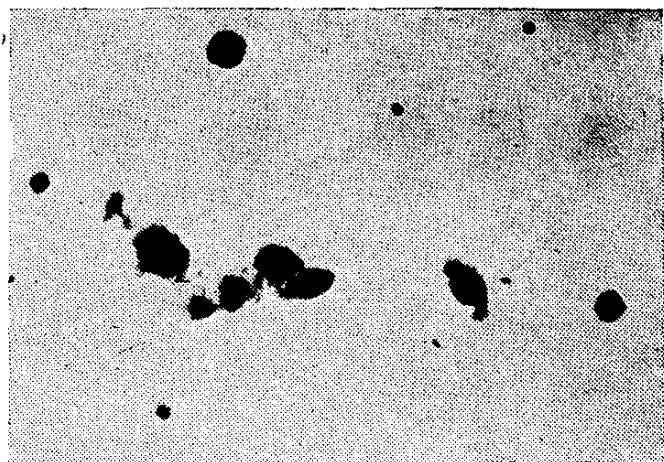


Рис. 90. Цепочка взаимодействующих галактик VV 165.

В гнездах галактики расположены настолько близко друг к другу, что фактически, тесно соприкасаются между собой. Между ними наблюдаются сильные взаимодействия, особенно ярко проявляющиеся в VV 117. Тесную группу VV 116, состоящую из пяти галактик, теперь называют квинтетом Воронцова-Вельяминова.

Нужно сказать, что такое тесное соседство нескольких галактик, какое наблюдается в VV 115, VV 116 и VV 117, невозможно рассматривать как результат случайного сближения. Слишком мала вероятность такого события, чтобы реально наблюдаться, да еще в большом числе случаев (их в альбоме 47). Несомненно, здесь мы встречаемся либо с делением одной галактики на несколько галактик, как предполагает В. А. Амбарцумян, либо наблюдаем формирование нескольких галактик, образующихся совместно.

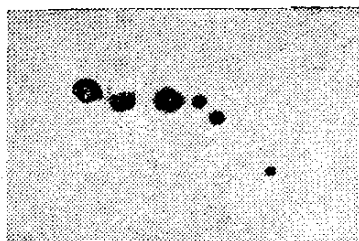


Рис. 91. Цепочка взаимодействующих галактик VV 172.



Рис. 92. Контакт галактик, сопровождающийся сильными возмущениями, VV 224.

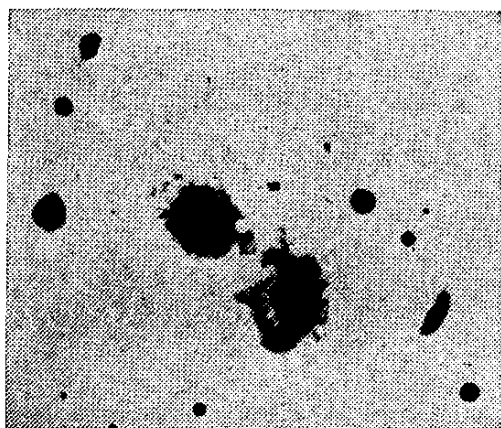


Рис. 93. Контакт галактик, сопровождающийся сильными возмущениями, VV 226.

В некоторых случаях, например, у VV 161, VV 165, VV 172 (рис. 89—91), гнезда галактик сильно вытянуты и правильнее их называть цепочками. В альбоме таких случаев 15. Опять-таки случаев слишком много, чтобы можно было допустить случайное расположение галактик в цепочку. С другой стороны, цепочка тел, управляемых силами тяготения, не может долго удерживаться в таком виде. Поэтому остается предположить, что либо мы присутствуем при разделении одной галактики на

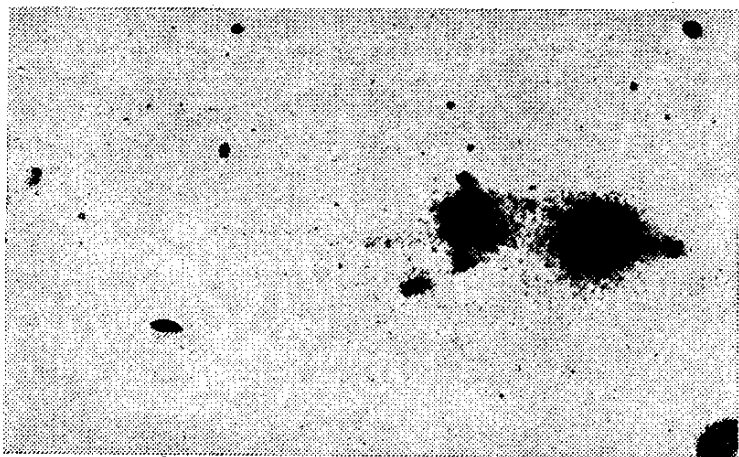


Рис. 94. Контакт галактик, сопровождающийся сильными возмущениями, VV 237.

несколько, причем движение разделяющихся галактик происходит преимущественно в одном направлении, либо мы наблюдаем момент, наступивший после того как несколько галактик сформировалось из какого-то вытянутого образования.

Приведем еще пример трех взаимодействий: VV 224, VV 226 и VV 237 (рис. 92—94), названных Б. А. Воронцовым-Вельяминовым контактами с сильными возмущениями. Все это — не имеющие себе равных в природе грандиозные катаклизмы, запечатленные у нас на маленьком листке бумаги.

МЕТАГАЛАКТИКА

Представление о Метагалактике

Понятие «Метагалактика» не является вполне ясным. Оно сформировалось на основании аналогии со звездами. Наблюдения показывают, что галактики, подобно звездам, группирующимся в рассеянные и шаровые скопления, также объединяются в группы и скопления различной численности.

Однако для звезд известны объединения более высокого порядка — звездные системы (галактики), характерные большей автономностью, т. е. независимостью от влияния других тел, и большей замкнутостью, чем у звездных скоплений. В частности, все звезды, которые могут наблюдаться простым глазом и в телескопы (за исключением самых мощных телескопов), образуют звездную систему — нашу Галактику, насчитывающую около 100 миллиардов членов. В случае галактик аналогичные системы более высокого порядка непосредственно не наблюдаются. Тем не менее имеются некоторые основания предполагать, что такая система, Метагалактика, существует, что она относительно автономна и является объединением галактик примерно такого порядка, каким для звезд нашей системы является Галактика. Следует предположить существование и других метагалактик.

Реальность Метагалактики будет доказана, если удастся как-то определить ее границы и выделить наблюдаемые объекты, не принадлежащие ей.

В связи с гипотетичностью представлений о Метагалактике как об автономной гигантской системе галактик, включающей все наблюдаемые галактики и их скопления, термин «Метагалактика» стал чаще применяться для обозначения обозреваемой (при помощи всех существующих средств наблюдения) части Вселенной.

Распределение галактик на небе

Распределение звезд на небе стал впервые изучать В. Гершель в конце 18 в. Результатом было фундаментальное открытие — явление концентрации звезд к галактической плоскости.

Приблизительно через полтора столетия наступило время изучить распределение по небу галактик. Сделал это Хабл.

Галактики по блеску в среднем значительно уступают звездам. Звезд до 6-й видимой звездной величины на всем небе несколько тысяч, а галактик до 6^m — только четыре. Звезд до 13^m около трех миллионов, а галактик около семисот. Только тогда, когда рассматриваются очень слабые объекты, число галактик становится большим и начинает приближаться к числу звезд той же величины.

Следовательно, чтобы иметь достаточное количество подсчитываемых галактик, нужно использовать большие инструменты, способные уловить блеск слабых объектов. Но при этом возникает дополнительная трудность, связанная с тем, что слабые галактики и слабые звезды не так заметно отличаются друг от друга, как яркие звезды от ярких галактик. Слабые галактики имеют очень маленькие видимые размеры и их легко при подсчетах принять за звезды. Нужна осторожность и специальные меры, чтобы не подсчитывать вместо галактик звезды и не пропускать галактик, принимая их за звезды.

Хабл использовал 2,5-метровый телескоп обсерватории Маунт Вилсон в Калифорнии, вступивший в 20-е годы 20 в. в строй, и выполнил подсчеты галактик до 20-й видимой звездной величины в 1283 маленьких площадках, распределенных по всему небу. Результат оказался на первый взгляд неожиданным. В то время как число звезд, приходящихся на единицу поверхности неба, возрастает при приближении к галактическому экватору (Млечному Пути), галактики показали противоположную закономерность. Их число в площадках Хаббла оказывалось тем меньше, чем ближе была расположена площадка к Млечному Пути. Около самого галактического экватора в полосе толщиной в 20° галактики, за отдельными исключениями, вовсе не паблюдаются. Можно сказать, что плоскость Галактики является для галактик плоскостью деконцентрации, а зона у галактического экватора зоной избегания.

Совершенно очевидно, что другие звездные системы, а их миллионы, не могут располагаться в пространстве по закону, диктуемому определенной ориентировкой плоскости симметрии нашей Галактики, которая сама является только одной из этого множества звездных систем. Хаблу было ясно, что в данном случае наблюдается не истинное распределение галактик в пространстве, а распределение, искаженное некоторыми условиями видимости.

В 1930 г., за четыре года до выполнения Хаблом подсчетов галактик, было окончательно установлено существование поглощения света в межзвездном пространстве. Выяснилось также, что темная материя, вызывающая поглощение, сосредоточена в виде сравнительно тонкого слоя около плоскости Галактики. Поэтому Хаблу было нетрудно объяснить причину видимого избегания галактиками зоны около галактического экватора. Она состоит в том, что свет галактик, находящихся в направлении галактического экватора, не в состоянии пробиться сквозь толщу пылевого слоя, расположенного близ плоскости симметрии нашей звездной системы. Эти галактики становятся для нас невидимыми. Правда, в некоторых отдельных местах зоны избегания все-таки наблюдается несколько галактик. Это объясняется тем, что пылевая материя не образует непрерывного сплошного слоя, а собрана в отдельные облака и клочья, расположенные около плоскости Галактики. Кое-где, вследствие случайностей группировки облаков, между ними образовались просветы, в которые и проглядывает несколько галактик. Но подавляющая масса галактик, находящихся в этих направлениях, нам не видна.

Доля галактик, заслоненных от нас пылевым слоем межзвездной материи, значительна. Можно быть уверенным в том, что среди них есть близкие, красивые, обладающие интересными особенностями галактики. Все это научное богатство находится пока за замками, вскрывать которые нелегко. Однако первые достижения уже имеются. В 1968 г. итальянский астроном Маффей, выполнив наблюдения в инфракрасных лучах, открыл две близкие гигантские эллиптические галактики, лежащие на галактической широте $-0^{\circ},5$, т. е. почти точно в галактической плоскости. После этого их удалось обнаружить и в оптических лучах как очень слабые едва различимые объекты. Оказалось, что поглощающая свет материя Га-

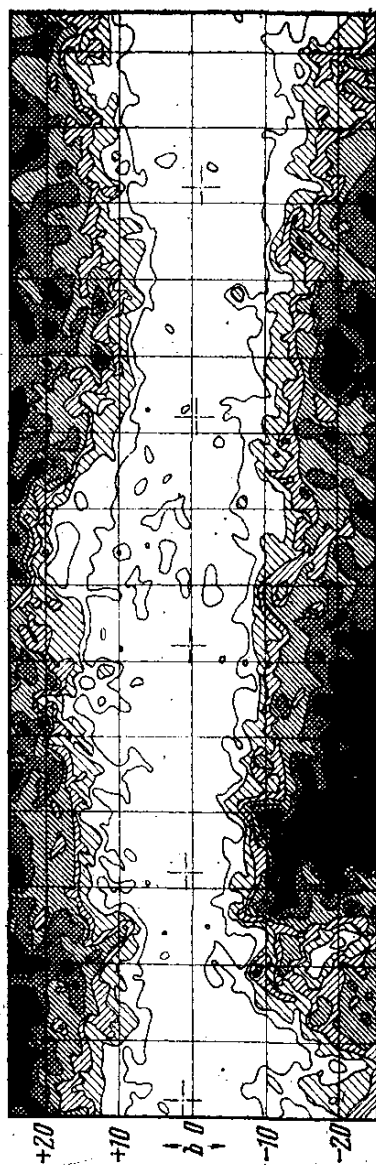


Рис. 95. Часть карты зоны избегания галактик.

лактики ослабляет блеск Maffei I и Maffei II (так в честь открывателя названы эти галактики) на 5 звездных величин, т. е. в 100 раз. Если бы не поглощение света, то видимая величина Maffei I была бы равна $5^m,8$, ее блеск уступал бы только Магеллановым Облакам и NGC 224 и ее можно было бы наблюдать в театральные бинокль. При наблюдении в инфракрасных лучах это действительно одна из ярчайших галактик, так как инфракрасное излучение пылевой материей почти не поглощается. Абсолютная звездная величина Maffei I равна

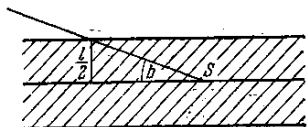


Рис. 96. Длина пути, проходимого светом в толще пылевой материи Галактики.

$-20^m,5$, т. е. это даже сверхгигантская галактика. Расстояние до нее достаточно точно пока определить не удастся, оно оценено в 1,2 Мпс с возможной ошибкой в 0,4 Мпс. Поэтому нельзя еще сказать, входит ли она в состав Местной группы галактик. В Местной группе для полноты коллекции как раз недостает сверхгигантской и гигантской эллиптических галактик.

Недавно Стейнлейн, используя подсчеты галактик до 18-й видимой звездной величины вдоль всей области близ галактического экватора (Хабл производил подсчеты только в отдельных площадках), построил наглядную карту зоны избегания, часть которой мы воспроизводим на рис. 95. В местах самой темной штриховки число галактик на квадратный градус неба больше тридцати, по мере ослабления штриховки число галактик уменьшается и доходит до нуля. Мы видим, что в полосе от -10 до $+10^\circ$ галактической широты галактик практически нет, далее, по мере удаления от галактического экватора, галактик становится все больше. Неровности распределения вызваны главным образом случайностями в распределении облаков темной материи и отчасти случайностями в распределении самих галактик.

Чем больший угол составляет направление на галактику с главной плоскостью нашей звездной системы, тем меньший слой пылевой материи должен проходить луч света. Поэтому по мере удаления от галактического экватора число галактик быстро возрастает.

Если предположить, что пылевые облака равномерно заполняют около плоскости галактики тонкий слой тол-

шины l , то из рис. 96 следует, что путь, проходимый излучением галактики внутри пылевого слоя, равен $\frac{l}{2 \sin b}$, где b — галактическая широта галактики, т. е. угол между направлением на галактику и главной плоскостью нашей звездной системы. Как показал Хабл, из этого следует, что число галактик до данной видимой величины в одном квадратном градусе неба должно равняться

$$N = N_0 \cdot 10^{-\frac{3\beta}{5 \sin b}}. \quad (14)$$

Здесь β показывает, насколько возрастает видимая звездная величина (ослабляется блеск) галактик из-за поглощения света при наблюдении в направлении, перпендикулярном к плоскости симметрии нашей звездной системы. В этом направлении поглощение света, очевидно, должно быть наименьшим. N_0 означает число галактик до той же видимой величины на один квадратный градус неба, которое наблюдалось бы, если бы в нашей звездной системе полностью отсутствовало поглощение света. Предполагается, что в этом случае во всех направлениях число галактик на один квадратный градус было бы одним и тем же.

Оказалось, что подсчеты галактик для различных галактических широт хорошо удовлетворяют закону (14). При $b = 0$, т. е. у галактического экватора, показатель степени в правой части равенства (14) равен минус бесконечности и, следовательно, все выражение обращается в нуль, галактик не должно наблюдаться вовсе, что и имеет место в действительности. По мере увеличения b правая часть (14) растет и характер роста соответствует данным подсчетов. Таким образом, подсчеты галактик убедительно подтверждают, что поглощающая свет материя расположена сравнительно тонким слоем около плоскости симметрии нашей звездной системы.

В равенствах (14) подсчеты для каждой галактической широты b дают значения N . Поэтому можно написать ряд равенств, в которых неизвестными величинами будут только N_0 и β . Решение этих равенств привело Хабла к следующим результатам: среднее число галактик до 20-й видимой звездной величины на один квадратный градус неба, которое наблюдалось бы при полном отсутствии поглощения света, равно 131, а увеличение вследствие поглощения видимой звездной величины галактик,

наблюдаемых в направлении, перпендикулярном к плоскости симметрии нашей звездной системы, равно $0^m,25$. Все объекты, находящиеся вне нашей звездной системы, ослабевают из-за поглощения света на четверть звездной величины, если они находятся в направлении полюса Галактики, и ослабевают еще больше, если они лежат в других направлениях, причем ослабевают тем сильнее, чем меньше их галактическая широта.

Общий характер распределения галактик в пространстве

Хабл производил также подсчеты до различных звездных величин, т. е. определял число галактик до m -й звездной величины в одном квадратном градусе неба для различных значений m .

Можно доказать следующую теорему: если галактики в среднем равномерно распределены во Вселенной и в пространстве между галактиками поглощение света отсутствует, то число галактик до m -й видимой звездной величины $N(m)$ пропорционально $10^{0,6m}$.

Для доказательства теоремы известное нам равенство

$$M = m - 5 \lg r + 5 \quad (15)$$

перепишем в таком виде:

$$r = 10^{1-0,2M} \cdot 10^{0,2m}. \quad (16)$$

Равенство (16) определяет, на каком расстоянии находятся галактики с видимой звездной величиной m , если их абсолютная звездная величина равна M .

Теперь предположим, что все галактики имеют одинаковую абсолютную звездную величину. Тогда галактиками до данной видимой звездной величины m будут все галактики, расположенные внутри сферы с радиусом, определяемым равенством (16). Число таких галактик, поскольку они равномерно заполняют пространство, должно быть пропорционально объему сферы, следовательно, пропорционально кубу радиуса сферы:

$$N(m) \sim r^3.$$

Если же мы вместо радиуса сферы подставим его выражение (16), то получим, что

$$N(m) \sim 10^{0,6m}, \quad (17)$$

так как множитель $10^{3-0,6M}$ постоянен.

Таким образом, для галактик одинаковой абсолютной звездной величины закон справедлив. Но если число галактик до данной видимой звездной величины пропорционально $10^{0,6m}$ для каждой абсолютной звездной величины, то очевидно, что оно будет пропорционально этому множителю и для совокупности галактик всех абсолютных звездных величин. Теорема доказана.

Условие прозрачности межгалактического пространства применялось, когда использовалось равенство (15). При наличии поглощения света в межгалактическом пространстве в равенстве (15) должны фигурировать не наблюдаемые видимые звездные величины, а те, которые наблюдались бы при отсутствии поглощения.

Существование поглощения света внутри Галактики на справедливость теоремы не влияет. Важно, чтобы не было поглощения света в пространстве между подсчитываемыми галактиками.

Приведенная теорема была доказана Зеелигером свыше ста лет назад и носит его имя. Из равенств (17) следует равенство

$$\frac{N(m+1)}{N(m)} = 10^{0,6} \approx 3,98 \approx 4, \quad (18)$$

т. е. число галактик до $(m+1)$ -й видимой звездной величины должно приблизительно в четыре раза превосходить число галактик до m -й звездной величины. Подсчеты Хаббла показали, что для всех направлений с достаточной точностью выполняется закон (18). Следует ли на основании этого утверждать, что галактики распределены в пространстве равномерно и в этом пространстве отсутствует поглощение света? Строго говоря, обратная теорема Зеелигера неверна. Если в межгалактическом пространстве имеется поглощающая свет материя, то, как бы она ни была распределена, можно подобрать такой закон изменения (возрастания) плотности числа галактик по мере удаления от наблюдателя, что закон (18) будет выполняться. Поглощение света и изменение плотности числа галактик компенсируют друг друга. Но физически это означало бы, что наша Галактика занимает особое, центральное место во Вселенной, т. е. что по мере удаления от занимаемого ею места галактики встречаются все чаще и чаще.

История астрономии убедительно учит нас тому, что если какое-нибудь предположение приводит к антропоцентризму — к утверждению, что место, которое занимает

человек, является особым, исключительным местом во Вселенной, — то можно не сомневаться, что предположение это ошибочно. Так и здесь можно математически подобрать условия, при которых будет выполняться закон (18) и в то же время распределение галактик в пространстве не будет равномерным, а межгалактическое пространство непрозрачным. Но физически эти предположения приводят к антропоцентризму и должны быть отвергнуты. Лишь в единственном случае выполнение закона (18) не влечет за собой антропоцентризма — в том случае, если межгалактическое пространство прозрачно, а галактики распределены в нем равномерно.

Но теперь необходимо сделать две оговорки. Прозрачность нужно понимать не в абсолютном смысле. Конечно, и в пространстве между галактиками есть материя. Но она настолько разрежена, что практически не ослабляет блёска подсчитываемых галактик. Для этого необходимо, чтобы плотность пыли не превосходила 10^{-31} — 10^{-32} г/см³, т. е. была по крайней мере в миллион раз менее плотной, чем межзвездная пыль около главной плоскости нашей звездной системы.

Вторая оговорка состоит в том, что понятие «равномерное распределение галактик в пространстве» также не следует понимать абсолютно. Для того чтобы могло выполняться условие (18), нет необходимости, чтобы галактики располагались строго равномерно, как солдаты в строю. Они могут образовывать группы и скопления, и в таком случае достаточно, чтобы сами группы и скопления галактик были малы в сравнении с обозреваемой областью пространства и располагались в ней равномерно. Но даже и эта последняя равномерность не обязательно должна быть строгой: вполне допустимы случайные отклонения от равномерности.

Важно, чтобы не было систематического уменьшения или систематического увеличения плотности числа галактик на большом протяжении в каком-нибудь направлении. Если это условие выполняется, то отклонения результатов подсчетов от закона (18) очень малы и носят случайный характер. В таком случае результаты подсчетов будут немного отклоняться то в одну, то в другую сторону от предсказываемых законом значений. Это как раз и имеет место в действительности.

Итак, на основании подсчетов по всем направлениям числа галактик до различной видимой звездной величины

установлено, что хорошо выполняется закон

$$\frac{N(m+1)}{N(m)} \approx 3,98;$$

отклонения от него незначительны и носят случайный характер. Из этого следует, что межгалактическое пространство прозрачно и что в обозреваемой области Вселенной нет существенного систематического изменения плотности числа галактик в каком-нибудь направлении. Галактики (или их группы и скопления) распределены во всем пространстве, охватываемом подсчетами, более или менее равномерно.

Коллекционирование галактик

Всех галактик до 20-й видимой звездной величины несколько миллионов. При помощи 6-метрового телескопа можно получать изображения еще более слабых галактик — до 23-й видимой звездной величины. Число их должно составлять многие десятки миллионов. Это огромный материал, требующий тщательного изучения. А для его изучения нужно уметь производить отбор, составлять коллекции.

Коллекции исследователей галактик, конечно, отличаются от коллекций естествоиспытателей, которые непосредственно помещают собранные образцы у себя в кабинете или в музее. Коллекционировать галактики можно, только составляя каталоги их описаний или альбомы их изображений. Для этого требуется значительный кропотливый труд. За пятьдесят лет существования внегалактической астрономии проделана огромная работа по составлению каталогов галактик, и мы кратко познакомим с ней читателя.

В 1932 г. Шепли и Эймс опубликовали каталог ярчайших галактик. Он содержит все галактики ярче тринадцатой видимой звездной величины и часть галактик несколько более слабых. Всего в каталоге оказалось 1249 галактик. Для каждой из них приведены координаты, определяющие ее положение на небе, видимая звездная величина, угловые размеры, тип.

В 1953 г. вышел в свет каталог показателей цвета 509 галактик, составленный М. А. Вашакидзе на Абастуманской обсерватории.

В 1958 г. Эйбл издал каталог скоплений галактик, насчитывающий 1712 скопления. Для каждого скопления даны координаты, указано богатство членами и приведена видимая звездная величина 10-го по яркости члена.

В 1968 г. завершилось издание шеститомного каталога ярких галактик и скоплений галактик, составленного Цвикки, Херцогом и Уайльдом. Каталог содержит все галактики севернее склонения -3° до $15^m,5$. Общее число галактик в нем 1350, а скоплений галактик 9730.

В 1964 г. Жерар и Антуанетта Вокулеры издали справочный каталог ярких галактик. Это каталог всех галактик приблизительно до 14,0 видимой звездной величины; он содержит подробные данные о 2599 объектах и является фактически значительным расширением, пополнением и исправлением уже устаревшего каталога Шепли и Эймса.

Большой каталог, дающий основные характеристики и описание внешних черт галактик (Морфологический Каталог галактик) построили Б. А. Воронцов-Вельяминов и В. П. Архипова. Это четырехтомное издание содержит более 30 тысяч галактик ярче $15^m,1$ и много слабых.

Последним Общим каталогом галактик, изданным в 1973 г. обсерваторией Упсала, является каталог П. Нильсона, содержащий все галактики, наблюдаемый диаметр которых превосходит одну минуту дуги.

Здесь уместно еще раз подчеркнуть большое значение Паломарского Атласа Неба, о котором мы писали выше. Пять последних из перечисленных каталогов были составлены путем изучения этого атласа, а не при помощи собственных наблюдений авторов.

Кроме того, Хабл в 1932 г., Шепли и его сотрудники в сороковых годах, а Шейн и Виртанен в пятидесятых годах этого столетия выполнили обширные подсчеты галактик до данной звездной величины в различных областях неба. В частности, подсчеты Шейна и Виртанена галактик до 18-й видимой звездной величины покрывают все северное небо. Общее число охваченных в этих подсчетах галактик исчисляется сотнями тысяч.

Группы галактик и скопления галактик

Галактики, как и звезды, имеют склонность образовывать группы и скопления различной численности. Это свойство у них к тому же выражено намного сильнее,

чем у звезд. У звезд лишь сравнительно малая доля входит в состав рассеянных скоплений, шаровых скоплений или звездных ассоциаций, а подавляющая масса является просто звездами общего поля Галактики. У галактик картина противоположная. Большинство из них является членами групп или скоплений галактик, и только незначительная часть располагается вне групп и скоплений в общем поле Метагалактики.

Местная система галактик, насчитывающая вместе с нашей Галактикой 17 членов, является примером очень распространенного типа образований — групп галактик. Как показывает рис. 57, диаметр Местной системы приблизительно равен 0,6 Мпс. Можно подсчитать, что средняя плотность числа галактик в Местной системе составляет около 160 галактик на 1 куб. мегапарсек.

Средняя плотность в Метагалактике составляет около 0,05 галактики на 1 куб. мегапарсек. Значит, в Местной системе плотность более чем в 3000 раз выше средней общей плотности.

Группы галактик численностью от десятка до нескольких десятков членов, по-видимому, очень распространены в Метагалактике. Но на больших расстояниях они плохо различимы, так как карликовые галактики уже не видны, а гигантских галактик в группе обычно всего несколько.

На рис. 97 показаны четыре галактики, входящие в состав одной группы. В центре спираль NGC 3031, в верхней части рисунка неправильная галактика NGC 3034, слева — NGC 3077 и в нижнем правом углу — NGC 2976. В эту группу входят и более слабые галактики, не обнаруживаемые на данном снимке.

Более крупными образованиями являются скопления галактик, насчитывающие сотни, тысячи, а в некоторых случаях и десятки тысяч членов. Как показывает фотография центральной части скопления в Персее (рис. 98), скопления галактик являются местами значительного уплотнения материи в пространстве.

Скопления галактик разделяются на два типа — правильные и неправильные.

Правильные скопления имеют сферическую форму. Галактики в них обнаруживают сильную концентрацию к одной точке — центру скопления. Плотность сосредоточения галактик в правильных скоплениях высокая, особенно в центральных областях.

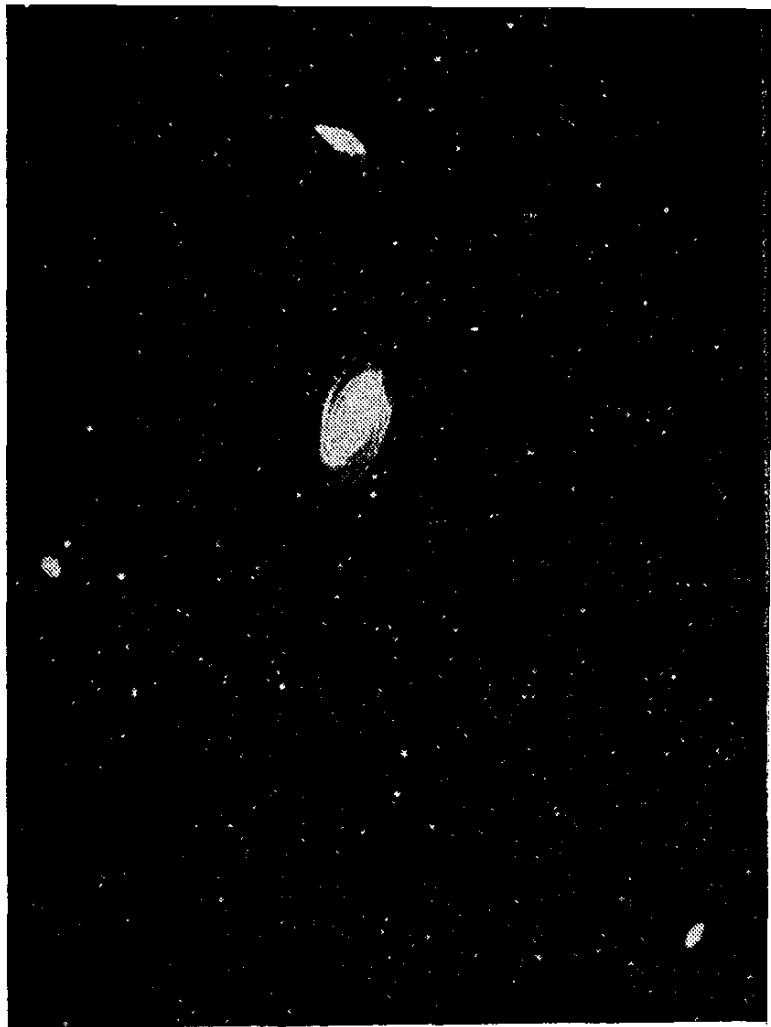


Рис. 97. Группа галактик, включающая NGC 3031.

Таковы общие черты правильных скоплений. Но велики и несходства. Они проявляются главным образом в различной общей численности и различной средней плотности скоплений. Это подтверждается данными табл. 18.

Скопление галактик в Волосах Вероники выделяется богатством членов, а скопление в Пегасе очень высокой

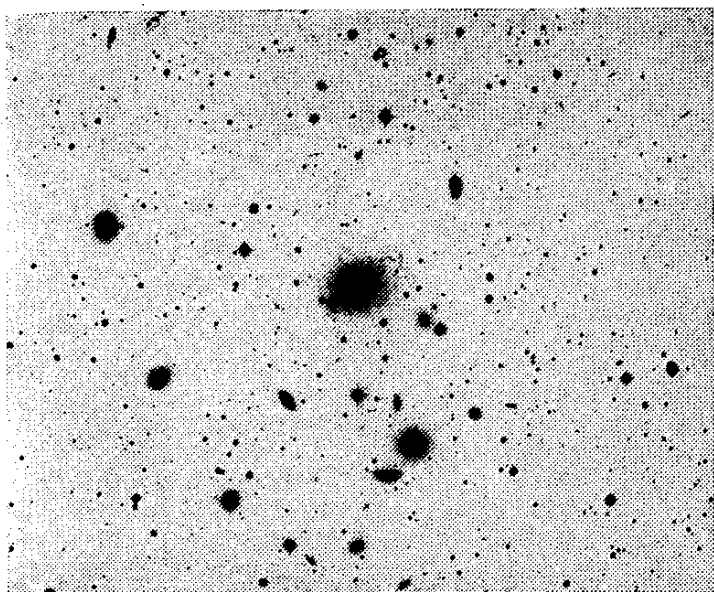


Рис. 98. Центральная часть скопления галактик в Персее.

средней плотностью. В центральной части скопления в Пегасе плотность доходит до 2000 галактик на 1 куб. мегапарсек; здесь галактики почти касаются друг друга и плотность их сосредоточения в 40 000 раз выше, чем средняя плотность в Метагалактике. Очень плотным является также правильное скопление галактик в Северной Короне (рис. 99).

Неправильные скопления галактик намного менее плотны, чем правильные, у них нет ясной формы, а концентрация галактик в некоторой точке хотя и наблюдается, но выражена слабо. Эти скопления часто весьма обширны по размерам.

На рис. 100 показана центральная область неправильного скопления галактик в Геркулесе. Здесь мы видим много спиральных галактик.

Т а б л и ц а 18. Основные характеристики
трех правильных скоплений галактик

Характеристика	Скопление в Волосах Ве- роники	Скопление в Раке	Скопление в Пегасе
Расстояние в мегапарсеках	85	55	45
Диаметр в мегапарсеках	17	6	1,5
Число галактик до видимой звезд- ной величины 19,0	11 000	300	370
Средняя плотность в галактиках на 1 куб. мегапарсек	4	3	250

Примечательной особенностью распределения галактик в метагалактическом пространстве является группирование их по типам. Они как бы повторяют особенности расположения звезд, образующих два типа населения. Различные расы галактик селятся в разных местах. Спиральные галактики избегают правильных скоплений галактик. Здесь доминируют эллиптические галактики и галактики типа S0. В неправильных же скоплениях галактик спирали составляют большинство. Там много и галактик I I. Что касается эллиптических галактик, то в неправильных скоплениях они в большинстве случаев гигантские с большим сжатием. В метагалактическом же пространстве вне скоплений обычно встречаются эллиптические галактики умеренной светимости и с малым сжатием, почти сферические. Здесь много спиралей и галактик I I, но тип S0 встречается очень редко.

Эллиптические галактики сильнее, чем спиральные или неправильные, сосредоточены в скоплениях. Об этом можно судить по результатам ван ден Берга, который, проверив на принадлежность к скоплению каждую из галактик каталога Шепли и Эймс, пришел к выводу, что из 207 эллиптических галактик 157, т. е. 76%, входит в состав скоплений, в то время как из 676 спиральных и неправильных галактик только 355 (52%) являются членами скоплений. Надо думать, что процент галактик, входящих в скопления, выше, чем здесь указано. Во многих случаях, благодаря проектированию их друг на друга, недостаточно плотные скопления выявляются плохо.

Сравнительно легко выделять на небе те скопления галактик, которые компактны, т. е. имеют высокую плотность. Легче, разумеется, выделять и относительно близкие скопления. Далекие скопления проектируются друг

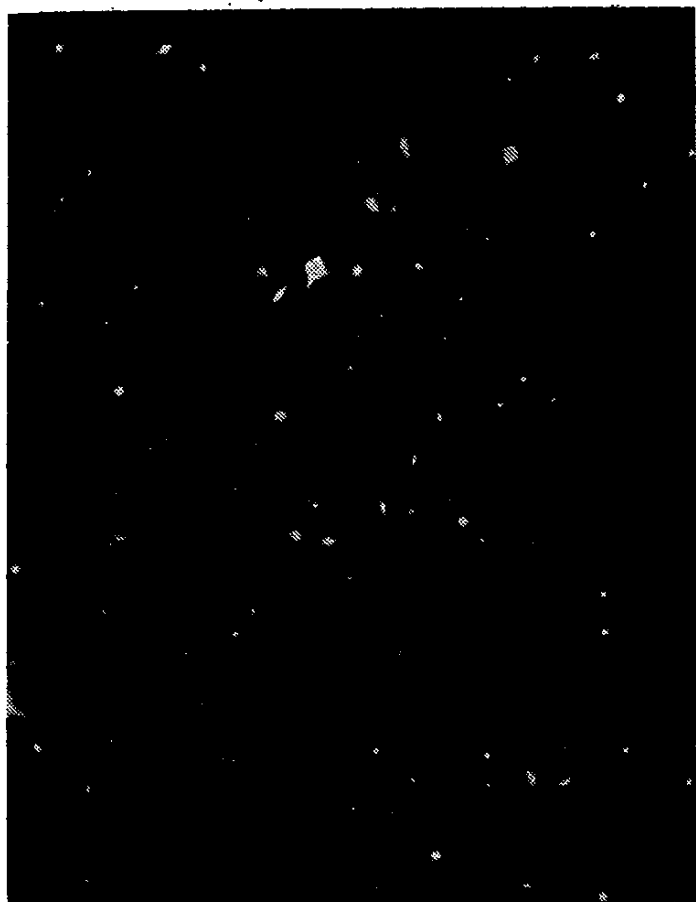


Рис. 99. Центральная часть правильного скопления галактик в Северной Короне.

на друга и на галактики метagalактического поля, вследствие чего картина приобретает запутанный характер и выделение скоплений становится затруднительным. Особенно плохо выделяются скопления с низкой плотно-

стью. Эти утверждения хорошо иллюстрируются табл. 19, составленной Цвикки, который разбил все скопления по их плотности на три группы: плотные, умеренно плотные и рассеянные.

По числу скоплений каждой группы на расстоянии до 30 Мпс можно заключить, что вообще в пространстве

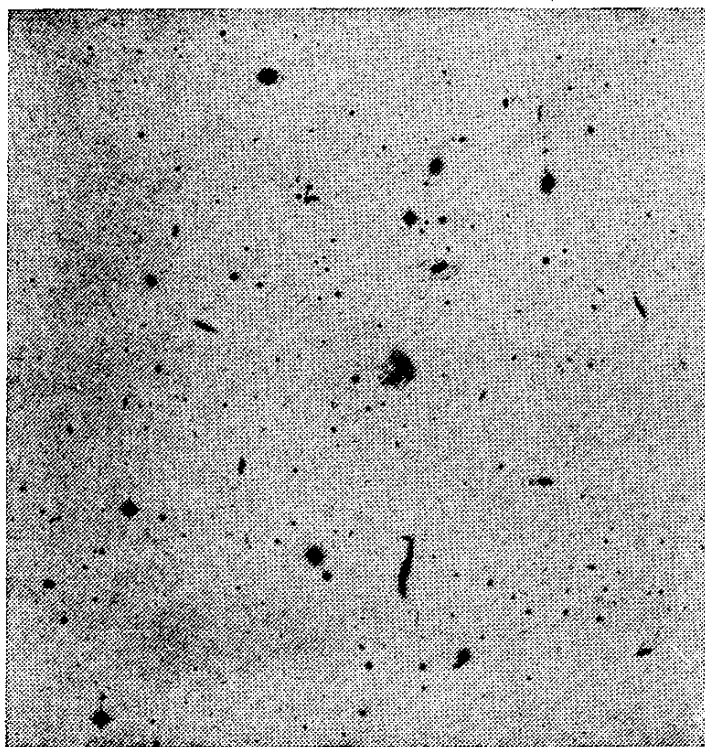


Рис. 100. Центральная часть неправильного скопления галактик в Геркулесе.

чаще встречаются умеренно плотные и рассеянные скопления, нежели плотные. Однако по мере перехода к большим расстояниям доля выявляемых умеренно плотных и в особенности рассеянных скоплений галактик быстро уменьшается; несмотря на рост размеров новых объемов, включаемых в рассмотрение, число таких скоплений возрастает медленно, а затем даже начинает убывать. Среди

ближайших скоплений больше всего рассеянных, затем умеренно плотных и менее всего компактных. Среди наиболее удаленных скоплений группы по численностям следуют в обратном порядке.

За последние годы были подготовлены и изданы два каталога скоплений галактик. В первый из них, содержащий 2712 скоплений, его автор Дж. Эйбелл зачислял уплотнения, насчитывающие не менее 50 галактик внутри объема с диаметром 4 Мпс.

Т а б л и ц а 19. Число наблюдаемых плотных, умеренно плотных и рассеянных скоплений галактик в зависимости от расстояния

Характер скопления	Расстояние				
	До 15 Мпс	От 15 до 30 Мпс	От 30 до 45 Мпс	От 45 до 60 Мпс	Свыше 60 Мпс
Плотные скопления	1	14	36	132	136
Умеренно плотные скопления . .	40	95	141	207	68
Рассеянные скопления	47	96	132	96	3

Исследуя распределение скоплений галактик в метagalактическом пространстве по данным своего каталога, Эйбелл пришел к выводу, что скопления галактик в свою очередь обнаруживают свойство образовывать скопления. Вырисовывается еще одна ступень в иерархическом строении Вселенной — скопление скоплений галактик!

Но это утверждение еще нельзя считать бесспорным. Автор второго каталога (содержащего данные о 9730 скоплениях галактик) Цвикки, выполнив исследование совместно с польским астрономом Рудницким, заключил, что скопления галактик распределены в Метагалактике более или менее равномерно, обнаруживая лишь случайные отклонения от равномерности. Цвикки считает, что всю Вселенную можно мысленно разбить на ячейки приблизительно одинакового размера так, что ячейка от ячейки будет отличаться лишь случайностями в распределении галактик. Ячейки в какой-нибудь одной области Метагалактики не будут систематическим образом отличаться от ячеек в другой области Метагалактики. Размер ячеек определяет как бы размер неровностей в распределении материи во Вселенной. По данным Цвикки этот размер составляет 40 Мпс.

Скопление галактик в Деве

Ближайшим к нам крупным скоплением галактик является неправильное скопление в созвездии Девы. Расстояние до него около 12 Мпс, а линейные размеры составляют почти 8 Мпс. Поэтому площадь, которую занимает это скопление на небе, весьма значительна: $40 \times 40^\circ$.

Ввиду сравнительной близости скопления галактик в Деве и богатства его гигантскими и сверхгигантскими галактиками многие его члены являются яркими объектами. Из 1249 ярчайших галактик неба, содержащихся в каталоге Шепли — Эймс, 203 входят в состав скопления в Деве. Слабые же галактики в этом скоплении насчитываются тысячами. Особенно много карликовых неправильных галактик с низкой поверхностной яркостью. Однако основу массы и основу общей светимости скопления в Деве все-таки составляют гигантские и сверхгигантские спиральные и эллиптические галактики. Спирали имеются всех типов и они весьма многочисленны, что обычно для неправильных скоплений.

Несмотря на неясность очертаний и неправильную форму скопления в Деве, галактики в нем обнаруживают концентрацию к центру. Сильнее это проявляется у эллиптических галактик, слабее у спиральных. Эту особенность следует рассматривать как подтверждение тяготения эллиптических галактик к сгущиванию. Они чаще, чем спирали, входят в скопления, доминируют в плотных скоплениях, а в неправильных неплотных скоплениях показывают большую концентрацию к центру.

Скопление галактик в Волосах Вероники

Это замечательное по своей симметричности, плотности и богатству членами скопление находится на расстоянии приблизительно 85 Мпс. Оно занимает область на небе с диаметром около 12 градусов (в эту область уложились бы 500 дисков Луны или Солнца). Диаметр скопления около 17 Мпс.

Для того чтобы составить некоторое представление о расстоянии и размерах скопления галактик в Волосах Вероники, применим известный прием изменения масштаба. Пусть окружность двухкопеечной монеты (ее диаметр 1,7 см) представляет собой орбиту Земли. Тогда

Солнце в центре орбиты будет иметь размер пылинки, а Землю можно будет увидеть только в сильный микроскоп. Самая удаленная планета Солнечной системы, Плутон, тоже наблюдаемая только в микроскоп, расположится на расстоянии 35 см, а ближайшая звезда α Центавра будет крошечной пылинкой в 2,5 км от монеты.

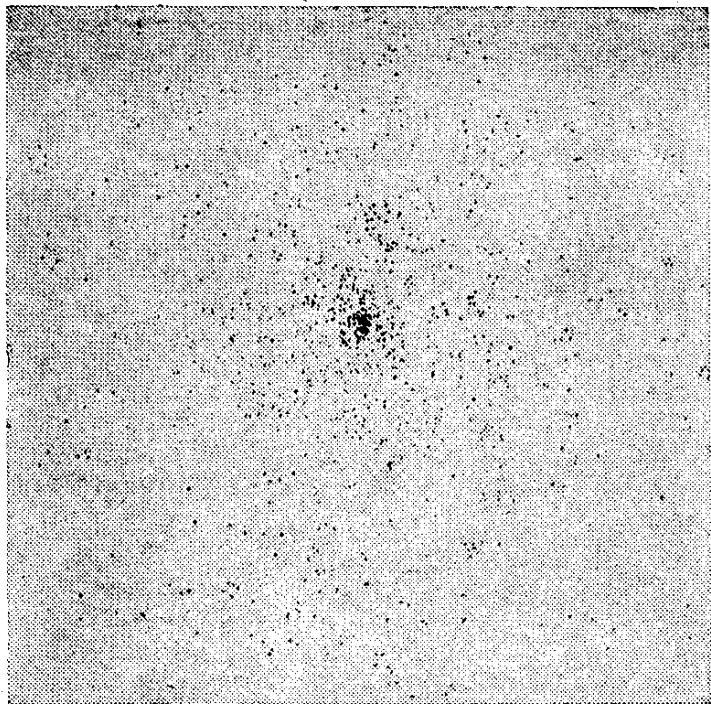


Рис. 101. Центральная часть скопления галактик в созвездии Волос Вероники.

Скопление же галактик в созвездии Волос Вероники окажется на расстоянии Солнца, а объем его будет в 170 раз больше объема Солнца.

На рис. 101 показан вид центральной части скопления по фотографии, сделанной при помощи 18-дюймового телескопа системы Шмидта. Каждое пятнышко означает галактику. Ясно выделяется центральная точка, к которой концентрируются члены скопления. Расположены галактики вокруг этой точки достаточно симметрично. Шаровое скопление, но не из звезд, а из галактик!

Для исследования структуры скопления Цвикки произвел в нем подсчеты чисел галактик в концентрических кольцах шириной в 5, 10, 20 и 30 минут дуги. Когда подсчеты производились на 18-дюймовом телескопе, то получались изображения галактик до 16,5 видимой звездной величины, а на 48-дюймовом телескопе до 19^m,0.

Не все галактики, наблюдаемые в области скопления, являются членами скопления. Некоторые из них находятся между нами и скоплением, другие лежат далеко за скоплением и лишь проектируются на него. Чтобы очистить числа подсчитываемых галактик от галактик поля, не являющихся членами скопления, нужно определить при помощи тех же телескопов среднее число галактик, приходящихся на один квадратный градус неба вне пределов скопления, но недалеко от него. Это число оказалось равным 7,4 для галактик до 16,5 видимой звездной величины и 170 для галактик до 19,0 видимой звездной величины. Умножая его на число квадратных градусов в кольце, мы получим число ожидаемых галактик поля в каждом кольце. Если затем вычесть числа ожидаемых галактик поля из чисел подсчитанных галактик, то в каждом кольце определится ожидаемое число галактик — членов скопления. Результаты приведены в 3-м и 6-м столбцах табл. 20.

Для ярких галактик ($m < 16^m,5$) уже на расстоянии 160' от центра доля членов скопления среди всех подсчитываемых галактик мала. На расстоянии 18 Мпс видимой звездной величине 16^m,5 соответствует абсолютная величина $-18^m,2$. Галактики ярче $-18,2$ абсолютной звездной величины — это гигантские и сверхгигантские галактики. Таким образом, для гигантских и сверхгигантских галактик граница скопления лежит практически на расстоянии 160' от центра. А видимой звездной величине 19^m,0 на том же расстоянии соответствует $M = -15^m,7$. Ярче $M = -15^m,7$ не только гиганты и сверхгиганты, но и галактики умеренной светимости и даже некоторые карлики. Сравнение 5-го и 6-го столбцов показывает, что для совокупности этих галактик граница скопления простирается до расстояния 360', а может быть, находится и дальше.

Просуммировав числа 6-го столбца, мы найдем, что скопление галактик в Волосах Вероники содержит около 11 тысяч галактик ярче $M = -15^m,7$. Суммирование 3-го столбца показывает, что в их числе имеется около 660

гигантских и сверхгигантских галактик. У самых ярких галактик этого скопления абсолютная звездная величина равна $-21^m,5$; они значительно превосходят по светимости и нашу Галактику, и туманность Андромеды.

Т а б л и ц а 20. Подсчет галактик в скоплении Волос Вероники

Границы колец в минутах дуги	Галактики с $m < 16,5$			Галактики с $m < 19,0$			$\frac{n_1 - n_2}{n_2}$
	число галактик в кольце	число членов скопления в кольце	число членов скопления на 1 кв. град., n^2	число галактик в кольце	число членов скопления в кольце	число членов скопления на 1 кв. град., n^2	
0—5	31	31	1413	60	56	2546	0,820
5—10	42	42	634	125	114	1740	1,76
10—15	53	52	478	152	134	1224	1,56
15—20	44	42	281	166	139	916	2,26
20—30	87	84	193	325	252	575	1,98
30—40	66	62	101	365	261	430	3,26
40—50	72	66	84	395	261	332	2,96
50—60	73	66	69	456	294	305	3,42
60—70	69	60	54	453	360	230	3,3
70—80	34	45	19	471	249	189	8,9
80—90	32	21	15	441	189	128	7,5
90—100	41	28	18	530	250	150	7,4
100—120	61	33	9	1091	441	121	13
120—140	49	16	4	1311	541	119	29
140—160	50	11	3	1347	457	87	28
160—180	—	—	—	1579	589	96	—
180—200	—	—	—	1828	698	105	—
200—220	—	—	—	2100	870	117	—
220—240	—	—	—	2233	863	108	—
240—270	—	—	—	3436	1166	87	—
270—300	—	—	—	3466	926	62	—
300—330	—	—	—	3629	789	50	—
330—360	—	—	—	3992	982	51	—
Всего		659			10 881		

Конечно, общее число членов скопления галактик в Волосах Вероники намного больше 11 тысяч и составляет, по-видимому, 3—4 десятка тысяч. Там должно находиться множество слабых карликовых галактик, в особенности типа I II, не обнаруживаемых при подсчетах на 48-дюймовом телескопе.

Площади колец, в которых производились расчеты, различны. Поэтому данные столбцов 3 и 6 не дают

представления о том, насколько тесно располагаются галактики на различных расстояниях от центра. Картина становится более ясной, если разделить данные 3-го и 6-го столбцов на число квадратных градусов соответствующего кольца и получить таким образом число членов скопления на один квадратный градус неба. Приведенные в 4-м и 7-м столбцах результаты показывают, что плотность галактик очень быстро падает по мере удаления от центра скопления. Особенно быстро это происходит с гигантскими и сверхгигантскими галактиками, которые сильнее сосредоточены к центру скопления. Чем дальше какая-нибудь область от центра скопления, тем меньше в ней относительная доля гигантских и сверхгигантских галактик. Это наглядно видно по данным 8-го столбца, в котором помещены отношения чисел галактик умеренной светимости и карликовых (получаемых вычитанием чисел 4-го столбца из чисел 7-го столбца) к числу гигантских и сверхгигантских галактик. В самом центре скопления несколько преобладает число гигантских и сверхгигантских галактик. Но уже на небольшом расстоянии численность слабых галактик берет верх и в кольце $140' - 160'$ достигает почти тридцатикратного превосходства.

Объем скопления галактик в Волосах Вероники составляет приблизительно 3000 Мпс^3 . Поэтому средняя плотность в нем равна приблизительно 4 галактикам на 1 Мпс^3 , а с невидимыми карликовыми галактиками еще в 2—3 раза больше. В центральных областях скопления плотность значительно выше, превосходит 100 галактик на 1 Мпс^3 , а если иметь в виду и карликовые галактики, то она составляет 300—400 галактик на 1 Мпс^3 . Здесь расстояния между галактиками сравнимы с их размерами.

Состав галактик в скоплении Волос Вероники обычен для плотных сферических скоплений. Здесь нет галактик с ясно выраженной спиральной структурой. Доминируют эллиптические галактики и тип S0. Та же особенность состава наблюдается в другом правильном и очень плотном скоплении в созвездии Северной Короны.

Можно ввести понятие типа населения для галактик. Тогда тип населения, состоящий из эллиптических галактик и галактик S0, уместно назвать вторым, так как эти галактики сами состоят из звездного населения второго типа. Сферические скопления галактик образуются из второго типа населения галактик, подобно тому как

шаровые звездные скопления составлены из звездного населения II типа.

Тип населения, состоящий из спиральных галактик и галактик II, уместно назвать I типом населения. Он доминирует в неправильных скоплениях галактик.

Закон всеобщего разбегания галактик

В 1929 г. Хабл сообщил об открытии им фундаментальной закономерности. Он обнаружил, что линии спектров всех галактик, за исключением нескольких галактик из числа самых близких, смещены в красную сторону. Как и в случае смещения спектров звезд, объясняемых явлением Доплера, отношение изменения длины волны $\Delta\lambda$ к самой длине волны λ одинаково для всех линий спектра данной галактики. Если объяснять это явление, как обычно, эффектом Доплера, то нужно сделать вывод, что все галактики, за исключением нескольких из числа самых близких, удаляются от нас, и скорость удаления v каждой галактики определяется из пропорции

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (19)$$

где c — скорость света.

Но этим еще не исчерпывалось открытие. Выяснилось, что чем в среднем слабее галактика, тем сильнее смещены в красную сторону линии ее спектра; а так как слабый блеск галактики, вообще говоря, свидетельствует в пользу ее большей удаленности, то можно сделать вывод, что чем дальше находится галактика, тем сильнее смещен ее спектр в красную сторону.

Исследовав вопрос подробно, Хабл установил, что отношение $\Delta\lambda/\lambda$, определяемое по спектру галактики, пропорционально расстоянию до галактики, т. е. красное смещение в спектрах галактик пропорционально расстоянию до галактик.

Сначала эта закономерность была установлена для ярких и, следовательно, сравнительно близких галактик. Но затем в 1936 и 1953 гг. Хабл показал, что она справедлива для всех галактик, включая самые слабые, в результате чего обнаруженная закономерность приобрела характер всеобщего закона. Этот закон, названный законом красного смещения спектров галактик, а иногда называемый законом Хабла, является одним из фунда-

ментальнейших законов Вселенной, одним из основных законов природы.

Ввиду чрезвычайной важности закона красного смещения спектров галактик, покажем, каким способом Хабл пришел к его установлению, но воспользуемся при этом более обширным материалом лучевых скоростей 806 галактик, который получили в 1956 г. Хьюмасон, Мейалл и Сендидж.

Предположим, что закон красного смещения спектров галактик справедлив и, следовательно, выполняется равенство

$$c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = H \cdot r, \quad (20)$$

где c — скорость света, а H — некоторый коэффициент пропорциональности, который в честь Хабла принято обозначать первой буквой его фамилии (Hubble).

Тогда, подставляя в известное нам равенство

$$m = M + 5 \lg r - 5$$

вместо r его выражение из (20), получим

$$m = 5 \lg \left(c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) + M - 5 - 5 \lg H. \quad (21)$$

Последние два члена в равенстве (21) — постоянные величины. Если бы была еще одинаковой для всех галактик абсолютная звездная величина M , то, откладывая на оси абсцисс $\lg \left(c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)$, а на оси ординат m , находимые из наблюдений галактик, мы, если закон Хабла выполняется, согласно (21) должны были бы получить точки, располагающиеся строго вдоль некоторой прямой. На самом деле абсолютные звездные величины галактик различаются между собой, и притом, как мы знаем, довольно сильно. Вследствие этого (если закон Хабла выполняется), точки будут располагаться не строго вдоль прямой, а сгруппируются около нее с некоторым разбросом.

График на рис. 102, построенный Хьюмасоном, Мейаллом и Сендиджем, убеждает в справедливости закона Хабла. Важно здесь также то, что наклон прямой, около которой разбросаны точки, получается как раз таким, каким он должен быть согласно коэффициенту 5, стоящему перед логарифмом в уравнении (21).

Чтобы добиться еще более убедительного результата, уменьшить разброс точек около прямой, Хьюмасон, Мей-

алл и Сендидж воспользовались следующим приемом. В 18 скоплениях галактик они измерили красное смещение спектров у первой, третьей, пятой и десятой по яркости галактики и определили средние значения $\lg\left(c \frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$ и m для них. Можно полагать, что ярчайшие члены

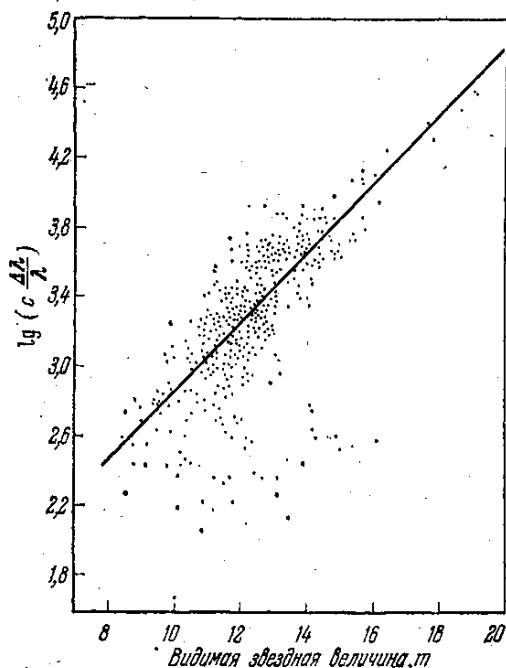


Рис. 102. Диаграмма, иллюстрирующая закон Хаббла для галактик.

скоплений не очень сильно отличаются от скопления к скоплению по абсолютной звездной величине. Кроме того, здесь взяты средние величины. Поэтому, если закон Хаббла верен, разброс точек должен сильно уменьшиться. Как показывает рис. 103, это в действительности и произошло. Полученные точки с очень малым разбросом ложатся около прямой. Закон Хаббла выражается отчетливо.

Итак, закон подтвержден: для галактик выполняется условие (20).

Но можно ли утверждать, что красное смещение спектров галактик есть следствие эффекта Доплера, т. е. что

оно вызывается удалением галактик? Если допустить, что это именно так, то из равенств (19) и (20) следует, что

$$v = H \cdot r, \quad (22)$$

и мы приходим к выводу, к которому астрономы за прошедшие 45 лет уже привыкли, но который поражает воображение каждого, кто впервые его узнаёт: галактики

удаляются со скоростями, пропорциональными их расстояниям! Если одна из них расположена в сто раз дальше, чем другая, то она и удаляется от нас в сто раз быстрее.

Хабл объяснял красное смещение спектров галактик эффектом Доплера, поэтому закон (22) также называют законом Хабла. Нужно, однако, понимать, что закон (20) является безусловно правильным, он проверен наблюдениями, а закон (22) верен

только при допущении, что смещение спектров вызывается эффектом Доплера, чего наблюдениями доказать нельзя. Можно лишь судить о большей или меньшей степени правдоподобности этого утверждения.

Если бы весь наблюдаемый мир образовался в результате грандиозного взрыва и галактики формировались из материи, разбросанной взрывом, то те из них, которые зародились в частях материи, получивших в момент взрыва большую скорость, должны были бы к настоящему моменту улететь дальше, в полном согласии с законом Хабла.

Принятие закона Хабла в виде (22), утверждающем, что галактики имеют положительные скорости, пропорциональные их расстояниям, должно неизбежно приводить к выводу, что некогда в прошлом (как давно, это зависит от значения коэффициента H) все галактики, или куски материи, из которых они сформировались, вылетели одновременно, но с разными скоростями из некоторого сравнительно малого объема.

Этот вывод имеет настолько большое значение для всех наших представлений о происхождении и строении

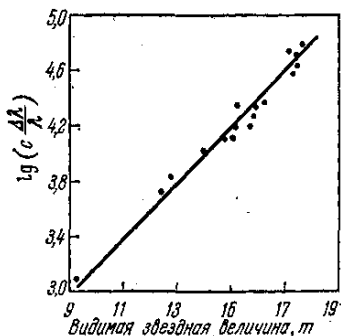


Рис. 103. Диаграмма, иллюстрирующая закон Хабла для ярких галактик скоплений.

Вселенной, что прежде чем с ним согласиться, необходимо проверить, нет ли других возможностей для объяснения красного смещения, кроме эффекта Доплера.

Было предложено несколько иных объяснений. Одно из них, получившее название гипотезы «старения кванта», состоит в том, что фотоны, т. е. частицы света, при своем движении в пространстве теряют часть энергии, которая в них заключена. Утверждается, что таков закон движения фотона в пространстве. Энергия фотона пропорциональна частоте, т. е. обратно пропорциональна длине волны излучения. Поэтому, по мере того как фотон путешествует в пространстве, длина волны излучения становится все больше и весь спектр далекого объекта оказывается смещенным в красную сторону, причем величина смещения будет пропорциональна расстоянию. На малых расстояниях и даже на расстояниях больших (но не очень) эффект старения кванта еще настолько незначителен, что его нельзя обнаружить из наблюдений, поэтому он сказывается только в спектрах весьма отдаленных тел — других галактик.

Еще одно объяснение, предложенное вместо эффекта Доплера, состояло в конкретизации причины «старения кванта». Потеря энергии фотоном не есть просто закон его движения, а вызывается взаимодействием с другими фотонами излучения, заполняющими пространство Метагалактики и движущимися по всевозможным направлениям. Чем больший путь проходит фотон, тем в среднем больше взаимодействий он испытывает, тем больше будет красное смещение спектра галактики.

Слабость всех гипотез, сводящихся к «старению кванта» при движении света в пространстве, состоит в том, что они требуют отказа от закона сохранения энергии. Если «старение кванта» есть просто закон его движения, то энергия теряется, не передаваясь ничему, т. е. закон сохранения энергии нарушается. Если же фотон теряет часть энергии, передавая ее какой-то среде, другим фотонам, вообще каким-то частицам, то всякая такая передача энергии должна быть связана с возможностью изменения направления полета фотона. Фотоны, прошедшие очень большой путь, должны заметно изменить направление своего движения в пространстве. Вследствие этого изображения далеких галактик должны быть размытыми, и чем дальше галактика, тем степень размытости ее изображения должна быть больше.

Но наблюдения показывают, что очертания далеких и очень далеких галактик столь же ясны и отчетливы, как и ближайших к нам звездных систем.

Поэтому гипотезы «старения кванта», серьезно обсуждавшиеся еще лет тридцать назад, в настоящее время почти не находят сторонников.

Только эффект Доплера может приводить к сильному красному смещению спектров галактик и сохранять при этом отчетливые изображения галактик на фотографических пластинках, такие, какие в действительности наблюдаются. Таким образом, хотя это нельзя считать строго доказанным, а просто ввиду отсутствия других удовлетворительных объяснений, разумно считать, что красное смещение спектров галактик действительно вызывается их удалением.

Значит, нужно принять и следствие из этого вывода, а именно, что в некоторый момент в прошлом все галактики, или куски материи, из которых образовались галактики, были одновременно выброшены по разным направлениям и с разными скоростями из маленького объема пространства. Этот фундаментальный космогонический вывод в тридцатые годы нашего века породил гипотезы, рассматривающие взрыв, давший начало галактикам, как сотворение мира в результате божественного акта.

С другой стороны, вывод об имевшем место, казалось бы, начальном моменте существования всей наблюдаемой Вселенной настораживал многих астрономов и вызывал у них недоверие к закону Хаббла. Но попытки игнорировать закон, основанный на точных наблюдениях, никогда не приводят к научному прогрессу. В наши дни стало совершенно ясным, что предположение о некотором грандиозном процессе взрывного характера, давшем начало галактикам и сообщившим им различные скорости, является наблюдательным фактом, вполне согласующимся с материалистическими представлениями о Вселенной.

Взрывные процессы различного масштаба оказались весьма распространенными во Вселенной. Вспышки новых звезд, вспышки сверхновых звезд, грандиозный взрыв в ядре галактики NGC 3034 и другие явления, о которых мы будем писать ниже, свидетельствуют о существовании процессов взрывного характера, показывают, что процессы такого рода — закономерность в эволюции Вселенной. Взрывной процесс, давший начало всем

наблюдаемым галактикам, следует рассматривать в цепи этих явлений как самое грандиозное из них.

Предположим, что в результате взрыва, происшедшего 1,5 млн. лет назад, в ядре галактики NGC 3034, сформировались звезды. Около одной из них образовалась планетная система и развилась разумная жизнь. Точные научные исследования, которые выполнят разумные существа, приведут их к выводу, что планетная система, в которой они живут, и окружающие их звезды образовались одновременно в результате взрыва и выбросов из маленькой области внутри ядра галактики 1,5 млн. лет назад. Будет ли такой вывод научным? Разумеется. Требуется ли он признания сверхъестественной божественной силы? Нет, конечно. Разумным существам в галактике NGC 3034, как и нам, необходимо будет признать, что наблюдательные данные свидетельствуют о существовании и важной роли в космогонии еще неизученных процессов взрывного характера. Они, как и мы, должны считать первостепенной задачей изучение этих процессов, связанных с бурным переходом вещества из одного состояния в другое. То, что взрывные процессы проявляются в различной форме и имеют различные масштабы, должно способствовать изучению сути этих явлений.

Так как все обозреваемое пространство Вселенной заполнено галактиками и никакими иными тел, отклоняющихся от закона Хаббла, не наблюдается, то этот закон можно трактовать как общее расширение наблюдаемой области Вселенной, расширение Метагалактики. Можно даже считать, что происходит равномерное и изотропное, т. е. одинаковое во всех точках и во всех направлениях, расширение пространства, влекущее удаление друг от друга тел, в нем находящихся.

Удаление галактик по всем направлениям от земного наблюдателя вовсе не означает, что Земля или, лучше сказать, наша Галактика занимает центральное положение во Вселенной, в Метагалактике. Представьте себе сплошной резиновый шар, который мы каким-нибудь способом равномерно растягиваем по всем направлениям. В какой бы точке этого шара ни находился наблюдатель, в центральной или любой иной, ему будет казаться, что все остальные точки шара от него удаляются, причем удаляются со скоростями, пропорциональными их расстояниям. Интересно, что если скорость удаления галактик не зависит от направления, то только закон пропор-

циональности скорости расстояниям не ведет к антропоцентризму — выводу о центральном положении человека во Вселенной. Если бы, например, все галактики, независимо от их расстояний, удалялись от Земли с одинаковой скоростью, то, как легко себе это представить, положение нашей Галактики во Вселенной было бы исключительным. Только при взгляде из этой точки происходило бы расширение по всем направлениям, и во всех направлениях скорость расширения была бы одинаковой. Для каждой из других точек пространства имелось бы направление, в котором расширение отсутствует, а в остальных направлениях скорость расширения была бы различной.

Рассматривать удаление галактик как расширение пространства удобно еще вот почему. Галактики, являющиеся членами одного и того же скопления галактик, находятся почти на одинаковом расстоянии от нас, так как обычно размеры скопления малы в сравнении с такими расстояниями. Между тем лучевые скорости этих галактик обычно заметно отличаются друг от друга. Отличие намного больше того, которое следует из закона Хаббла, если бы одни галактики находились на ближней к нам, а другие на дальней от нас границах скопления. Это явление объясняется тем, что все скопление галактик удаляется от нас со скоростью, которая у него должна быть согласно закону Хаббла, но внутри скопления каждая галактика еще как-то движется по отношению к центру инерции скопления. Поэтому общая скорость галактики складывается из двух скоростей — общей согласно закону Хаббла для данного расстояния, т. е. для места данного скопления, и индивидуальной скорости по отношению к скоплению, в котором галактика находится.

Индивидуальным движением обладает каждая галактика, а не только член скопления. Поэтому общую картину движений галактик лучше всего представлять себе так: все пространство Метагалактики изотропно расширяется и увлекает с собой находящиеся в нем галактики. В то же время каждая галактика имеет еще индивидуальное движение, направление которого может быть любое — и от нас, и к нам, и в любую другую сторону.

Именно благодаря индивидуальным движениям спектры некоторых из самых близких галактик смещены не в красную, а в фиолетовую сторону, т. е. эти галактики к нам приближаются. У близких галактик удаление, вызванное расширением пространства, мало вследствие срав-

нительной малости расстояния, и эта скорость вполне может быть перекрыта индивидуальной скоростью, если последняя направлена к нам. У далеких же галактик скорость удаления, вызываемая расширением пространства, настолько велика, что влияние индивидуальной скорости становится незаметным.

В списке Местной системы галактик (см. табл. 12) 7 галактик имеют отрицательную лучевую скорость, т. е. приближаются к нам. Однако необходимо учесть, что лучевые скорости мы определяем из Солнечной системы, которая сама движется со скоростью около 220 км/с в нашей Галактике. Поэтому чтобы получить скорость других галактик по отношению к нашей Галактике, а именно это и представляет интерес в рассматриваемом вопросе, необходимо в полученные лучевые скорости внести поправки за скорость Солнца в Галактике.

Если это сделать, то окажется, что лучевая скорость у всех членов Местной системы сохранит знак. В частности, у шести членов Местной системы лучевая скорость останется отрицательной, хотя и уменьшится по абсолютной величине. Так, туманность Андромеды (NGC 224) действительно приближается к нашей Галактике со скоростью 143 км/с, а NGC 185 со скоростью 180 км/с.

Исследование лучевых скоростей близких галактик показало, что индивидуальные скорости галактик, расположенных вне скоплений, составляют в среднем 200—300 км/с, а у галактик — членов некоторых плотных скоплений они больше и равны 400—600 км/с.

Величины красных смещений спектров указывают на очень большие скорости слабых далеких галактик. Например, для одной слабой галактики измеренное Минковским на Паломарской обсерватории значение $\Delta\lambda/\lambda$ оказалось равным 0,46. Следовательно, если применить формулу (19), то скорость удаления галактики будет равна 0,46 с или 138 000 км/с. Однако для таких больших скоростей формула (19) неверна. Она приближенно выражает закон Доплера лишь в том случае, когда v очень мала в сравнении с c . Точная формула закона Доплера дается теорией относительности и имеет вид

$$\frac{v}{c} = \frac{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} + 1\right)^2 - 1}{\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} + 1\right)^2 + 1}. \quad (23)$$

В случае очень малых $\Delta\lambda/\lambda$ эта формула сводится к равенству (19), а при не очень малых $\Delta\lambda/\lambda$ различие между формулами (19) и (23) существенно. Если, например, смещение длины волны окажется равным самой длине волны (что не невозможно), то по формуле (19) получается предельная в природе скорость $v=c$, а по верной формуле (23) $v = \frac{3}{5}c$. Согласно формуле (23) какие бы большие смещения спектров ни наблюдались, скорость удаления меньше скорости света. Для упомянутой выше галактики, имеющей красное смещение спектра $\Delta\lambda/\lambda = 0,46$, по формуле (23) находим правильное значение $v = 0,36c$ или 108 000 км/с.

Теперь нам осталось сделать последний и важнейший шаг в познании закона Хаббла. Нужно определить значение коэффициента пропорциональности H , связывающего в формуле (22) скорость удаления галактик с расстояниями до них. Коэффициент H является одной из основных мировых констант — он характеризует скорость расширения мирового пространства. Историю определения этого коэффициента мы изложим в следующих двух разделах.

Построение шкалы внегалактических расстояний

Если бы закон Хаббла

$$v = H \cdot r$$

выполнялся точно и коэффициент H был известен, то, определив из наблюдений $\Delta\lambda/\lambda$, а затем по формуле (19) лучевую скорость v , можно было бы найти расстояние до галактики.

Но закон (22) выполняется неточно. Он был бы точным, если бы у галактик отсутствовали индивидуальные скорости и они удалялись от нас в строгом соответствии с общим расширением пространства. Как было указано выше, индивидуальные лучевые скорости в метagalактическом поле составляют 200—300 км/с, а в некоторых плотных скоплениях достигают 400—600 км/с. Они могут быть как положительными, так и отрицательными. Поэтому если, например, полученная из наблюдений лучевая скорость равна +500 км/с, то очевидно, что в ее образовании индивидуальная лучевая скорость галактики могла играть значительную роль, составляя многие десятки процентов от измеренной величины. Следовательно,

в этом случае, т. е. в случаях малых скоростей и малых расстояний, точность закона Хабла (22) очень низка.

Если же полученная из наблюдений лучевая скорость велика, равна, например, $+30\,000$ км/с, то роль индивидуальной скорости галактики в ее образовании незначительна, она составит около 1% измеренной скорости. Следовательно, для больших скоростей, а значит, и для больших расстояний закон Хабла выполняется с большой степенью точности. Такова любопытная особенность закона Хабла: он тем точнее, чем больше расстояния.

Мы приходим к важному выводу. Стоит только один раз каким-нибудь способом надежно определить значение мировой константы — коэффициента H , и станут известны расстояния до всех далеких галактик и их скоплений, если для них измерено красное смещение спектра. Будет уверенно промериваться практически все доступное наблюдениям пространство, потому что введение в строй все более крупных телескопов и использование чувствительных фотопластинок позволяет при больших выдержках получать спектры очень слабых, отдаленных объектов и измерять в них красное смещение линий. Таким образом, коэффициент H фактически определяет шкалу внегалактических расстояний.

Но надежное определение значения мировой константы H оказалось очень сложным делом.

Построенные Хаблом, а впоследствии Хьюмасоном, Мейаллом и Сендиджем диаграммы (рис. 102 и 103) позволяют только удостовериться в правильности закона Хабла (22), но не могут быть использованы для определения значения коэффициента H .

Единственный способ определения H состоит в следующем. Нужно у какой-нибудь галактики, которая достаточно далека и поэтому для нее достаточно точно выполняется закон (22), измерить красное смещение спектра и по формуле (19) вычислить v . Кроме того, и в этом вся трудность задачи, нужно как-то независимо измерить расстояние до этой галактики. Тогда в равенстве (22) величины v и r станут известны, значение коэффициента H определится.

Закон (22) выполняется тем точнее, чем дальше рассматриваемая галактика. Задача поэтому сводится к определению каким-нибудь способом расстояния до возможно более далекой галактики. Для решения ее Хабл применил метод, который можно назвать двухступенчатым.

Сначала он определил расстояние до туманности Андромеды при помощи цефеид. Короткопериодические цефеиды в этой галактике наблюдаться не могли даже в 2,5-метровый телескоп, которым пользовался Хабл. Но долгопериодические цефеиды, имеющие значительно более высокую светимость, наблюдались уверенно. Измеряя периоды этих переменных звезд, Хабл по известному тогда соотношению период — абсолютная звездная величина находил значения M у цефеид. А сравнение абсолютной звездной величины звезды с ее наблюдаемой видимой звездной величиной по формуле (16) определяет расстояние.

Знания расстояния до туманности Андромеды еще недостаточно для определения константы H . Слишком близка эта галактика и, как мы знаем, лучевая скорость у нее даже отрицательна. У более же далеких галактик долгопериодические цефеиды становятся недоступными наблюдениям, нужно найти какие-то более яркие объекты для определения расстояния. Хабл использовал ярчайшие звезды галактик. Так как расстояние до туманности Андромеды было уже определено, он по видимым звездным величинам ярчайших звезд этой галактики, используя формулу (15), определил их абсолютные звездные величины. Ярчайшие звезды на несколько звездных величин ярче долгопериодических цефеид и могут наблюдаться у более далеких галактик. Затем Хабл выбрал несколько спиральных галактик в скоплении Девы, достаточно далеких, но у которых еще была возможность различить несколько точечных объектов — ярчайших звезд. Он предположил, что средняя абсолютная звездная величина нескольких ярчайших звезд во всех спиральных галактиках одна и та же. Следовательно, у спиральных галактик в Деве она такая же, как у туманности в Андромеде. Тогда сравнение этих абсолютных звездных величин с наблюдаемыми видимыми звездными величинами определяет расстояние. У галактик, расстояния которых были таким образом определены, лучевые скорости несколько превосходят 1100 км/с — это все-таки в несколько раз больше средней индивидуальной скорости галактик и равенство (22) можно считать приблизительно верным. Конечно, желательно было бы использовать более далекие галактики, имеющие большие лучевые скорости, но в них уже и ярчайшие звезды становятся невидимыми.

Из использованных Хаблом галактик основную роль сыграла самая яркая галактика скопления Девы NGC 4321 (рис. 104).



Рис. 104. Галактика NGC 4321. Она сыграла важную роль при определении константы H .

В итоге всех исследований Хабл пришел к следующему значению всемирной константы H :

$$H = 540 \text{ км/с на мегапарсек.}$$

Следовательно, темп расширения пространства таков, что точка, находящаяся на расстоянии в 1 Мпс, удаляется со скоростью 540 км/с, точка на расстоянии 2 Мпс удаляется со скоростью 1080 км/с и т. д. Если измеренная лучевая скорость галактики составляет 10 000 км/с, то расстояние ее равно

$$\frac{10\,000 \text{ км/с}}{540 \text{ км/с} \cdot \text{Мпс}} = 18,5 \text{ Мпс.}$$

Мы отмечали выше, что пространство расширяется изотропно и закон Хаббла верен при наблюдении из любой точки Вселенной, а не только с Земли. Любые две галактики, разделенные расстоянием в 1 Мпс, вследствие расширения пространства удаляются друг от друга со ско-

ростью 540 км/с. Нужно полагать, что за время существования галактик их скорости не претерпели существенных изменений. Тогда можно определить время, необходимое галактикам, чтобы после того как произошел взрывной процесс, разойтись на то расстояние, на котором они находятся сейчас:

$$\frac{1 \text{ Мпс}}{540 \text{ км/с}} = \frac{3,81 \cdot 10^{19} \text{ км}}{540 \text{ км/с}} = 7 \cdot 10^{16} \text{ с} = 2,5 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Два с половиной миллиарда лет назад, согласно расчетам Хаббла, произошел взрывной процесс, сделавший наблюдаемую Вселенную такой, какой мы ее видим сейчас.

Пересмотр шкалы внегалактических расстояний

Около двух десятков лет астрономия использовала шкалу внегалактических расстояний Хаббла, определяемую значением мировой константы $H = 540 \text{ км/с} \cdot \text{Мпс}$. Определение расстояний до далеких галактик и их скоплений, изучение структуры метагалактического пространства, оценка радиуса обозреваемой Вселенной производились на основе этой принятой всеми шкалы расстояний. Она указывала и на верхний предел — 2,5 млрд. лет — возраста галактик, звезд, планет, всех тел обозреваемого мира (но не возраста самого мира).

Однако к концу пятидесятых годов стало выясняться, что принятая система расстояний во внегалактической астрономии приводит к мало правдоподобному выводу, что наша Галактика является самой большой звездной системой из всех наблюдаемых звездных систем. Более того, получалось так, что не только сама Галактика, но и все объекты, входящие в нее, звезды-сверхгиганты, шаровые скопления, планетарные туманности, почему-то превосходят по светимости аналогичные объекты в других галактиках.

В 1954 г. Бааде предпринял попытку обнаружения короткопериодических цефеид в туманности Андромеды при помощи вступившего в строй 5-метрового телескопа. Согласно принятому до туманности Андромеды расстоянию в 230 кпс, короткопериодические цефеиды (их абсолютная звездная величина приблизительно равна $0^m,0$) должны были иметь с учетом поглощения света видимую звездную величину $22^m,4$. Столь слабые объекты недоступ-

ны 2,5-метровому телескопу, который до этого был крупнейшим в мире: он мог получать изображения звезд только до 21,5 видимой звездной величины. Для 5-метрового телескопа предельная видимая звездная величина объектов 23^m,0, поэтому Бааде рассчитывал на успех. Однако, приняв меры к получению изображений объектов до 23,0 видимой звездной величины, Бааде не обнаружил среди них короткопериодических цефеид. Зато были получены изображения долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита. Видимая звездная величина их оказалась равной 22^m,4 — как раз той, которая ожидалась для короткопериодических цефеид.

Средняя абсолютная звездная величина звезд типа Миры Кита надежно установлена путем сравнения их в шаровых скоплениях нашей Галактики с короткопериодическими цефеидами и оценивается в $-1^m,5$. Значит, переменные звезды типа Миры Кита должны были иметь в туманности Андромеды видимую звездную величину 20^m,9, а оказались видимой звездной величины 22^m,4. Короткопериодические цефеиды там же ожидалось с видимой звездной величиной 22^m,4, но не наблюдаются вовсе, хотя предельная видимая звездная величина для 5-метрового телескопа 23^m,0.

Все это можно объяснить лишь тем, что туманность Андромеды находится на самом деле дальше, чем предполагали. Оказывается, если считать, что туманность Андромеды находится в два раза дальше, т. е. на расстоянии 460 кпс, то звезды типа Миры Кита будут иметь видимую звездную величину 22^m,4, что и наблюдается, а короткопериодические цефеиды окажутся за пределом видимости 5-метрового телескопа, как и есть на самом деле. Более того, шаровые скопления и звезды-сверхгиганты туманности Андромеды, ранее почему-то уступавшие по светимости аналогичным объектам нашей Галактики, после принятия нового, вдвое большего расстояния сравняются с объектами Галактики. Сама туманность Андромеды при этом окажется и светимостью и размерами равной нашей Галактике, даже чуть превзойдет ее.

В чем же была причина ошибки, приведшей к вдвое меньшему значению расстояния? Как выяснилось, ошибка состояла в неправильной зависимости период — абсолютная звездная величина, которую использовали для долгопериодических цефеид при определении расстояний. Мы уже говорили в гл. 1, что и у короткопериодических,

и у долгопериодических цефеид выполняется закон — чем больше период, тем больше светимость. На рис. 105 сплошной линией показана зависимость между логарифмом периода и абсолютной звездной величиной, какой она предполагалась при выработке первой шкалы внегалактических расстояний. У этой кривой достаточно надежно определяется наклон, так как в Магеллановых Обла-

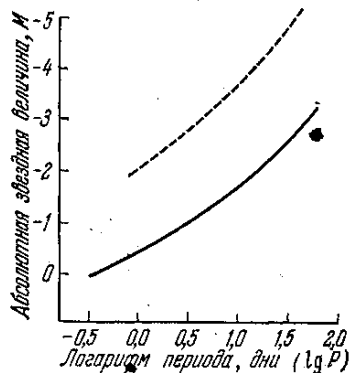


Рис. 105. Зависимость период — светимость у цефеид и ее пересмотр.

ках хорошо сравниваются между собой долгопериодические цефеиды, а в шаровых скоплениях нашей Галактики — короткопериодические цефеиды. Но для того чтобы выяснить, в каком месте чертежа проходит кривая, нужно хотя бы для одной цефеиды суметь определить расстояние тригонометрическим или каким-нибудь другим способом — положение, аналогичное тому, которое создается при определении константы Хабла H .

Для короткопериодических

цефеид это сделать удалось, нашлись близкие цефеиды, а для долгопериодических цефеид старания не увенчались успехом, все они очень далеки от нас. Тогда решили, что зависимость период — абсолютная звездная величина у короткопериодических и долгопериодических цефеид общая и выражается одной кривой. У кривой на рис. 105 область значений $\lg P$ от $-0,3$ до $+0,2$ (P измеряется в днях) относится к короткопериодическим цефеидам, а от $+0,8$ до $+1,3$ к долгопериодическим цефеидам. Хотя в характере кривой блеска у короткопериодических и долгопериодических цефеид есть общие черты, но, как известно, они относятся к разным типам звездного населения, поэтому трудно было бы предполагать, что зависимость период — абсолютная звездная величина у них общая. Из-за отсутствия данных о расстояниях долгопериодических цефеид пришлось примириться с этим предположением.

Исследование Бааде показало, что кривая период — абсолютная звездная величина для долгопериодических цефеид должна быть смещена на $1^m,5$ в сторону больших

светимостей. Правильная кривая для долгопериодических цефеид на рис. 105 показана прерывистой линией. Кривые для короткопериодических и долгопериодических цефеид оказались разными. Светимость долгопериодических цефеид, как выяснилось, в четыре раза больше, чем предполагали. Поэтому расстояния до галактик, определяемые при помощи долгопериодических цефеид, вдвое больше тех, которые получали первоначально.

Метод определения расстояний по ярчайшим звездам основан на сравнении их с цефеидами, а метод использования красного смещения спектров галактик — на сравнении с методом ярчайших звезд. Поэтому ошибка в два раза, вызванная неправильными данными о светимости цефеид, автоматически была перенесена на все внегалактические расстояния. После исследования Бааде Метагалактика как бы расширилась сразу вдвое, постоянная Хабла H вдвое уменьшилась, время, прошедшее с момента взрывного процесса, вдвое увеличилось.

Но пересмотр шкалы внегалактических расстояний на этом не закончился. В 1958 г. Сендидж, используя 5-метровый телескоп, исследовал галактику NGC 4321, которую Хабл использовал для привязки метода определения расстояний по лучевым скоростям к методу ярчайших звезд. Оказалось, что в этой галактике телескоп обнаруживает в виде ярких точек и звезды и сгустки, включающие ионизованные газовые туманности. Применяя фотографирование через различные фильтры, Сендидж надежно отделил звезды от сгустков туманностей. Видимая звездная величина первых оказалась $20^m,8$, а вторых $19^m,0$. Ясно, что Хабл, используя менее мощный телескоп и не применяя фильтры, принимал за ярчайшие звезды более яркие объекты — сгустки ионизованного газа. Это дало дополнительную ошибку в $1^m,8$. Чтобы исправить ее, нужно считать галактику NGC 4321 расположенной еще в 2,3 раза дальше, чем предполагали, а всего в 4,6 раза дальше, чем считал Хабл.

Кроме того, исследуя снова вопрос о расстоянии до ближайших галактик и используя для этой цели не только цефеиды, но и новые звезды, Сендидж пришел к выводу, что старые расстояния до ближайших галактик должны быть увеличены не в два раза, как считал Бааде, а в 2,75 раза. Эта дополнительная поправка распространяется на все внегалактические расстояния. Поэтому окончательный результат таков: старые расстояния до

далеких галактик должны быть увеличены в 6—7 раз. Таким образом, пересмотр шкалы внегалактических расстояний привел к тому, что расстояния до ближайших галактик, для определения которых использовался только метод цефеид и метод новых звезд, увеличились в 2,75 раза, а расстояния до остальных галактик и до скоплений галактик, для определения которых используется метод красного смещения спектров, увеличились в 6—7 раз. Соответственно постоянная Хаббла — мировая константа H — оказалась в 6—7 раз меньше, чем считал Хаббл.

Уточнению значения постоянной Хаббла и в настоящее время продолжает посвящаться много исследований. Однако, как, должно быть, уже ясно читателю из описания методов нахождения значения H , возможная точность определения этой фундаментальной величины пока невысока. Она не может идти в сравнение с точностью, с какой определяются значения таких, например, фундаментальных констант, как гравитационная постоянная, скорость света или заряд электрона. Результаты, получаемые различными исследователями, пока еще расходятся между собой, и можно лишь утверждать, что истинное значение H заключено в промежутке от 50 до 80 км/с · Мпс.

Следовательно, переход на новую шкалу внегалактических расстояний уменьшил значение постоянной Хаббла в 7—10 раз. Соответственно в 7—10 раз возросли все расстояния до далеких галактик и их скоплений. Радиус Метагалактики в наших представлениях также увеличился в 7—10 раз, а ее объем в 350—1000 раз. В 350—1000 раз уменьшилась плотность материи в Метагалактике. В семь — десять раз возросло в наших представлениях время, прошедшее с момента общего взрыва, давшего начало материи, из которой сформировались галактики и составляющие их звезды. Оно теперь должно оцениваться в 13—20 миллиардов лет. Оценка средней светимости одного кубического мегапарсека Метагалактики составляет теперь $1,2 \cdot 10^8$ — $3,5 \cdot 10^8$ светимости Солнца; это соответствует светимости $1 \cdot 10^{-39}$ — $3 \cdot 10^{-39}$ джоулей на 1 см^3 .

Сверхсистема галактик

В 1953 г. французский астроном Вокулер, исследуя распределение по небу галактик до 12-й видимой звездной величины, т. е. ярких галактик, установил, что они

определенно концентрируются к большому кругу, который перпендикулярен к галактическому экватору. Полоса толщиной в 12° около этого круга, составляющая только 10% поверхности неба, включает приблизительно $\frac{2}{3}$ всех ярких галактик. Число галактик на 1 квадратный градус в полосе приблизительно в 10 раз больше, чем в областях вне полосы.

Наука уже имела аналогичный опыт, когда В. Гершель, обнаружив концентрацию звезд к галактической плоскости, установил существование нашей звездной системы и определил, что она сплюснутая. Также и Вокулер пришел к выводу о существовании гигантской сплюснутой системы галактик и назвал ее сверхсистемой галактик.

Однако между явлением концентрации звезд к плоскости Галактики и концентрацией галактик к плоскости сверхсистемы галактик имеется существенное различие. Концентрация звезд к плоскости Галактики по мере перехода к более слабым звездам все усиливается, вплоть до самых слабых звезд. Это показывает, что все наблюдаемые звезды входят в состав звездной системы — нашей Галактики.

Концентрация же галактик к плоскости сверхсистемы ослабевает по мере перехода к слабым галактикам. По данным Б. А. Воронцова-Вельяминова она еще обнаруживается у галактик до 18-й звездной величины, но у более слабых вовсе исчезает.

Этот результат показывает, что не все галактики входят в состав сверхсистемы. Наиболее удаленные из галактик находятся вне ее, так что сверхсистема галактик это не то же для галактик, чем является наша Галактика для звезд, — это не Метагалактика.

Тем не менее значение сверхсистемы галактик для общей структуры Вселенной велико. Сверхсистема по размерам значительно превосходит скопления галактик. Число галактик, входящих в ее состав, исчисляется не тысячами, как в крупных скоплениях, а многими десятками тысяч, возможно, достигает ста тысяч. Кроме того, знаменательно, что сверхсистема сильно сжата. Ее размеры вдоль главной плоскости приблизительно в пять раз больше размеров в направлении, перпендикулярном к плоскости. Это — новое явление в системах галактик, так как скоплений галактик с заметным сжатием не наблюдается. Сжатие сверхсистемы указывает на ее вращение.

Невращающиеся системы сферичны, а вращающиеся сжаты.

Диаметр сверхсистемы можно оценить в 30 Мпс. Галактика находится далеко от ее центра и вообще близка к краю. Ее расстояние от внешней границы сверхсистемы 2—4 Мпс. Центр сверхсистемы находится в скоплении галактик в Деве, а само это скопление может рассматриваться как ядро сверхсистемы.

Не только оптическое излучение галактик показывает концентрацию к плоскости сверхсистемы галактик. Общее радиоизлучение, исходящее от неба, также обнаруживает явную концентрацию к той же плоскости. Так как радиоизлучение неба в значительной степени вызывается галактиками, то в этом можно видеть подтверждение реальности сверхсистемы галактик.

Таковы данные о следующей открывшейся нам ступени в строении Вселенной. Как ребенок, уже освоивший свою комнату, дом и переулок, открывает существование проспекта, в который упирается переулок, так и мы только недавно узнали о важном проспекте во Вселенной — основной плоскости сверхсистемы, от которого отходит наш переулок — Местная система галактик. Скопление галактик в Деве — главная площадь на пути этого проспекта.

Исследуя распределение очень слабых галактик, Вокулер нашел многочисленное плотное собрание их в одном из участков южного неба. Предварительное изучение этого собрания слабых галактик привело Вокулера к выводу, что оно имеет сходство с нашей сверхсистемой и является, по-видимому, соседней сверхсистемой галактик.

Расширение Вселенной. Модель Вселенной

По мере усовершенствования наблюдательной техники становится доступным измерение красных смещений спектров у все более слабых объектов. Список спектров, у которых $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} > 1$, уже стал обширным, а самое большое обнаруженное красное смещение спектра соответствует $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3,4$.

Согласно формуле (23) это означает скорость удаления 270 000 км/с. Примем как наиболее вероятное значение постоянной Хаббла равным 65 км/с · Мпс. Тогда расстоя-

ние до объекта по формуле (22) составляет 4200 мегапарсеков.

Все более становится очевидным, что закон разбегания во все стороны галактик является универсальным, всеобщим законом. Происходит расширение, экспансия всей Вселенной в целом.

Раздел астрономии, изучающий свойства Вселенной как единого целого, называется космологией. Ее теоретические основы, заложенные Эйнштейном, опираются на два главных наблюдаемых явления. Первое из них состоит в том, что галактики и их скопления сравнительно равномерно распределены по небу, если не считать зоны избегания, вызванной поглощающей свет материей нашей Галактики. Второе важное наблюдаемое явление — закон разбегания во все стороны галактик со скоростями, пропорциональными их расстояниям. Сопоставление этих наблюдаемых явлений приводит к заключению, что Вселенная, образовавшись в результате начального взрыва, подобна однородному расширяющемуся шару.

Каковы закономерности эволюции этого расширяющегося шара, в котором галактики и их скопления притягивают друг друга согласно закону всемирного тяготения? Что ждет Вселенную в будущем? Будет ли она безгранично расширяться, или взаимное тяготение отдельных ее частей, замедлив и остановив расширение, заставит Вселенную затем сжиматься?

Процесс расширения происходит согласно релятивистской механике Эйнштейна, но некоторые стороны процесса понятны и в представлениях привычной нам ньютоновской механики.

Из того, что взаимное тяготение отдельных частей Вселенной замедляет ее расширение, следует, что расширение в прошлом происходило быстрее и, следовательно, в оценку возраста Вселенной нужно внести поправку — его нужно уменьшить. Величина поправки зависит от средней плотности материи во Вселенной. Чем плотность материи больше, тем сильнее замедление скорости и тем значительнее должна быть вносимая поправка.

Если при данной скорости расширения плотность материи в шаре достаточно велика, то гравитационные силы будут в состоянии остановить расширение и сменить его сжатием. Если же плотность материи мала и гравитационные силы, следовательно, слабы, процесс экспансии никогда не прекратится, Вселенная будет расширяться без-

гранично и средняя плотность материи в ней будет стремиться к нулю.

Существует, очевидно, некоторое критическое значение средней плотности материи — ρ_0 . Если при действующем в настоящий момент значении постоянной Хаббла H средняя плотность материи во Вселенной больше ρ_0 , то в будущем расширение Вселенной прекратится и сменится сжатием. Если же плотность равна ρ_0 или меньше его, то экспансия Вселенной будет продолжаться безгранично.

Справедливо и обратное утверждение. Когда задана средняя плотность материи во Вселенной, то существует некоторое критическое значение постоянной Хаббла H_0 . Если действительное H меньше H_0 , то расширение Вселенной сменится сжатием, если же $H \geq H_0$, то экспансия Вселенной будет безгранична.

Эти соотношения по смыслу близки к соотношениям, связывающим среднюю плотность Земли и критическую (вторую космическую) скорость, которую нужно придать какому-то телу, находящемуся на ее поверхности, чтобы оно бесконечно удалилось от Земли, не упав обратно на ее поверхность. Разница лишь в том, что у Вселенной происходит расширение в целом, всех ее частей, а не отдельного ее элемента.

Согласно законам релятивистской теории относительности, а именно ее законам подчиняется расширяющаяся Вселенная, процессу расширения свойственны непривычные для нашего сознания соотношения между понятиями пространства, материи и времени. Если средняя плотность материи больше ρ_0 и расширение должно смениться сжатием, то гравитация материи замыкает пространство на само себя. Не существует пространства вне расширяющегося объема, содержащего материю. Такую Вселенную принято называть закрытой.

Пространство закрытой Вселенной ограничено. Но при этом Вселенная не имеет ни центра, ни граничных областей, все точки в ней равноправны по занимаемому положению.

Чтобы попытаться понять, как это может быть с трехмерным пространством, полезно рассмотреть ее двумерную аналогию — поверхность сферы. Поверхность сферы имеет ограниченную площадь, все точки на ней по занимаемому положению равноправны, нет ни центральных ни граничных точек.

Так же непривычны нашим представлениям законы геометрии, действующие во Вселенной с плотностью материи, большей критического значения ρ_0 . Они отличаются от законов евклидовой геометрии, которой на нашей планете обучают в школах. В этой геометрии, называемой римановой, через точку вне прямой нельзя провести прямую, ей параллельную. Сумма углов в треугольнике не равна двум прямым. Она тем больше двух прямых, чем больше площадь треугольника. Длина окружности в римановой геометрии растет не пропорционально первой степени радиуса, а медленнее. И площадь круга растет не пропорционально квадрату радиуса, а медленнее.

Чтобы помочь нашему сознанию поверить в возможность осуществления в каком-то трехмерном пространстве таких закономерностей, обратимся снова к двумерной аналогии — поверхности сферы. Кратчайшая линия на любой поверхности, соединяющая две точки, называется геодезической линией. На сфере кратчайшее расстояние между двумя точками определяется длиной дуги большого круга, т. е. круга, получаемого пересечением сферы плоскостью, проходящей через ее центр. Поэтому аналогами прямых в пространстве, на сфере являются дуги больших кругов. Но всякий большой круг, проведенный через некоторую точку, пересекает другой фиксированный большой круг. Сумма углов сферического треугольника, т. е. треугольника, составленного из трех дуг больших кругов, действительно больше двух прямых углов. Она тем больше, чем больше площадь поверхности треугольника. И длина окружности на сфере, радиусом r которой является длина дуги большого круга, соединяющего центр окружности с точкой окружности, меньше, чем $2\pi r$. А площадь круга меньше, чем πr^2 .

Только в том случае, когда рассматривается бесконечно малый сферический треугольник, сумма его углов равна двум прямым, и только у окружности бесконечно малого радиуса на сфере длина равна $2\pi r$, а у соответствующего круга площадь поверхности равна πr^2 .

В соответствии с релятивистской теорией человек в его обыденной жизни и даже при выполнении космических полетов наших дней не обнаруживает отклонений от законов, постулируемых евклидовой геометрией, только потому, что объем области пространства, в котором он оперирует, ничтожно мал в сравнении с объемом пространства Вселенной в целом.

Если средняя плотность материи во Вселенной точно оказывается равной критическому значению ρ_0 , то в этом случае (который нужно, конечно, считать крайне маловероятным) во всем трехмерном пространстве Вселенной действуют законы евклидовой геометрии. Двумерной аналогией такого пространства является поверхность плоскости.

Если же в природе осуществилась третья возможность, средняя плотность материи во Вселенной меньше критического значения ρ_0 , то в пространстве бесконечно расширяющейся открытой Вселенной должны действовать законы еще одной геометрии — геометрии Лобачевского. В таком пространстве через точку, лежащую вне прямой, можно провести бесчисленное множество прямых, ей параллельных, сумма углов треугольника меньше двух прямых, а длина окружности и площадь круга больше, чем соответственно $2\pi r$ и πr^2 .

Некоторой двумерной аналогией такого пространства может служить гиперболический параболоид, имеющий седлообразную форму, на поверхности которого прямые, треугольники и окружности, построенные на основе геодезических линий, соответствуют свойствам геометрии Лобачевского. Данная двумерная аналогия, однако, не вполне отвечает безгранично расширяющейся Вселенной, так как гиперболический параболоид имеет центр, а расширяющаяся Вселенная центра не имеет.

Интересно отметить, что когда Н. И. Лобачевский и немецкий математик Риман создали свои неевклидовы геометрии, многие их коллеги считали, что, хотя полученные построения логически безупречны, они не могут найти какого-нибудь применения. Прошло несколько десятилетий и оказалось, что большой мир, в котором мы живем, подчиняется законам одной из этих двух геометрий. Только потому, что деятельность человека ограничена пока очень малой областью пространства, отклонения его закономерностей от геометрии Евклида ничтожны и не могут быть обнаружены.

В какой же Вселенной мы живем? В открытой или закрытой?

При значении постоянной Хаббла $65 \text{ км/с} \cdot \text{Мпс}$ критическая плотность материи для Вселенной $\rho_0 = 8 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$. Следовательно, нужно определить, больше или меньше этой величины реальная средняя плотность материи в ней.

Оценка средней плотности материи во Вселенной одна из наиболее трудных задач. Необходимо, во-первых, как-то определять массы галактик, во-вторых, находить среднее число галактик в единице объема и, наконец, постараться учесть вклад в общую плотность материи диффузного межгалактического вещества, а может быть, и твердых тел, подобных планетам и астероидам.

До последнего времени оценки, которые удается сделать, приводят к величинам, лежащим в пределах от $2 \cdot 10^{-31}$ до $5 \cdot 10^{-31}$ г/см³, т. е. к плотностям, более чем в десять раз уступающим критической плотности материи. Из этого следует, что Вселенная бесконечно расширяется, является открытой.

РАДИОИССЛЕДОВАНИЯ ГАЛАКТИК

Вопрос о прозрачности земной атмосферы

На вопрос, прозрачна ли земная атмосфера, самый простой и точный ответ, казалось бы, такой: при отсутствии облачности земная атмосфера прозрачна, а при сплошной облачности непрозрачна. На самом деле поставленный вопрос гораздо более сложен.

Каждое тело излучает электромагнитные колебания всех возможных частот. Распределение энергии по частотам зависит от температуры излучающего тела. Чем выше температура, тем большая доля энергии излучения приходится на высокочастотные кванты. Для каждой температуры излучения существует длина волны λ_m , в которой энергия излучения максимальна. Чем больше отличается некоторая длина волны λ (как в сторону коротких, так и в сторону длинных волн) от λ_m , тем меньше энергии излучения тела приходится на эту длину волны. Температура тела T и длина волны λ_m , в которой энергия излучения тела максимальна, связаны простым соотношением

$$\lambda_m \cdot T = 0,2897, \quad (24)$$

называемым законом Вина. Здесь длина волны выражена в сантиметрах, температура T в кельвинах.

Из этого закона, например, следует, что максимум излучения звезды с температурой поверхности 4000 К приходится на длину волны $7,24 \cdot 10^{-5}$ см, что соответствует красным лучам, а для звезды с температурой 8000 К — на $\lambda = 3,62 \cdot 10^{-5}$ см (фиолетовая область спектра). В результате смещения излучений всех длин волн первая звезда наблюдается нами как красная, а вторая как белая.

Температура поверхности Солнца 6000 К. Максимум энергии излучения при такой температуре приходится на длину волны $4,83 \cdot 10^{-5}$ см; это желтые лучи.

Чтобы видеть окружающие предметы на Земле, человек использует освещенность их солнечным светом. Поэтому в ходе эволюции человеческий глаз приспособился улавливать электромагнитные колебания с длинами волн, в которых энергия излучения Солнца достаточно велика. Это — участок спектра от $3,8 \cdot 10^{-5}$ до $7,8 \cdot 10^{-5}$ см, от фиолетовых до красных лучей, содержащий, разумеется, в себе длину волны, в которой энергия излучения Солнца максимальна. Для электромагнитных колебаний с длинами волн, находящимися вне упомянутого участка, человеческий глаз слеп.

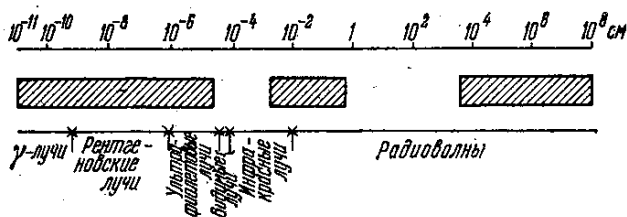


Рис. 106. Спектр электромагнитных колебаний и два основных окна в атмосфере Земли.

Но, повторим еще раз, каждое тело излучает во всех длинах волн и излучение всех длин волн несет сведения об излучающем теле.

Для всестороннего исследования звезд, галактик и других объектов нужно принимать и анализировать свойства их излучения во всех частотах. Чем обширнее будут исследованные области спектра, тем полнее будут полученные данные.

Поэтому при ответе на вопрос, прозрачна ли земная атмосфера, нужно иметь в виду все длины волн, а не только излучение узкого участка спектра, доступное человеческому глазу.

Рассмотрим область спектра от длин волн 10^{-10} см до длин волн 10^{+8} см. Эта область охватывает практически все излучение тел, с которыми имеют дело астрономия и физика. Построим логарифмическую шкалу длин волн так, чтобы каждая единица длины шкалы соответствовала увеличению длины волны в 100 раз (рис. 106).

На этом рисунке указано также принятое в физике разбиение всего диапазона длин волн на отдельные области: гамма-лучей (самых коротковолновых), затем рентгеновских, ультрафиолетовых, видимых, инфракрасных и

радиолучей. Мы видим, что на долю видимых лучей, которые до сравнительно недавнего времени только и использовались в астрономии, приходится очень малая область всего диапазона длин волн. Если, используя эту узенькую область, астрономия все-таки добилась больших успехов, то каких замечательных результатов она достигнет, когда научится добывать сведения, анализируя излучение всех длин волн.

Однако это трудно сделать, так как для многих областей длин волн атмосфера Земли оказалась непрозрачной. На рис. 106 штриховкой показаны области длин волн, по разным причинам не пропускаемых земной атмосферой. Мы видим, что имеется лишь два окна прозрачности. Одно из них охватывает область видимых лучей, часть ультрафиолетовой и часть инфракрасной области. Другое окно прозрачности расположено в области радиолучей, простирается приблизительно от длин волн 0,9 см до 90 м.

Если при выполнении наблюдений не выходить за пределы земной атмосферы, то возможно использование только излучения, проходящего сквозь окна прозрачности. До сороковых годов нашего столетия астрономия использовала только одно из этих окон, и лишь в наши дни энергичное освоение проходящего сквозь атмосферу излучения в радиоволнах и в нескольких узких интервалах длин волн инфракрасного излучения, для которых атмосфера также прозрачна, позволило сделать новые крупные шаги в исследовании Вселенной.

На искусственных спутниках Земли теперь стали устанавливать телескопы, позволяющие выполнять наблюдения в «запретных» раньше длинах волн дальнего ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения. Уже первые полученные здесь результаты привели к интереснейшим открытиям. И можно говорить о возникновении, наряду с радиоастрономией, инфракрасной, рентгеновской и гамма-астрономии. Астрономия стала вести наступление на загадки Вселенной по всему фронту длин волн.

Космическое радиоизлучение

Открытие явления космического радиоизлучения было сделано в 1931 г. Янским (США). Исследуя радишум, создаваемый излучением с длиной волны 14,6 м, он заметил, что значительная часть радишума связана с определенным направлением. Это направление изменялось

с течением времени, и характер зависимости направления от времени дня и времени года привел Янского к выводу, что приходящее излучение связано с областью ядра Галактики.

Однако ряд лет открытие Янского оставалось незамеченным. Лишь работы Рёбера (США), выполненные в 1940—1944 гг., привлекли к радиометодам изучения Вселенной необходимое внимание. Началось энергичное строительство радиотелескопов, подвижных и неподвижных, усовершенствовались методы наблюдений. Была создана новая отрасль астрономии — радиоастрономия.

В радиоастрономии используются длины волн в десятки тысяч, сотни тысяч и миллионы раз бóльшие, чем в оптических наблюдениях. Это, с одной стороны, дает большие преимущества, а с другой стороны, вызывает и значительные трудности.

Основное преимущество состоит в том, что большая длина волны резко понижает требования к точности поверхностей отражающего лучи зеркала телескопа. Важно, чтобы неровности поверхности были малы в сравнении с длиной волны излучения. Поэтому радиотелескопы можно делать без такой тщательной шлифовки поверхности, как оптические, и сооружать их из металла, а не из стекла. В то время как диаметр самого большого оптического телескопа равен 6 м, диаметры подвижных радиотелескопов уже достигли 100 м. Они собирают электромагнитное излучение с площади в сотни раз большей, чем самый большой оптический телескоп.

Еще бóльшую суммарную площадь антенны имеют составные радиотелескопы. Например, австралийский кольцевой радиотелескоп состоит из 96 антенн, каждая диаметром в 13 м, установленных вдоль окружности диаметром в 13 км. А радиотелескоп РАТАН-600, введенный в эксплуатацию в 1974 г. близ станции Зеленчукской на Северном Кавказе и состоящий из кругового, диаметром 576 м, отражателя, содержащего 895 антенных секций, и плоского отражателя, включающего 124 секции, имеет еще более значительную суммарную площадь антенн. Такие радиотелескопы способны регистрировать излучение меньшей мощности, чем оптические телескопы. Если какой-нибудь объект излучает одинаковое количество энергии в радиодиапазоне и в оптическом диапазоне частот, то на некотором расстоянии от нас его уже будет невозмож-

но оптически наблюдать, а радиоизлучение еще будет уверенно приниматься.

Другим преимуществом радиоволн является прозрачность для них всех типов облаков, так что наблюдения можно вести в любую погоду. Прозрачна для них и межзвездная пыль.

Недостатки, вызываемые использованием излучения с большой длиной волны, состоят в том, что при этом уменьшается точность определения направления на источник излучения и возникают трудности в изучении тонкой структуры излучающих объектов. Разрешающая способность телескопа, т. е. минимальное угловое расстояние между двумя точками, которые телескоп может фиксировать раздельно, не сливая их в одну, определяется формулой

$$\alpha = 2,5 \cdot 10^5 \cdot \frac{\lambda}{D}, \quad (25)$$

где λ — длина волны принимаемого излучения, D — диаметр объектива телескопа, α — разрешающая способность в секундах дуги.

Для оптических телескопов, ввиду малости длины волны излучения, α получается равным очень малой доле секунды. Для радиотелескопов же положение иное. Если при помощи 100-метрового радиотелескопа принимать даже самое коротковолновое из доступных радиоизлучение — $\lambda = 1$ см, то α получается равным $25''$. Для всех других волн и других полноподвижных несоставных радиотелескопов α значительно больше, выражается минутами дуги. Это означает, что радиотелескоп не может точно фиксировать положение точечного источника и не может отличить источник излучения с диаметром в несколько минут от точечного источника.

В составных телескопах роль диаметра объектива играет диаметр окружности, вдоль которого расставлены антенны. Поэтому α у радиотелескопа РАТАН-600 почти в 6 раз, а у австралийского кольцевого в 30 раз меньше, чем у 100-метрового радиотелескопа.

Но основным успех в достижении высокой разрешающей способности в радиоастрономии был достигнут путем применения радиоинтерферометров. В этом методе два радиотелескопа действуют синхронно, находясь возможно далеко друг от друга. Тогда получаемые ими совместно синхронные наблюдения обладают разрешающей способ-

ностью, которая получается по формуле (25), где D — расстояние между радиотелескопами, так называемый базис радиointерферометра.

В настоящее время радиointерферометрические наблюдения проведены для значительного числа объектов при весьма больших базисах, вплоть до 10 тыс. км. В этих случаях радиотелескопы размещаются на различных континентах. По формуле (25) можно подсчитать, что разрешающая способность радиointерферометров может достигать нескольких десятитысячных долей секунды дуги, так что точность определений положений и величин диаметров источников излучения в радиоастрономии теперь даже выше, чем в оптической астрономии.

Радиотелескопы настраиваются на определенную длину волны. Наблюдения показали, что со всех участков неба к нам идет радиоизлучение и притом во всех длинах волн. Для многих длин волн уже выполнены обзоры обширных участков неба, т. е. определена интенсивность излучения в этой длине волны для множества направлений, заполняющих избранную область неба.

Как правило, интенсивность радиоизлучения возрастает при приближении к галактическому экватору. Следовательно, источники радиоизлучения, как и многие другие наблюдаемые объекты, обнаруживают галактическую концентрацию.

Дискретные источники радиоизлучения

Самым интересным результатом выполненных обзоров неба на различных длинах радиоволн явилось открытие большого числа дискретных, т. е. точечных или почти точечных источников радиоизлучения. Помимо того, что слабое радиоизлучение приходит практически со всех направлений, имеется много точек на небе, в которых оно особенно сконцентрировано. Это показывает, что в данных направлениях находятся какие-то тела, являющиеся достаточно сильными источниками радиоизлучения.

Ряд лет основным каталогом дискретных источников радиоизлучения был изданный в 1959 г. третий Кэمبرиджский каталог, составленный Эджем, Шейкшафтом, Адамом, Болдуином и Арчером. Каталог содержит 471 дискретный источник радиоизлучения, расположенный между склонениями -22° и $+71^\circ$. Наблюдения произво-

дились на длине волны 1,68 м. Дискретные источники излучают во всех длинах радиоволн, так что расположение их на небе не изменится, если производить наблюдения на другой длине волны. Изменится, в общем случае, лишь измеренная интенсивность излучения. Для обозначения дискретных источников, входящих в этот Кэمبرиджский каталог, перед номером, под которым они в него входят, ставится обозначение ЗС, что означает «Третий кэمبرиджский».

Для южного неба первый каталог дискретных источников радиоизлучения по наблюдениям на длине волны 3,5 м был составлен австралийцами Милсом, Сли и Хиллом. Их каталог, называемый обычно Сиднейским, охватывает всю область неба между склонениями $+10^\circ$ и -80° и содержит 2270 источников радиоизлучения.

В настоящее время имеется уже большое число каталогов дискретных источников радиоизлучения, содержащих десятки тысяч объектов. В них, кроме точных положений, приводятся интенсивности излучения в различных длинах радиоволн. Сравнение их для одного и того же объекта позволяет делать выводы о его физических свойствах.

Какие же это тела, посылающие нам со всех направлений свои радиоволны?

Отождествление дискретных источников радиоизлучения с оптически наблюдаемыми объектами

В первые годы после открытия дискретных источников радиоизлучения в астрономии создалось несколько странное положение. В тех местах, где наблюдались интенсивные источники радиоизлучения, не обнаруживалось никаких приметных оптических объектов. С другой стороны, оптически яркие объекты, например звезды первой звездной величины, никак не проявляли себя в радиоизлучении. Исключением явилось лишь Солнце, радиоизлучение которого достаточно сильное.

Возникла проблема отождествления оптических и радиообъектов. Основная трудность вызывалась тем, что положение источника радиоизлучения определяется с низкой точностью. Поэтому соответствующий источнику радиоизлучения оптический объект нужно искать в целой площадке, содержащей десятки квадратных минут.

Как правило, в этой площадке ярких оптических объектов нет, а слабых объектов очень много, и нельзя решить, какой именно из них посылает зарегистрированное радиоизлучение. Поэтому в 1947—1950 гг. некоторые астрономы пришли к выводу о тщетности попыток отождествления и была выдвинута гипотеза о так называемых «радиозвездах». Предполагалось, что дискретными источниками радиоизлучения являются очень близкие звезды, имеющие низкие температуры, 500—2000 К. У таких звезд в силу закона Вина доля излучения, посылаемого в радиоволнах, больше, чем у звезд с высокими температурами, а доля оптического излучения меньше. При достаточной близости «радиозвезд» их радиоизлучение можно зарегистрировать, а оптическое излучение будет все-таки слишком слабым, останется неуловимым. Исследованиям «радиозвезд» было отдано много усилий. Разрабатывались методы определения их расстояний и других характеристик.

Однако стало ясно, что гипотеза «радиозвезд» противоречит имеющимся данным о массе Галактики. Для того чтобы наблюдалось большое число «радиозвезд», необходимо было считать, что очень близко около Солнца, на расстояниях, составляющих десятые и даже сотые доли парсека, находится много звезд с низкой температурой, но с ощутимыми массами. Представления о звездной плотности в окрестностях Солнца потребовали бы полного пересмотра. Ее нужно было бы считать в тысячи раз больше той, которая выводилась из оптических наблюдений. И, конечно, не было бы оснований считать, что высокая звездная плотность существует только в окрестностях Солнца. Данные о звездной плотности нужно было в тысячи раз увеличить во всех местах Галактики и оценивать общее число звезд в ней не как 10^{11} , а как 10^{14} или даже больше.

Массы «радиозвезд» могут быть меньше средней массы наблюдаемых звезд, но не в очень большое число раз. Если считать, что они в среднем в 20 раз меньше массы Солнца, то и в этом случае общая масса Галактики и средняя плотность материи в ней оказались бы по крайней мере в 100 раз больше, чем считали до гипотезы о «радиозвездах». Но в таком случае на основании законов звездной динамики, которые будут изложены в гл. VI, вращение Галактики должно было бы происходить в 10 раз быстрее, а относительная скорость

звезд в Галактике должна была быть в 10 раз больше, чем наблюдается. Скорость вращения Галактики и скорости движений звезд одна относительно другой определяются из наблюдений достаточно надежно, десятикратная ошибка здесь немыслима.

Поэтому, когда в 1949 г. удалось произвести первые отождествления источников радиоизлучения с оптическими объектами и эти объекты не были звездами, то несостоятельность гипотезы «радиозвезд» определилась окончательно.

Изучение распределения по небу дискретных источников радиоизлучения показало, что они делятся на две группы. Одна из них расположена в узкой полосе около галактического экватора и в этой полосе показывает сильную концентрацию к галактическому экватору. Вторая же группа, более многочисленная, состоит из источников, располагающихся вне этой полосы и распределенных по всему небу более или менее равномерно, без признаков концентрации к галактическому экватору.

Источники радиоизлучения первой группы, как и следовало ожидать, являются объектами, входящими в состав Галактики, так как только принадлежащие Галактике объекты обнаруживают концентрацию к ее плоскости. Некоторые из них уже отождествлены с газовыми туманностями и остатками газовой материи после вспышек новых и сверхновых звезд. Специфическая трудность отождествления галактических источников радиоизлучения состоит в том, что большинство из них находятся близ плоскости Галактики и на больших расстояниях от нас. В этом случае поглощение света очень велико и оптически наблюдать объекты нельзя. Для радиоволн же пылевая межзвездная среда прозрачна, радиоизлучение доходит беспрепятственно. Поэтому даже в перспективе можно надеяться на отождествление лишь тех объектов (кроме немногочисленных близких), которые случайным образом оказались в окнах видимости между облаками пылевой материи. Большинство галактических дискретных источников радиоизлучения ожидает «участь неотожествляемости».

Источники радиоизлучения второй группы могли бы быть очень близкими звездами, так как звезды, расстояния которых намного меньше толщины Галактики, не обнаруживают галактической концентрации. Но это были бы тогда гипотетические «радиозвезды», существование

которых опровергается, как мы указывали выше, динамическими соображениями.

Оставалось предположение, что это внегалактические объекты, тогда отсутствие концентрации этих источников к плоскости Галактики тоже будет понятно. Из внегалактических объектов были известны только галактики. Но при сопоставлении галактик с источниками радиоизлучения обнаруживалось странное обстоятельство. Большая часть ярких галактик не показывала никакой связи с этими источниками. В тех площадках, в которых регистрировалось радиоизлучение, как правило, наблюдались лишь слабые галактики. Если бы каждая из этих галактик являлась источником радиоизлучения, то, поскольку слабых галактик очень много и они расположены на небе близко друг к другу, а разрешающая сила радиотелескопов невелика, все действующие точечные радиоисточники слились бы при наблюдениях в сплошной фон излучения. Дискретных источников радиоизлучения не обнаруживалось бы.

Оставались две последние возможности объяснения. Можно было допустить, что источники радиоизлучения второй группы — это внегалактические объекты, но не галактики, а тела пока неизвестной природы и оптически еще не наблюдавшиеся.

Второй выход состоял в предположении, что большинство галактик не излучает радиоволн или излучает их очень слабо, некоторые же галактики, составляющие ничтожное меньшинство, вследствие какой-то причины, каких-то происходящих в них процессов, являются излучателями радиоволн. Тогда среди многих слабых галактик, заполняющих площадку неба, из которой приходит радиоизлучение, явление дискретного источника радиоизлучения создает лишь одна — та, которая по какой-то причине обладает мощным радиоизлучением.

Исследования последних тридцати лет показали справедливость второго предположения.

В 1949 г. Болтон, Стенли и Сли отождествили с двумя дискретными источниками радиоизлучения галактики NGC 5128 и NGC 4486. После этого выполнено большое число таких отождествлений, и уже можно утверждать, что большую часть дискретных источников радиоизлучения составляют галактики. Значительно также число отождествлений с диффузными туманностями нашей Галактики, в том числе с остатками выброшенных оболочек сверхновых звезд.

Но наиболее интересной стороной явления дискретных источников радиоизлучения оказалось открытие, состоящее в том, что многие из них принадлежат к классам тел необычайной, не известной ранее природы.

Нормальные галактики

Нормальными в отношении радиоизлучения галактиками условились называть галактики, у которых энергия излучения в радиоволнах гораздо (в десятки и сотни тысяч раз) меньше их энергий излучения в оптических волнах. Таких галактик подавляющее большинство. В первые годы развития радиоастрономии у многих оптически ярких нормальных галактик не удавалось зарегистрировать радиоизлучение вследствие его слабости. Теперь, в связи с увеличением мощности радиотелескопов и усовершенствованием методов приема, у большинства ярких галактик радиоизлучение уловить удастся. Так, при помощи 91-метрового радиотелескопа Национальной радиоастрономической обсерватории США в 1963 г. было зарегистрировано радиоизлучение более чем у половины исследованных галактик типов Sb, Sc и I I ярче 11-й видимой звездной величины. У нормальных галактик типов E, S0 и I II радиоизлучение значительно слабее и составляет по количеству энергии лишь миллионные доли энергии, излучаемой в оптическом диапазоне. В настоящее время известно только несколько десятков отождествлений радиоисточников излучений с галактиками этих типов. Радиоизлучение спиралей Sa тоже значительно уступает по мощности радиоизлучению спиралей поздних типов.

Чем отличаются друг от друга типы галактик Sb, Sc и I I, с одной стороны, и типы E, S0 и I II, с другой? Тем, что первые богаты диффузной материей, а вторые почти лишены ее. Поэтому следует думать, что радиоизлучение связано с диффузной материей. Внутри первой группы наиболее активны в радиодиапазоне галактики Sc, затем Sb. Можно поэтому полагать, что радиоизлучение тем интенсивнее, чем развитее спиральные ветви.

Радиогалактики

Особый интерес представляют галактики с резко повышенной светимостью в радиоизлучении. Их принято называть радиогалактиками.

Наиболее выдающаяся радиогалактика — Лебедь А. Это мощнейший дискретный источник радиоизлучения. В том месте неба, где он находится, никаких оптически ярких объектов нет. Но подробное рассмотрение слабых галактик в этом месте позволило все-таки разыскать виновника мощного радиоизлучения. Им оказалась слабенькая, 18-й видимой звездной величины, двойная галактика

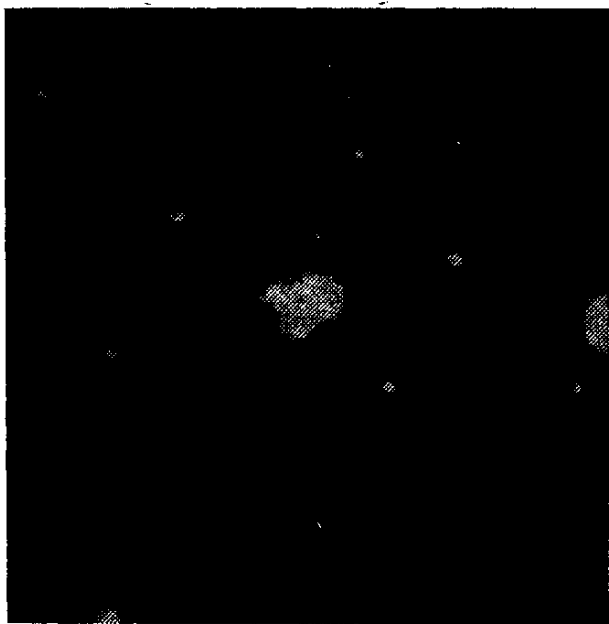


Рис. 107. Фотография двойной галактики — источника радиоизлучения Лебедь А.

с чрезвычайно тесно расположенными друг к другу компонентами. Эта галактика ввиду ее слабости в каталог NGC, конечно, не попала. Ее называют Лебедь А, потому что в созвездии Лебеда она является самым интенсивным источником радиоизлучения. Фотография этой галактики приведена на рис. 107.

Особенностью этой двойной галактики является также необычный спектр излучения. Спектр удалось получить при помощи 5-метрового телескопа, несмотря на то, что галактика очень слабая. В нем много ярких запрещенных линий элементов, т. е. таких спектральных линий, кото-

рые в обычных условиях не возникают. Более 50% всего оптического излучения галактики принадлежит этим эмиссионным линиям. Спектр показал также сильное красное смещение, что позволило определить расстояние, оказавшееся равным 200 Мпс. Зная видимую звездную величину и расстояние, можно вычислить абсолютную звездную величину двойной галактики. С учетом поглощения света в нашей Галактике получается $M = -20^m,5$. Таким образом, Лебедь А — сверхгигантская галактика, превосходящая по светимости даже нашу Галактику. Можно подсчитать, что она излучает в оптическом диапазоне частот $2 \cdot 10^{37}$ джоулей в секунду, а в радиодиапазоне $3 \cdot 10^{37}$ Дж/с. Это единственный случай для галактик, когда сравнение энергий показало преобладание энергии радиоволн над энергией оптического излучения.

Объекты, подобные галактике Лебедь А, безусловно, очень редки в Метагалактике. Это очевидно из того, что ближе расстояния 200 Мпс нет ни одного столь мощного источника радиоизлучения. Но, конечно, Лебедь А не единственный объект подобного рода во Вселенной. Другие такие объекты должны находиться на еще больших расстояниях. Поток приходящего от них радиоизлучения ввиду большего расстояния слабее, чем от источника Лебедь А, но все-таки радиотелескопы могут их обнаруживать. Оптическое же отождествление таких далеких объектов становится невозможным: соответствующие им галактики слишком слабы.

Есть все основания думать, что среди большого числа дискретных источников радиоизлучения, не поддающихся до сих пор отождествлению с оптическими объектами, часть является чрезвычайно далекими галактиками, подобными объекту Лебедь А. Современные радиотелескопы способны обнаруживать дискретные источники радиоизлучения, поток энергии которых в 8000 раз слабее, чем у галактики Лебедь А. Следовательно, те из самых слабых регистрируемых дискретных источников радиоизлучения, которые по своей физической природе аналогичны источнику Лебедь А, должны находиться на расстоянии в $\sqrt{8000} \approx 90$ раз большем, чем Лебедь А. Отношение расстояний на самом деле не столь велико, так как интенсивность излучения ослабляется также значительным на столь больших расстояниях красным смещением спектров источников радиоизлучения. Расстояние этих слабых источников радиоизлучения (если они имеют такую же при-

роду, как источник Лебедь А) можно оценить в 4000 Мпс. Радиоизлучение от этих возможных объектов должно путешествовать к нам около 12 млрд. лет!

На таких расстояниях галактики оптически наблюдаются не могут. (Лебедь А, например, имел бы 27-ю видимую звездную величину, совершенно неуловимую современными телескопами.) Радиоастрономия в несколько раз расширила доступную исследованиям область Вселенной.

Вернемся, однако, к самому объекту Лебедь А. В чем причина его необычайно мощного радиоизлучения?

Американские астрономы Бааде и Минковский предположили, что Лебедь А — это встретившиеся и проникающие друг в друга спиральные галактики. При столкновении спиралей на большой скорости встречаются диффузные массы. Происходит их разогрев и начинается свечение, в котором ввиду не очень высокой температуры значительную долю занимает радиоизлучение. Эта точка зрения может получить развитие, если предполагать, что при встрече диффузных масс значительная доля их кинетической энергии столкновения переходит в энергию относительно небольшого числа так называемых релятивистских частиц, т. е. частиц, движущихся с огромными скоростями. Релятивистские частицы, проходя через магнитные поля, замедляют свое движение, их кинетическая энергия уменьшается и при этом излучается энергия преимущественно в виде радиоволн, но также и в оптическом диапазоне.

На важную роль этого механизма излучения, вызываемого движением релятивистских частиц в слабых магнитных полях, впервые указал И. С. Шкловский. Возникающее таким образом излучение принято называть синхротронным, потому что оно было обнаружено в ускорителе элементарных частиц — синхротроне.

Известны еще два случая, когда отождествленные с оптическими объектами источники радиоизлучения обладают тем свойством, что энергия радиоизлучения сравнима с энергией оптического излучения. Это Гидра А и Геркулес А. У них энергия радиоволн только в четыре раза меньше энергии световых волн. В обоих этих случаях отождествляемые галактики снова оказались двойными.

Несколько ярких галактик, входящих в каталог NGC, также отнесены к разряду радиогалактик потому, что их радиоизлучение аномально сильное, хотя оно значи-

тельно уступает по энергиям световому излучению. Из этих галактик NGC 1275, NGC 5128, NGC 4782 и NGC 6166 также являются двойными. Бааде и Минковский считали, что эти факты подтверждают их гипотезу случайного образования радиогалактик при столкновениях звездных систем, содержащих в себе диффузную материю.

Противоположную точку зрения на природу радиогалактик высказал В. А. Амбарцумян. Он указал, что изучение снимка источника радиоизлучения Лебедь А убеждает в том, что если наблюдается столкновение двух галактик, то это столкновение — центральное с точным попаданием ядра в ядро. Между тем центральные столкновения должны происходить гораздо реже, чем нецентральные. Для встречи диффузной материи двух звездных систем и образования радиогалактики по гипотезе Бааде и Минковского вовсе нет необходимости в центральном столкновении. Достаточно и нецентрального столкновения, которое приведет к созданию несколько менее мощной радиогалактики. Поэтому в случае правильности гипотезы столкновения должно было бы наблюдаться много радиогалактик, образованных нецентральным сталкивающейся парой галактик. Среди таких радиогалактик многие должны были бы находиться ближе и наблюдаться отчетливее, чем Лебедь А. Но ничего подобного нет. Более того радиогалактика NGC 5128 также, если допустить гипотезу столкновения, представляет собой пример строго центрального столкновения, что в рамках гипотезы столкновения кажется еще более удивительным.

В. А. Амбарцумян считает, что радиогалактики являются результатом процесса разделения первоначального тела на два тела — две удаляющиеся друг от друга галактики. Стадия деления — переход материи из более плотного состояния в менее плотное — вызывается взрывными процессами, которые сопровождаются интенсивным радиоизлучением.

Радиогалактика, следовательно, есть стадия, через которую проходит каждая галактика в самый ранний период своего развития. В гипотезе деления естественно объясняется тесное и взаимно центральное расположение компонентов двойных радиогалактик. Однако не вполне раскрытым остается механизм образования радиоизлучения. Но нужно иметь в виду, что мы не знаем аналогов

такого грандиозного процесса, как возможный процесс разделения галактик в результате взрыва, и потому неудивительно, что сам механизм взрыва и сопровождающие его процессы пока остаются неясными. Однако можно предполагать, что при взрыве радиогалактики, как и при вспышке сверхновой, образуется большое количество частиц, летящих с огромными скоростями в магнитных полях и порождающих синхротронное излучение. Это излучение, по-видимому, составляет главную часть оптического излучения и полностью определяет радиоизлучение радиогалактики. Характерно, что районы радиоизлучения обычно простираются далеко за пределы оптически наблюдаемой области радиогалактики. Должно быть, в эти районы уже проникли релятивистские частицы.

Радиоисточник Лебедь А излучает в радиодиапазоне и оптическом диапазоне 10^{38} Дж/с. Стадия радиогалактики не может быть длительной. Можно предположить, что она длится около 1 млн. лет. Тогда за период пребывания в стадии радиогалактики типа Лебедь А излучается $3 \cdot 10^{51}$ Дж. Эта энергия (синхротронного излучения) вызвана замедлением движения релятивистских частиц в магнитных полях. Но это только небольшая доля — от 0,01 до 0,001 всей энергии, развязанной взрывом. Поэтому энергию взрыва радиогалактики нужно оценить в $10^{53} - 10^{54}$ Дж. При полном переходе водорода Солнца в гелий выделится 10^{45} Дж. Значит, энергия взрыва радиогалактики равна энергии перехода водорода в гелий почти у миллиарда солнц. У Солнца этот переход протекает около десяти миллиардов лет. А у радиогалактики энергия, равная энергии перехода водорода в гелий у миллиарда солнц, освобождается мгновенно в результате грандиозного взрыва.

Не все радиогалактики являются двойными системами. NGC 2623 и NGC 4486 — одиночные объекты. У них, так же как и у двойных радиогалактик, в спектрах есть яркие запрещенные линии. Кроме того, у этих галактик имеются своеобразные черты, выделяющие их из среды других галактик.

Особенно интересна сверхгигантская радиогалактика NGC 4486. Мы уже писали о ней в гл. III (рис. 77), отмечая, что она обладает самой большой из известных масс галактик и окружена самой богатой системой шаровых скоплений. Но у этой галактики имеется еще одна замечательная особенность. Фотография ее центральной

части, выполненная на 5-метровом телескопе при значительном увеличении и сравнительно небольшой экспозиции, показывает (рис. 108), что NGC 4486 имеет маленькое яркое ядро, из которого выброшена прямая тонкая струя светящейся материи. У этого светящегося выброса, имеющего длину 22" или в линейной мере около

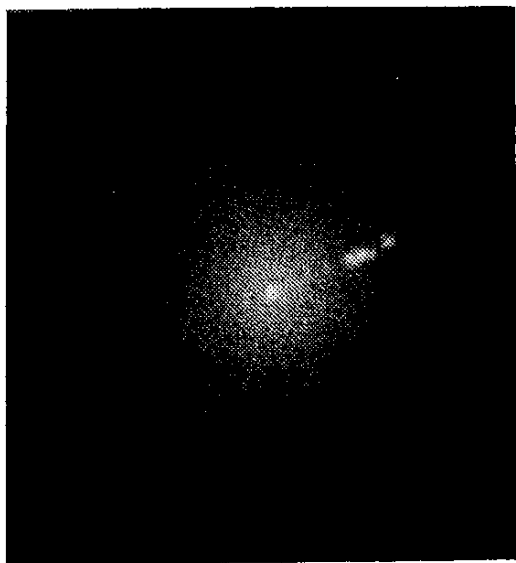


Рис. 108. Фотография центральной части радиогалактики NGC 4486.

1000 пс, спектр излучения такой, какой должен создаваться релятивистскими частицами, движущимися в магнитных полях. Это подтверждает наличие быстрых движений и то предположение, что наблюдаемая полоса есть выброс, который может быть произведен только из ядра галактики.

Таким образом, мы снова встречаемся с явлением активности ядер галактик, причем активность носит характер взрывного процесса. Любопытно, что выброс наблюдается только в одну сторону от ядра. Это, казалось бы, является нарушением законов физики. Согласно третьему закону Ньютона всякий выброс из ядра в некотором направлении должен компенсироваться выбросом в противоположном направлении.

Долгое время односторонний характер выброса в NGC 4486 служил пищей для различного рода догадок и предположений. Однако в 1967 г. Арпу удалось получить снимки NGC 4486, на которых видна и полоска светящейся материи, выходящая из ядра и точно направленная в противоположную сторону, причем наибольшая яркость полосы отмечается на расстояниях $26''$, а затем $38''$ от центра. Особенно явствен контрвыброс в лучах H_{α} , что указывает на важную роль диффузной материи в создании излучения.

Почему все-таки выброс и контрвыброс так различны? Почему первый четко и ярко виден на обычных фотографиях, а второй удается обнаружить только приняв при фотографировании специальные меры? Возможно следующее объяснение: обширная часть центральной области NGC 4486 заполнена темной материей. Выброс, который мы считаем основным, направлен от ядра не только в сторону, но и к нам, а следовательно, контрвыброс, устремленный в противоположную сторону, направлен от нас. Он должен быть тогда в значительной мере заслонен темной материей и плохо различаем.

Поскольку NGC 4486 и NGC 2623 — это одиночные объекты, объяснить их радиоизлучение при помощи гипотезы столкновения нельзя. Это серьезный аргумент против гипотезы Бааде — Минковского и в пользу гипотезы В. А. Амбарцумяна, которая рассматривает явление мощного радиоизлучения в некоторых галактиках как результат взрывных процессов космического масштаба.

Дополнительным аргументом в пользу своей гипотезы В. А. Амбарцумян считает то обстоятельство, что все радиогалактики являются сверхгигантами в отношении оптической светимости. По новейшим данным для 24 радиогалактик их средняя абсолютная звездная величина равна $-21^m,4$. Предположение, что разделение преимущественно происходит у сверхгигантских объектов, кажется естественным. В рамках же гипотезы случайного столкновения нельзя понять, почему сталкиваются именно сверхгиганты. Астрономия не располагает данными о каком-либо механизме, который при возможном столкновении галактик резко увеличивал бы их оптическую светимость.

Среди радиогалактик большая часть является эллиптическими галактиками. Это сверхгиганты с необычно-

венно сильным радиоизлучением. Интересно, что среди нормальных галактик самым слабым, труднообнаруживаемым радиоизлучением обладают именно эллиптические галактики. Почему эллиптические галактики являются посетителями самого сильного и самого слабого радиоизлучения в мире галактик, сказать пока трудно.

Интересна также особенность радиогалактик, состоящая в том, что площадь всей области, от которой исходит радиоизлучение, во много, в сотни раз больше площади, наблюдаемой оптически. В некоторых случаях радиоизлучающие области простираются на 100 и более кпс от центральной части радиогалактики. Следовательно, на таких больших расстояниях прослеживается диффузная материя, генерирующая радиоизлучение. Естественно задать вопрос, не являются ли столь же обширными пространства, занимаемые диффузной материей у нормальных сверхгигантских галактик? Быть может, различие состоит лишь в том, что в диффузной материи нормальных галактик не происходят процессы, генерирующие радиоизлучение, а простирается она так же далеко, как и у радиогалактик. В таком случае диффузная материя нашей Галактики должна охватывать Магеллановы Облака, и Магеллановы Облака погружены в нее. Диффузная же материя Галактики и диффузная материя нашего ближайшего сверхгигантского соседа — галактики NGC 224 соединяются, проникают друг в друга.

Из 2270 дискретных источников радиоизлучения Сиднейского каталога 55 расположены в направлении далеких скоплений галактик. Так как одна радиогалактика в радиодиапазоне излучает в тысячи раз больше, чем нормальная галактика, то нужно думать, что радиоизлучение, исходящее от скопления галактик, определяется скорее всего одной оказавшейся в скоплении радиогалактикой, чем совокупным действием всех остальных галактик скопления. Радиогалактики встречаются очень редко, их не может быть много в одном скоплении.

В нескольких скоплениях галактик удалось отождествить ту галактику, которая создает все или почти все радиоизлучение скопления, — является радиогалактикой. Каждый раз это оказывалась эллиптическая галактика, имеющая слабое сжатие, почти круглая и расположенная у самого центра скопления. Каждый раз это сверхгигант — первая по светимости и по размерам галактика скопления.

Каталог оптически отождествленных радиогалактик с измеренными значениями красных смещений спектров $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, опубликованный Бербиджем и Крауном в 1979 г., содержит уже 495 объектов.

Наблюдение радиолинии нейтрального водорода в других галактиках

Во многих не очень далеких галактиках можно уверенно наблюдать эмиссионную линию нейтрального водорода, имеющую, как мы знаем, длину волны 21 см. Это показывает, что другие галактики, как и наша, содержат межзвездный водород. Так как галактики имеют

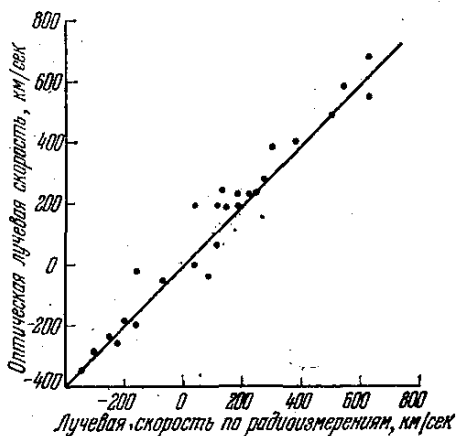


Рис. 109. Сравнение лучевых скоростей, измеренных по оптическим линиям и радиолинии спектров галактик.

значительные лучевые скорости, то эмиссионная линия нейтрального водорода должна быть вследствие эффекта Доплера смещена. Появляется возможность, измерив смещение этой линии, еще раз определить лучевую скорость галактики и сравнить ее с лучевой скоростью, найденной по оптическим спектральным линиям.

Сравнение было проделано для многих галактик. Результаты подобных сопоставлений нагляднее всего выражать графически. На одной оси координат откладывают полученные измерения величины одним способом,

а на другой — другим способом. Два полученные разными способами измерения величины определяют точку на плоскости. Если оба способа давали бы каждый раз совпадающие результаты, то точки ложились бы точно на биссектрису координатного угла. Если же результаты сильно отличаются друг от друга, то точки рассеиваются

Т а б л и ц а 21. Данные о массе нейтрального водорода в галактиках

Название галактики	Масса нейтрального водорода в миллиардах солнечных масс	Доля массы нейтрального водорода в общей массе галактики	Тип галактики
Наша Галактика	1,5	0,015	Sb, Sc
Большое Магелланово Облако	0,68	0,07	I I
Малое Магелланово Облако	0,60	0,22	I I
Система в Секстанте	0,28	—	I II
NGC 55	3,1	0,12	Sc
NGC 224	3,7	0,01	Sb
NGC 247	0,72	—	Sc
NGC 300	2,5	0,09	Sc
NGC 598	0,89	0,05	Sc
NGC 628	5,9	0,11	Sc
NGC 2403	2,0	0,03	Sc
NGC 3031	1,8	0,01	Sb
NGC 4214	0,97	—	I I
NGC 4244	2,6	0,04	Sc
NGC 4449	2,4	—	I I
NGC 4631	3,8	0,09	Sc
NGC 4656	1,5	—	I I
NGC 5236	4,9	—	Sc
NGC 5457	14,0	0,07	Sc
NGC 6822	0,13	0,10	I I
NGC 6946	1,4	—	Sc
IC 342	4,0	0,13	Sc
IC 1613	0,062	0,17	I I
IC 2574	0,62	—	I I

по всей плоскости. Чем ближе совокупность точек располагается к биссектрисе угла, тем согласованнее между собой результаты, полученные двумя различными способами.

На рис. 109 по оси абсцисс отложены скорости галактик, определенные по радиолинии нейтрального водорода 21 см, а по оси ординат — скорости, измеренные по линиям оптического спектра. Мы видим, что точки

тесно группируются около биссектрисы координатного угла. Небольшие отступления точек от этой прямой полностью объясняются случайными ошибками измерений, связанными с тем, что наблюдаемые линии спектра и радиолиния недостаточно отчетливы и тонки.

Таким образом, можно утверждать, что лучевые скорости галактик, определенные оптическими и радиометодами, совпадают. Это очень важное заключение, укрепляющее нашу уверенность и в реальности скоростей галактик и в правильности методов как оптической астрономии, так и радиоастрономии.

По интенсивности радиолинии 21 см можно оценить общую массу нейтрального водорода в наблюдаемой галактике. Оценки, произведенные для ряда галактик, даны в табл. 21. В некоторых случаях в третьем столбце данные не приводятся, так как общая масса галактики определена очень ненадежно.

Как видно из таблицы, наша Галактика наряду с туманностью Андромеды и галактикой в Большой Медведице (NGC 3031) является самой бедной нейтральным водородом по доле, которую он занимает в общей массе системы. Все остальные галактики списка значительно богаче водородом. В Малом Магеллановом Облаке он составляет 22% всей массы системы, в IC 1613 — 17%. То, что наша Галактика имеет относительное содержание водорода такое же, как галактики типа Sb, туманность Андромеды и NGC 3031, тогда как остальные галактики, принадлежащие к типам Sc и I I, значительно богаче водородом, является аргументом в пользу отнесения нашей Галактики к типу Sb.

Удивительные объекты Вселенной — квазары

Когда английские и австралийские астрономы, применив интерференционный метод, определили с большой точностью положения значительного числа дискретных источников радиоизлучения, они одновременно с большой точностью определили и угловые размеры некоторого числа радиисточников. Диаметры большинства из них исчислялись минутами или десятками секунд дуги. Но у пяти источников, а именно у 3C 48, 3C 147, 3C 196, 3C 273 и 3C 286, размеры оказались меньше секунды дуги. Эти пять объектов привлекли особое внимание потому, что, несмотря на очень малые угловые размеры,

поток их радиоизлучения не уступал потоку радиоизлучения других дискретных источников, превосходящих их по площади излучения в десятки тысяч раз. Вследствие этой особенности — давать концентрированное в очень малом телесном угле значительное излучение — перечисленные источники радиоизлучения были названы звездоподобными объектами.

Мэтьюз и Сендидж исследовали полученные на 5-метровом телескопе фотопластинки, пытаясь отождествить звездоподобные объекты. На маленьком участке неба, где располагался звездоподобный источник радиоизлучения, каждый раз обнаруживалась слабенькая звезда. Это могло быть случайным совпадением, так как источники радиоизлучения иногда настолько удалены, что даже 5-метровый телескоп не может их сфотографировать. Тем не менее было решено исследовать обнаруженные слабые звезды. Они снова были специально сфотографированы при помощи 5-метрового телескопа. Оказалось, что звездочки обладают особенностями, не встречающимися у обычных звезд. Та из них, которая отождествляется с ЗС 48, 16-й видимой звездной величины, оказалась окруженной пятью слабенькими туманностями, расположенными на расстояниях до 12 секунд дуги. Звезда, отождествляемая с ЗС 196, также оказалась связанной со слабой туманностью.

Австралийские наблюдатели, используя покрытия Лунной, показали, что ЗС 273 состоит из двух компонентов, разделенных расстоянием $19''.5$. Компонент В, согласно этим радионаблюдениям, сжат мало и намного слабее компонента А, который сжат сильно. На фотографии оказалось, что место, где зарегистрирован компонент А, занято маленькой туманностью, имеющей вид вытянутой струи, а на месте компонента В находится звезда 13-й видимой звездной величины.

Своеобразные черты слабеньких звезд, совпадающих со звездоподобными радиообъектами, убеждали, что совпадения не являются случайными. Казалось бы, снова, хотя и в несколько ином виде, возродилась концепция радиозвезд, были найдены звезды со значительным потоком радиоизлучения. Тогда были сняты спектры. Удовлетворительный спектр звезды 16-й видимой звездной величины, отождествляемой с ЗС 48, удалось получить на 5-метровом телескопе только при выдержке в 7 часов. При такой большой выдержке в спектре появляются ли-

нии, образующиеся в земной атмосфере. После исследования и исключения этих линий Гринстейн оставил шесть линий, принадлежащих, по-видимому, ЗС 48. Это были размытые эмиссионные линии. Ко всеобщему удивлению, выяснилось, что ни в спектрах обычных звезд, ни в спектрах новых, сверхновых звезд или газовых туманностей нет спектральных линий в тех же местах. Может быть, это были запрещенные линии, наблюдаемые в каких-то совершенно новых условиях? Или линии каких-нибудь редких элементов, обычно отсутствующих в атмосферах звезд и в газовых туманностях? Каждый раз предпринимаемые проверки этих предположений приводили к отрицательному результату.

После этого были получены спектры ЗС 147, ЗС 196, ЗС 273 и ЗС 286, давшие еще более удивительные результаты. Ни одной линии, находящейся в этих спектрах, не удавалось отождествить с какими-нибудь известными или предвычисленными линиями. Более того, ни в каких двух спектрах звездоподобных объектов не было хотя бы одной общей линии.

Около двух лет загадка спектров звездоподобных объектов оставалась неразрешенной. Наконец, Шмидт, изучая расположение линий в спектре ЗС 273, обнаружил, что четыре линии из шести образуют последовательность, в которой отношения длин волн такие, какие бывают в сериях спектральных линий водорода или какого-нибудь другого элемента, у которого после ионизации во внешней оболочке остался один электрон. Отношения длин волн были точно такими, какими им полагалось быть при данном предположении, но сами длины волн не соответствовали ни водороду, ни какому-нибудь иному элементу, имеющему после ионизации один электрон во внешней оболочке. Тогда Шмидт сделал кардинальное предположение, что линии занимают другие места вследствие значительного красного смещения спектра. Это предположение было трудно сделать потому, что все уже привыкли считать звездоподобные источники радиоизлучения действительно звездами, а у звезд лучевые скорости всегда малы и не превышают нескольких десятков километров в секунду. Вызываемые такими лучевыми скоростями доплеровские смещения спектров настолько незначительны, что они не могли бы помешать отождествлению спектральных линий; отождествление было бы сделано сразу же, как был получен спектр.

Если же предположить сильное смещение спектра, то ситуация полностью изменяется.

Шмидт сначала проверил допущение, что четыре выделенные линии являются линиями водорода. Водород — самый обильный во Вселенной элемент, и его линии встречаются почти во всех спектрах. Оказалось, что для такого допущения требуется красное смещение спектра ЗС 273, равное 0,16, т. е. если принять что $\Delta\lambda/\lambda = 0,16$, то все четыре линии после поправки за красное смещение станут на те места, которые полагается занимать соответствующим линиям водорода.

Основной вопрос теперь состоял в том, что произойдет с двумя оставшимися из шести линий, наблюдавшимися в спектре ЗС 273, после поправки за красное смещение. Займут ли они места, где обычно в несмещенных спектрах находятся яркие линии каких-нибудь элементов? Результаты вычислений оказались самыми ободряющими. Одна из двух линий стала на место запрещенной линии дважды ионизованного кислорода, обычно весьма интенсивной в спектрах газовых туманностей. Вторая линия имела длину волны 3239 Å. После исправления, с учетом красного смещения, ее длина волны получается, равной 2800 Å. Эта длина волны уже оказывается в ультрафиолетовой части спектра, и мы не знаем, имеются ли линии с такой длиной волны в спектрах звезд, туманностей или галактик, так как ультрафиолетовое излучение поглощается земной атмосферой и до объективов телескопа не доходит. На выручку пришли данные о спектре Солнца, полученные при помощи наблюдений с высотных ракет. Эти наблюдения ведутся за пределами земной атмосферы и полностью воспроизводят ультрафиолетовую часть спектра. В ультрафиолетовой части спектра Солнца ярчайшей эмиссионной линией является как раз линия с длиной волны 2798 Å, принадлежащая ионизованному магнию.

Еще одно подтверждение значительного красного смещения спектра ЗС 273 было получено следующим образом. К серии водородных линий, наблюдавшихся в спектре, принадлежит также линия H_{α} , которая в несмещенных спектрах имеет длину волны 6563 Å и в спектрах звезд и туманностей является наиболее яркой из серии водородных линий. С учетом красного смещения в 0,16

длина ее волны должна была стать равной 7590 Å. Это уже инфракрасная область и в спектре на фотопластинке она наблюдаться не может. Но близкие инфракрасные лучи атмосферой Земли пропускаются и представилось возможным промерить инфракрасную часть спектра ЗС 273 при помощи электрофотометра. Точно на месте длины волны 7590 Å была обнаружена интенсивная эмиссионная линия. Так окончательно разрешился вопрос для ЗС 273.

Мэтьюз и Гринштейн проверили тогда спектр ЗС 48. Если ярчайшую линию, имеющую длину волны 3832 Å, считать линией ионизованного магния, то, поскольку истинная длина волны этой линии 2798 Å, красное смещение спектра ЗС 48 получается равным 0,37. Тогда точно отождествляются пять других линий, имеющих в спектре ЗС 48, правда, не с линиями водорода, а с линиями однажды ионизованного кислорода и дважды ионизованного неона. Такое точное отождествление всех имеющих пяти линий случайным быть не может, поэтому можно считать разрешенным вопрос и для ЗС 48.

Итак, ЗС 273 и ЗС 48 имеют красные смещения спектров, равные 0,16 и 0,37. Чем могут быть вызваны такие большие красные смещения?

Если пытаться отстаивать предположение, что звездopodobные объекты являются звездами и входят в состав нашей Галактики, то необходимо считать, что красное смещение определяется не лучевой скоростью звезд, не доплеровским эффектом, а вызвано сильным полем тяготения этих звезд. Иначе, производя вычисления по формуле (23), по красным смещениям $\Delta\lambda/\lambda$, равным 0,16 для ЗС 273 и 0,37 для ЗС 48, получаем значения v/c , соответственно равные 0,15 и 0,30. Значит, пришлось бы допустить, что звезда ЗС 273 движется в Галактике со скоростью 45 000 км/с, а ЗС 48 — со скоростью 90 000 км/с, в то время как лучевые скорости обычных, даже самых далеких звезд в нашей звездной системе составляют лишь 100—300 км/с.

Согласно общему принципу относительности поле тяготения изменяет частоту всякого периодического процесса, в том числе и светового электромагнитного колебания. Колебательное движение, преодолевая поле тяготения, теряет свою энергию. Потеря энергии выража-

ется в том, что уменьшается частота колебательного движения. Если вместо частоты воспользоваться длиной волны колебательного движения, то должно соблюдаться следующее равенство:

$$\frac{\lambda_1 - \lambda}{\lambda} = - \frac{G}{c} \left(\frac{\mathcal{M}_1}{R_1} - \frac{\mathcal{M}}{R} \right), \quad (26)$$

где $\mathcal{M}$ и R — масса и радиус звезды, $\mathcal{M}_1$ и R_1 — масса и радиус Земли, G — постоянная тяготения, c — скорость света, λ — длина волны, излучаемая звездой, λ_1 — длина волны того же излучения, приходящая к наблюдателю на поверхности Земли.

Членом $\mathcal{M}_1/R_1$ во всех задачах, представляющих для нас интерес, можно пренебречь в сравнении с $\mathcal{M}/R$. Поэтому можно считать, что вызываемое тяготением звезды красное смещение спектра (стоящее в левой части равенства) пропорционально массе звезды и обратно пропорционально ее радиусу.

Из известных до сих пор звезд наибольшее значение $\mathcal{M}/R$ имеют белые карлики. Массы их порядка массы Солнца, а радиусы в сотни, а у некоторых белых карликов в тысячу раз меньше, чем у Солнца. Вызываемые тяготением красные смещения спектров белых карликов, вычисляемые по формуле (26), гораздо меньше, чем у звездоподобных объектов, и имеют порядок 0,0001. Это полностью согласуется с результатами наблюдений белых карликов.

Чтобы красное смещение спектра составляло огромные величины — 0,16 или 0,37, необходимы очень большие массы или совершенно крошечные радиусы звезд. Если масса звездоподобных объектов равна массе Солнца, то для объяснения наблюдаемых красных смещений спектров полем тяготения необходимо, чтобы у ЗС 273 радиус был равен 9,5 км, а у ЗС 48 всего 4 км. Если же радиусы звездоподобных объектов равны радиусу Солнца, то масса ЗС 273 должна составлять 73 000, а масса ЗС 48 — 170 000 масс Солнца.

В первом случае нормальных масс и крошечных радиусов звезда должна иметь фантастически высокую плотность. Средняя плотность должна быть порядка миллиона тонн в одном кубическом сантиметре. Теоретические исследования показали, что построить модель такой сверхплотной звезды возможно. Она должна состоять из тяжелых частиц — нейтронов или гиперонов. Однако

нейтронные и гиперонные звезды-карлики не могут давать наблюдаемого спектра. Газовые оболочки этих звезд могут иметь протяженность не более нескольких сотен метров. В сжатых, плотных газовых оболочках не могут формироваться запрещенные эмиссионные линии, наблюдаемые в спектрах звездоподобных объектов. Кроме того, общее излучение карликов нейтронной или гиперонной звезды в оптических лучах настолько ничтожно, что, находясь за пределами Солнечной системы, она не смогла бы наблюдаться даже при помощи крупных телескопов.

Таким образом, нужно отказаться от предположения, что звездоподобные радиоисточники излучения являются сверхплотными или сверхмассивными телами, находящимися внутри Галактики и способными производить красное смещение своих спектров силой собственного поля тяготения.

Предположим теперь, что звездоподобные источники радиоизлучения — это далекие внегалактические объекты и красные смещения их спектров объясняются законом Хабла. Тогда, при скоростях удаления 45 000 км/с и 90 000 км/с и значении постоянной Хабла 75 км/с на Мпс, расстояния до ЗС 273 и ЗС 48 окажутся соответственно равными 600 и 1200 Мпс. Это будут отдаленнейшие объекты Вселенной. Первый из них имеет 13-ю, а второй 16-ю видимую звездную величину. Если использовать оцененные расстояния, то абсолютная звездная величина ЗС 273 с учетом поглощения света в галактике получается равной $-26^m,5$, а у ЗС 48 $M = -25^m$.

Значения абсолютных звездных величин получаются совершенно необычными. Светимость ЗС 48 примерно в 100 раз, а ЗС 273 в 500 раз превосходит светимости сверхгигантских галактик, таких, как наша или туманность Андромеды. ЗС 273 излучает в секунду $2 \cdot 10^{39}$ Дж, а ЗС 48 — $5 \cdot 10^{38}$ Дж. Энергия радиоизлучения этих объектов порядка 10^{38} Дж/с, так что она сравнима с энергией излучения в оптическом диапазоне. А угловые размеры звездоподобных объектов очень малы и, несмотря на огромные расстояния, оценка их линейных диаметров приводит к значениям всего 1000 пс для ЗС 273 и 5000 пс для ЗС 48.

При светимостях, в 100 раз превосходящих светимость сверхгигантских галактик, ЗС 48 имеет размер зау-рядной карликовой галактики, а ЗС 273 — размер самых крошечных из карликовых галактик. Можно подсчитать,

что средняя поверхностная яркость ЗС 48 и ЗС 273 превосходит среднюю поверхностную яркость туманности Андромеды соответственно в 4000 и в 200 000 раз!

Но выброс из ЗС 273 и слабый пучок газа у ЗС 48 имеют протяженность около 60 000 пс.

Какова же природа звездоподобных объектов? Их радиоизлучение является, по-видимому, синхротронным. Оптическое излучение, состоящее в основном из ярких эмиссионных линий, показывает, что по крайней мере главная часть, если не все излучение, создается газом. При этом температура газа должна быть не ниже $10\,000^\circ$, чтобы могли наблюдаться линии ионизованных магния, кислорода и неона. И есть основания считать, что газ нагревается и возбуждается не звездами высоких светимостей и температур, а каким-то другим механизмом.

Может быть, звездоподобные объекты являются радиогалактиками на самой ранней стадии их развития, в первые десятки тысяч лет после того как взрыв в ядре дал начало процессам, превращающим систему в радиогалактику. Ранняя стадия развития, возможно, характеризуется очень высокой оптической и радиосветимостью. Она скоротечна, длится только десятки тысяч лет и потому так редко встречается во Вселенной.

После того как были сделаны эти первые предположения о природе звездоподобных источников радиоизлучения, усилия наблюдателей привели к большому числу новых открытий. Звездоподобным объектам придумали звучное название «кварзары» («quasar» — от «quasi stellar radio source» — звездоподобный радиоисточник).

Находят новые кварзары, убеждаясь сначала в точечном характере источника радиоизлучения и максимально точно определяя его положение. Затем при помощи фотографий, полученных на большом телескопе с большой выдержкой, отождествляют источник радиоизлучения с оптическими объектами, находящимися на том же самом месте и очень похожими на слабые звездочки. Дополнительными аргументами являются наличие элементов туманной структуры около звездочек, а также избыток излучения в ультрафиолетовой части спектра точечного объекта, характерный для всех звездоподобных объектов — кварзаров. Чтобы обнаружить последнее свойство, нужно сравнить яркости изображений на фотографиях, сделанных с различными фильтрами. Наконец, нужно еще снять при помощи большого телескопа, снабженно-

го спектрографом, спектр звездочки, отождествить спектральные линии и определить красное смещение спектра. Именно большое значение красного смещения $\Delta\lambda/\lambda$ является окончательным аргументом, удостоверяющим, что наблюдаемый слабый точечный объект — квазар.

В списке, опубликованном в 1967 г. Барбиери, Батистини и Нази, содержится 103 квазара. Они расположены во всех областях неба, кроме, разумеется, галактического экватора, где их делает оптически невидимыми пылевая материя, сконцентрированная около плоскости Галактики.

Табл. 22 показывает, как распределены у этих 103 квазаров красные смещения спектров ($\Delta\lambda/\lambda$), видимые звездные величины (m_v) и радиовеличины (m_r).

Т а б л и ц а 22. Распределение красных смещений, спектров, оптических звездных величин и радиовеличин квазаров

$\Delta\lambda/\lambda$	n	m_v	n	m_r	n
0,13—0,40	18	12,01—13	1	6,01—7	2
0,41—0,60	16	13,01—14	0	7,01—8	4
0,61—0,80	13	14,01—15	0	8,01—9	42
0,81—1,00	14	15,01—16	7	9,01—10	31
1,01—1,20	10	16,01—17	29	10,01—11	11
1,21—1,40	4	17,01—18	31		
1,41—1,60	7	18,01—19	21		
1,61—1,80	3	19,01—20	5		
1,81—2,00	10				
2,01—2,20	7				
2,21—2,40	1				
	103		94		90

Таблица показывает, что красные смещения спектров у первых квазаров ЗС 273 и ЗС 48, казавшиеся нам такими большими, на самом деле принадлежат к довольно умеренным. У 42 квазаров красное смещение больше 1,00, в том числе у восьми больше, чем 2,00. Самое большое в этом списке красное смещение (2,223) имеет квазар PKS 0237—23. Согласно формуле (23) его скорость удаления равна 247 000 км/с, а расстояние, получаемое по закону Хаббла, если принять $H = 75$ км/с · Мпс,

$$\frac{247\,000 \text{ км/с}}{75 \text{ км/с} \cdot \text{Мпс}} = 3300 \text{ Мпс.}$$

Видимая звездная величина этого квазара $16^m,63$, поэтому абсолютная величина, определяемая по формуле (6), равна $-26^m,0$. Вычисление абсолютных звездных величин для других квазаров показывает, что и в отношении светимости квазар PKS 0237 — 23, наряду с 3С 273, является выдающимся объектом. Его светимость превосходит светимость Галактики в 330 раз.

Число обнаруживаемых и оптически отождествляемых квазаров непрерывно увеличивается. В списке Бербиджа, Крауна и Смита, опубликованном в 1977 г., их число уже превышает 600.

В настоящее время пальма первенства в скорости убегания принадлежит квазару QSO 1442 + 101, у которого $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ равно 3,53. Это соответствует скорости удаления 272 000 км/с и расстоянию 3630 Мпс. У квазара ОН 471 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3,40$.

Распределение по m_v показывает, что среди квазаров преобладают объекты, слабее 16-й видимой звездной величины. Только семь квазаров имеют видимую звездную величину между 15^m и 16^m , и только один, выдающийся по блеску и светимости, квазар 3С 273 имеет видимую звездную величину $12^m,80$.

Наблюдения привели к еще одному совершенно неожиданному открытию. Оказывается, видимая оптическая звездная величина m_v и радиовеличина m_r у квазаров не постоянны и меняются со временем.

Выполнив точные фотоэлектрические наблюдения при помощи 5-метрового телескопа, Сендидж нашел, что блеск 3С 48 в течение 1964—1966 гг. все время менялся: он то возрастал, то ослабевал. Диапазон изменения $0^m,10$. Изменение блеска происходит довольно быстро: 8 января 1965 г. видимая звездная величина этого квазара была $16^m,23$, а 9 января блеск ослабел до $16^m,28$. Квазар 3С 196 за годы 1962—1964 менял блеск на $0^m,27$. Изменения блеска обнаружены также у квазаров 3С 47 и 3С 245. А. С. Шаров и Ю. Н. Ефремов, исследовав имевшиеся 73 пластинки с изображениями 3С 273, полученными за период с 1896 по 1963 гг., пришли к выводу, что видимая звездная величина этого объекта изменяется в пределах $0^m,7$.

Если оставить в стороне очень редко происходящие изменения блеска галактик, вызываемые вспышками

сверхновых звезд, то звездоподобные объекты — это первые внегалактические системы переменного блеска.

Особенно примечательно изменение блеска у квазара 3С 446. Табл. 23 показывает результаты измерения его видимой звездной величины в четыре разных момента времени.

Между октябрем 1964 г. и июнем 1966 г. видимая величина 3С 446 уменьшилась на $3^m,22$. Это означает,

Т а б л и ц а 23. Измерение блеска
у квазара 3С 446

Дата	
3 октября 1964 г.	18,42
5 октября 1964 г.	18,36
24 июня 1966 г.	15,14
12 июля 1966 г.	15,28

что светимость за это время возросла в 19 раз. Красное смещение этого квазара $\Delta\lambda/\lambda = 1,404$. Поэтому можно подсчитать, что 5 октября 1964 г. он излучал как 45 наших Галактик, а в июне 1966 г. как 900 Галактик. Изменился за это время и цвет квазара. Он стал заметно желтее. Самое естественное предположить, что где-то в промежутке между октябрем 1964 г. и июнем 1966 г. в 3С 446 произошел взрыв. Если наблюдателю повезло и 24 июня 1966 г. квазар наблюдался в момент наибольшего блеска, то энергия взрыва, израсходованная только на излучение, может быть оценена в $10^{50} - 10^{51}$ Дж. Следовательно, энергия взрыва в квазаре 3С 446 в 10 — 100 раз превосходит энергию взрыва в ядре NGC 3034 и в $10^7 - 10^8$ раз энергию вспышки сверхновой звезды. Если же, что всего вероятнее, момент наибольшего блеска был пропущен и в максимуме блеска светимость 3С 446 была еще значительно большей, то масштабы происшедшего взрыва мы даже недооценили.

Но самое поразительное открытие состоит в том, что подавляющая часть чрезвычайно мощного излучения квазаров исходит из весьма малой по размерам их центральной области. При помощи радиоинтерферометрических наблюдений с расстояниями между приемными антеннами в тысячи (до 10 тысяч) километров, удалось

измерить угловые размеры основных радиоизлучающих областей нескольких квазаров. Они оказались крайне малыми и составляют сотые, тысячные или даже десяти-тысячные доли секунды дуги. Так, компактная область в квазаре 3C 273a имеет угловые размеры $0'',10 \times 0'',04$, что соответствует линейным размерам 180×74 пс, у 3C 273b — $0'',027 \times 0'',01$, или 50×20 пс, у 3C 345b — $0'',005 \times 0'',005$, или 20×20 пс. Удивительно, конечно, что столь малые объемы могут генерировать такое сверхмощное излучение.

Более того, переменность оптического блеска у некоторых квазаров обнаруживает признаки периодичности. Величина периода при этом порядка одного или нескольких лет. Но из этого с необходимостью следует, что размеры области квазара, вносящей основной вклад в его оптическую светимость, не должны превышать соответствующего числа световых лет, т. е. должны быть порядка одного парсека или меньше. Взаимодействие, согласование между отдельными частями любого тела не может происходить со скоростями, превышающими скорость света. Поэтому светящаяся область переменного блеска с периодом в t лет не может иметь размеры, превышающие t световых лет.

Какие же катаклизмические процессы должны происходить в центральном, имеющем диаметр менее одного парсека, ядре квазара, если исходящее из него излучение в сотни раз превосходит суммарное излучение всех ста миллиардов звезд нашей сверхгигантской Галактики?

Ответ на этот вопрос еще не дан.

Очень большие оценки светимостей квазаров в предположении, что красные смещения их спектров определяются законом Хаббла, и вытекающие отсюда очень высокие оценки энергий взрывных процессов, ведущих к наблюдаемым изменениям блеска, вызывают у многих исследователей сомнения в правильности самого предположения. Может быть, красное смещение спектров действительно обусловлено эффектом Доплера, квазары удаляются от нас с огромными скоростями, но эти скорости не есть следствие их величайшей отдаленности и расширения пространства, а вызваны другими причинами?

Выдвинута еще одна гипотеза. Квазары — это крупные куски материи, выброшенные из ядра Галактики во время происшедшего в нем в прошлом взрыва. Эти куски

материи, образованные бурным взрывным процессом, сохранили в какой-то мере его особенности, поэтому в их спектрах преобладают эмиссионные линии ионизованных элементов, происходят дополнительные взрывные процессы, генерируется сильное радиоизлучение.

За время, прошедшее с момента взрыва, квазары успели выйти — вылететь за пределы Галактики, стать внегалактическими объектами и даже значительно удалиться на расстояния порядка одного или десятки мегапарсек. Поэтому теперь все квазары удаляются от нас (в первое время после выброса из ядра Галактики некоторые из них должны были приближаться к нам) и, как показывают наблюдения, их собственные движения стали настолько малыми, что не могут быть измерены. Если расстояния квазаров составляют лишь несколько мегапарсек, а не тысячи мегапарсек, как это получалось бы, если они удаляются согласно закону Хаббла, то оценки светимостей при тех же видимых величинах будут в тысячи, десятки тысяч раз меньше и соответственно уменьшатся оценки энергий происходящих в них процессов.

Добавим, что взрыв, породивший квазары, не обязательно должен был произойти в ядре нашей Галактики. Он мог произойти и в ядре какой-нибудь из соседних галактик. Нужно лишь, чтобы прошедшее после взрыва время было достаточно большим, чтобы теперь все квазары удалялись от нас и имели ничтожно малые собственные движения, т. е. чтобы их удаление происходило почти строго в направлении от нас. Легко понять, что так будет, если пройдет достаточно много времени.

Гипотеза взрыва встречает свои возражения. В классическом примере взрыва ядра галактики NGC 3034 наблюдения указывают на скорость истечения газов около 1000 км/с. Теперь же нужно допустить, что взрыв порождал скорости совершенно иного порядка: 100 — 200 тыс. км/с и более. Такие скорости, близкие к скорости света, должны вызываться иным механизмом взрыва, чем скорости около 1000 км/с. Кроме того, как показывает расчет, требование, чтобы с момента выброса квазаров прошло достаточно много времени и их собственные движения стали ничтожно малыми, несмотря на большие пространственные скорости, противоречит возможности сохранения квазарами свойств, связанных с взрывными процессами.

Некоторые наблюдательные данные еще более усложнили задачу выяснения природы квазаров. У первых исследованных объектов этого рода в спектрах наблюдались лишь эмиссионные линии. Но у некоторых квазаров, открытых в 1966 г. и позднее, в спектрах наряду с эмиссионными линиями обнаруживались и линии поглощения. В отдельных случаях число линий поглощения в спектре квазара даже превосходило число эмиссионных линий. Например, в спектре PKS 0237—23 имеется 20 линий поглощения, а в спектре 3C 191—22.

Отождествление линий поглощения вызывало некоторые затруднения. Их не удавалось отождествить, если лучевая скорость квазара принималась равной лучевой скорости, определяемой по эмиссионным линиям. Но отождествление выполнялось с уверенностью, если принимать лучевую скорость несколько иной, как правило, несколько меньшей. Иначе говоря, лучевая скорость квазара, определенная по линиям поглощения, отличается от лучевой скорости, определяемой по эмиссионным линиям. В табл. 24 дается сравнение красных смещений и соответствующих им лучевых скоростей квазаров, определенных по эмиссионным линиям и линиям поглощения.

Т а б л и ц а 24. Красные смещения в спектрах квазаров, определенные по эмиссионным линиям и линиям поглощения

Квазар	По эмиссионным линиям		По линиям поглощения	
	$\Delta\lambda/\lambda$	v , км/с	$\Delta\lambda/\lambda$	v , км/с
3C 191	1,953	238 300	1,947	238 300
PKS 0237—23	2,223	247 300	1,955	238 400
PKS 1116 +12	2,118	244 000	1,947	238 100
PHL 938	1,956	238 500	1,95	238 000
PKS 0119—04	1,955	238 400	1,966	238 700
Ton 1530	2,051	241 700	1,94	237 000

Различие лучевых скоростей, определенных по эмиссионным линиям и линиям поглощения, как видно из таблицы, значительно: у трех квазаров оно выражается значениями в тысячи километров в секунду, достигая у PKS 0237—23 9000 км/с. При этом почти во всех случаях скорость, определенная по эмиссионным линиям, больше, чем скорость, определенная по линиям поглощения. Чем это можно объяснить?

Линии поглощения образуются в более холодной материи, лежащей между излучающей поверхностью и наблюдателем. Значит, либо нужно считать, что эта материя выброшена самими квазарами со скоростями в тысячи километров в секунду, либо, что она находится в скоплениях галактик, сквозь которые квазары наблюдаются. В гипотезе взрыва нужно предположить, что наряду с квазарами из ядра Галактики (или одной из соседних галактик) были выброшены и облака диффузной материи, тоже быстро удаляющиеся и заслоняющие квазары.

Все эти предположения трудно пока как-то подтвердить другими наблюдательными фактами, поэтому они остаются необубедительными. Помимо всего, они не объясняют бросающегося в глаза сходства между лучевыми скоростями, определенными по линиям поглощения у различных квазаров, тогда как лучевые скорости, определенные по эмиссионным линиям, заметно различаются между собой.

Особенно трудно объяснить линии поглощения в рамках гипотезы внутригалактического расположения квазаров.

В 1967 г. с сенсационной работой выступил Арп. Он исследовал расположение на небе пекулярных галактик, т. е. галактик, имеющих необычайные внешние особенности, и дискретных источников радиоизлучения, не являющихся радиогалактиками. Арп пришел к выводу, что необыкновенно часто встречается случай, когда пекулярная галактика находится почти точно между двумя дискретными источниками радиоизлучения. Если удастся статистически убедительно доказать, что такое взаимное расположение объектов нельзя объяснить случайностью, то тогда нужно согласиться с Арпом о неизбежности вывода, что дискретные источники радиоизлучения (следовательно, и квазары) связаны с пекулярными галактиками, что они произошли из этой галактики, а следовательно, красные смещения спектров квазаров не должны объясняться эффектом Доплера и нужно искать иное объяснение (ведь у пекулярных галактик нет больших красных смещений спектров). Первые попытки проверить исследование Арпа пока не подтвердили его результатов.

В отношении квазаров положение в наши дни такое же неясное, каким оно было в отношении спиральных

туманностей 60 лет назад, когда шел спор о том, внутри галактические ли это небольшие туманности или же лежащие за пределами Галактики сравнимые с ней звездные системы.

Звездоподобные галактики

Открытие звездоподобных источников радиоизлучения, отождествляемых с оптическими объектами малых угловых размеров и имеющих избыточное ультрафиолетовое излучение и сильное красное смещение в спектрах, вызвало законный вопрос — не существуют ли во Вселенной аналогичные объекты без сильного радиоизлучения. Ведь, например, наряду с радиогалактиками имеются гораздо более многочисленные нормальные галактики, во всех отношениях очень схожие с радиогалактиками и отличающиеся только одним — очень слабым потоком радиоизлучения.

Разрешил этот вопрос Сендидж. Исследуя очень слабые бело-голубые звезды в высоких галактических широтах, т. е. в направлениях, где поглощение света, ослабляющее фиолетовую и ультрафиолетовую области спектра далеких объектов, мало, Сендидж выяснил, что многие из них, как и квазары, обнаруживают избыток излучения в ультрафиолетовой части спектра. Это вызвало подозрение, не ошибались ли и в этом случае наблюдатели, считая звездами то, что только похоже на звезды. В области расположения изученных Сендиджем звездочек источников радиоизлучения нет, поэтому предположить, что это квазары, нельзя, но, может быть, это все-таки и не звезды?

Отобрав шесть «подозрительных» объектов, Сендидж и Шмидт при помощи 5-метрового телескопа получили их спектры. В одном случае подозрения оказались напрасными — перед ними был спектр звезды. Еще в двух случаях спектры оказались непрерывными, без линий, и потому измерить лучевую скорость объектов не удалось. В трех же случаях подозрения оправдались. В спектрах этих объектов, как и в спектрах квазаров, имелись размытые эмиссионные линии, отождествление которых показало, что один объект имеет смещение спектра $\Delta\lambda/\lambda$, равное 1,241, второй 0,0877 и третий 0,1307. Это свидетельствует о больших лучевых скоростях, о том, что это не звезды, а внегалактические объекты.

Если по лучевым скоростям определить расстояния, а затем по расстояниям и видимым звездным величинам определить светимости, то последние, как и у квазаров, оказываются во много раз большими, чем у сверхгигантских галактик. Размеры же этих объектов, как и у квазаров, сравнительно невелики. Однако у них нет заметного потока радиоизлучения. Поэтому новый класс объектов получил название «квазагов» («quasag» — от quasi-stellar galaxy — звездopodobная галактика).

В 1967 г. Сендидж исследовал 69 очень слабых голубых объектов, расположенных в небольшой части неба, и пришел к выводу, что 48 из них — звезды, белые карлики и субкарлики. Остальные 21 объект — квазаги.

Сендидж отмечает, что число звездopodobных галактик, по-видимому, в сотни раз превосходит число звездopodobных радиоисточников излучения. Общее число квазагов ярче 20-й видимой звездной величины по всему небу он оценивает в 100 000.

Можно предположить, что квазар — это сравнительно непродолжительное, сопровождающееся радиоизлучением состояние, через которое происходит каждый квазаг. Впрочем, настаивать на тесной связи квазаров и квазагов нельзя.

Есть еще один тип объектов, имеющий сходные с квазагами черты. Это так называемые компактные галактики. Их уже много лет изучает Цвикки. Для компактных галактик характерны малые размеры, такие, какие бывают у карликовых галактик, но светимости у них немалые, соответствующие галактикам, средним по светимости и даже гигантским. Это должно означать, что у компактных галактик значительно более высокие поверхностные яркости, чем у обычных галактик.

Исследовав около ста компактных галактик, Цвикки пришел к выводу, что их поверхностные яркости в среднем в 100—1000 раз превосходят поверхностные яркости обычных галактик.

У квазагов и квазаров поверхностные яркости тоже намного больше, чем у обычных галактик.

Неожиданные, непредвиденные открытия большого значения, которые сделала и продолжает делать астрономия в последние годы, заставляют задуматься над оценкой имеющихся теорий происхождения звезд и галактик. Нужно признать, что достижения в области теории еще скромны. Иначе не было бы столь непредвиденных от-

крытий, и можно было бы предсказывать явления, а затем их находить. Происходит же обратное: новые наблюдаемые явления ставят перед теоретиками сложные и непредвиденные задачи. По-видимому, кардинальные проблемы космогонии — проблемы происхождения звезд и галактик — не могут сегодня получить уверенного решения. Они получают решение лишь после того, как будут подробно исследованы новые недавно открытые классы объектов и другие значительные явления космоса, к открытию которых астрономия, быть может, уже приблизилась.

Новые удивительные объекты — пульсары

В октябре 1967 г. группа астрономов Кембриджского университета, возглавляемая Хьюишем, проводила при помощи нового радиотелескопа исследование явления мерцания радиоволн. Подобно тому как мерцает свет звезд из-за того, что мы рассматриваем их сквозь атмосферу Земли, должны мерцать и радиоволны, испускаемые далекими дискретными точечными источниками излучения: ведь они приходят к нам, пересекая объем Солнечной системы, заполненный электрически заряженными частицами. Эти электрически заряженные частицы непрерывно выбрасываются Солнцем и заполняют все межпланетное пространство.

Теория предсказывает, что мерцание должно быть тем сильнее, чем больше длина волны. Поэтому наблюдения велись на длине волны 3,7 м, тогда как обычно радиоастрономы работают на сантиметровых радиоволнах.

После того как радиотелескоп обозрел значительную часть неба и автоматическое записывающее устройство нанесло на ленту стометровой длины наблюденные радиосигналы, просматривать эту ленту привелось студентке-практикантке Хоселин Белл; она первая обратила внимание на то, что наряду с радиосигналами, которые неправильно, случайным образом, как это должно быть при мерцании, меняют свою интенсивность, обнаруживаются радиосигналы в виде частых периодически повторяющихся всплесков.

Нужно сказать, что подобного рода периодические радиовсплески обычно бывают результатом разного рода причин чисто земного происхождения. Их могут, например, вызывать электрические замыкания в неисправных,

находящихся поблизости стиральных машинах, холодильниках и других бытовых приборах. Они могут быть следствием неисправности коробки зажигания автомобиля где-нибудь по соседству.

Но проверка показала, что эти всплески приходят из одной и той же точки неба каждый раз, как радиотелескоп наводится на нее. Значит, всплески имеют неземное происхождение. Это — новое астрономическое явление, какой-то новый объект неистощимой на выдумки природы.

Так как наиболее характерная особенность нового объекта — радиоизлучение в виде правильно чередующихся отдельных импульсов, решено было (и удачно) назвать его пульсаром. Первый пульсар получил обозначение CP 1919 (Cambridge Pulsar; прямое восхождение = $19^h 19^m$).

Вскоре при помощи того же радиотелескопа были открыты еще три пульсара. А после этого, когда поисками занялись другие радиообсерватории, в том числе и находящиеся в южном полушарии Земли, число открываемых пульсаров стало быстро расти и в настоящее время количество известных пульсаров стало больше трехсот.

Кажется удивительным, что объекты, дающие о себе знать столь определенным, отличным от других объектов образом, были обнаружены только в 1967 г., когда радиоастрономия уже имела 20-летний опыт интенсивных наблюдений.

Объяснение состоит в том, что, как мы уже указывали, радиоастрономические наблюдения ведутся обычно в сантиметровых волнах, а излучение пульсаров в этих длинах волн намного слабее, чем в метровых. Кроме того, промежутки времени между сигналами пульсаров малы и для их обнаружения необходимо, чтобы большой радиотелескоп обладал записывающим устройством, способным разделять сигналы, следующие друг за другом через короткие промежутки времени.

Именно при исследовании мерцания радиоволн потребовалось создать условия наблюдения, которые оказались благоприятными для открытия пульсаров.

Наиболее поразительная черта пульсаров — строгое постоянство промежутков времени между радиовсплесками. Для первого пульсара CP 1919 этот промежуток времени равен 1,33730113 секунды. На рис. 110 показан вид записи на ленте радиосигналов этого пульсара. Мы ви-

дим, что амплитуды всплесков различны, но промежутки времени между ними одни и те же.

Если промежуток времени между двумя последовательными тиканьями ваших часов, читатель, выдерживается с точностью до одной тысячной доли самого промежутка, то часы можно считать хорошими. При правильной регулировке они не будут отклоняться за сутки больше, чем на четверть минуты.

Промежуток времени между двумя последовательными радиовсплесками у пульсара СР 1919, равный

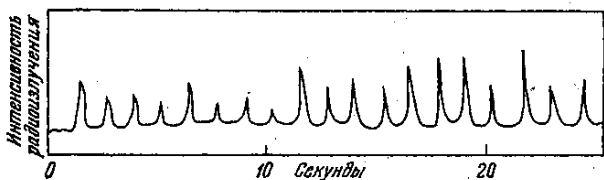


Рис. 110. Радиосигналы пульсара СР 1919.

приблизительно одной с третьей секунды, выдерживается с точностью до стомиллионной доли секунды! Именно поэтому продолжительность периода записана с восемью цифрами после запятой. Но при этом необходимо сделать оговорку. Современные технические средства не позволяют измерить один промежуток времени с точностью до стомиллионной доли секунды. Нельзя поэтому категорически утверждать, что точность — стомиллионная доля секунды — соблюдается для каждого периода между двумя радиовсплесками. Для измерения периода пульсар непрерывно наблюдают в течение длительного промежутка времени и считают на ленте число состоявшихся всплесков. Если теперь разделить этот длительный промежуток времени на число сосчитанных всплесков, то получится период между всплесками с большой точностью. Легко подсчитать, что пульсар СР 1919 за полгода посылает более ста миллионов радиовсплесков. Важно то, что число всплесков, подсчитанных в два отдельных полугодия, оказывается в точности одинаковым. Можно предполагать, что периодичность пульсаров еще более строгая; что через десять лет в числе, обозначающем период пульсара СР 1919, можно будет приписать еще одну цифру после запятой. Но строго говоря, написанный период — это средний период. Если бы, например, у пуль-

сара промежутки времени между всплесками были попеременно на тысячную долю секунды длиннее и короче, то обнаружить это явление было бы пока невозможно.

Сделаем еще одну оговорку. На самом деле при наблюдении пульсара периоды между его всплесками в течение года систематически изменяются. Это изменение происходит от того, что вследствие орбитального движения Земли скорость наблюдателя относительно пульсара закономерно то возрастает, то уменьшается. А поэтому согласно эффекту Доплера должен меняться и промежуток времени между всплесками, совершенно по тому же закону, по которому меняется промежуток времени между максимумами напряжения в электромагнитной волне. Когда Земля в своем орбитальном движении приближается к пульсару, наблюдаемый период между радиовсплесками пульсара должен уменьшаться, а при удалении увеличиваться. Этот эффект можно точно рассчитать и учесть. Строгое постоянство периодов у пульсара получается именно тогда, когда учтено влияние орбитального движения Земли.

Если изучать радиовсплески пульсара в различных длинах волн, то обнаруживается интересное явление. Моменты максимума всплеска в разных длинах волн не совпадают. По мере постепенного перехода ко все более коротким волнам момент максимума всплеска наступает все раньше и раньше. При этом ослабевает интенсивность всплеска. Можно сказать, что длинноволновое радиоизлучение запаздывает по сравнению с коротковолновым.

Это явление находит простое объяснение. Неправильно было бы считать, что какой-то физический процесс, происходящий с пульсаром, дает сначала всплеск в коротких радиоволнах, а потом последовательно во все более длинных. Такое предположение было бы очень искусственным, физически маловероятным. Всплеск пульсара во всех длинах волн происходит одновременно. Но на пути к нам радиоволны движутся не в абсолютной пустоте, а в межзвездном пространстве, заполненном заряженными частицами — свободными электронами. Известен физический закон, согласно которому скорость радиоволн должна при этом уменьшаться, причем замедление пропорционально плотности электронов и пропорционально длине волны радиоизлучения. Поэтому длин-

ные радиоволны, сильнее замедляясь, достигают Земли позднее, чем короткие радиоволны. Отставание максимума в длинных радиоволнах от максимума в коротких радиоволнах различно для различных пульсаров. Например, для CP 1919 (теперь этот пульсар называется PSR 1919+21; числа означают, что его прямое восхождение равно $19^h 19^m$, а склонение $+21^\circ$) всплеск самых длинных регистрируемых радиоволн (7,5 м) приходит через 8 секунд после всплеска самых коротких (10 см), а у PSR 329+54 промежуток времени между этими событиями достигает почти 17 секунд. Чем может вызываться это различие? Ответ прост. Расстояние до PSR 0329+54 более чем в два раза превышает расстояние до PSR 1919+21, поэтому для него отставание длинноволнового радиоизлучения во времени возрастает более чем вдвое.

Какова же физическая природа новых удивительных небесных тел, приковавших к себе внимание и наблюдателей и теоретиков, заслонивших на некоторое время другие важные астрономические открытия и сделавших 1968 год в астрономии годом пульсаров?

Строго периодические или почти строго периодические явления достаточно широко распространены во Вселенной. Таковы пульсации цефеид, переменность блеска у затменных звезд, обращения планет вокруг Солнца и спутников планет вокруг планет, вращения звезд. Однако периодическое явление со столь малым периодом встретилось впервые. Были даже высказаны интригующие предположения, что всплески излучения пульсаров — это сигналы, посылаемые внеземными цивилизациями. Но почему эти сигналы так однообразны? Насколько естественнее было бы ожидать от разумных существ, освоивших метод послышки мощных сигналов, не простой периодичности, а более сложного содержащего информацию ритма. Кроме того, пока развитие цивилизации можно представить только на планете, которая обращается около звезды. Если сигналы посылаются с движущейся по орбите планеты, то вследствие эффекта Доплера периоды между всплесками должны соответственно систематически изменяться, что не наблюдается. Эффект Доплера не сказывался бы в том случае, если бы плоскость орбиты была перпендикулярна лучу зрения. Но невероятно, чтобы это редкое условие выполнялось для всех пульсаров.

Таким образом волнующее предположение, что обнаружены внеземные цивилизации, должно быть отклонено.

Больше всего явление пульсаров напоминает явление пульсации цефеид. Но у цефеид периоды исчисляются часами и сутками. А у открываемых один за другим пульсаров они редко превосходили две секунды.

Теория, разработанная для цефеид, показывает, что период пульсации сжимающегося и раздувающегося свободного газообразного шара независимо от его размеров обратно пропорционален корню квадратному из его плотности. Следовательно, если пульсар действительно сжимается и раздувается как цефеида, то для того, чтобы период пульсации равнялся одной секунде, необходима чрезвычайно высокая плотность. Какие тела имеют такую плотность? Прежде всего на ум приходят звезды — белые карлики. Но даже огромная плотность белых карликов — десять тонн вещества в кубическом сантиметре — оказалась недостаточной. Она может обеспечить период пульсации только в 8 секунд, не меньше. Для обеспечения периода колебаний, например, в 0,8 с (такие пульсары уже были известны) нужна плотность в 100 раз бóльшая, чем у белых карликов.

Осталась единственная возможность — нейтронные звезды. Но это гипотетические, никогда еще не наблюдавшиеся звезды, реализующиеся, как думали, лишь в воображении теоретиков, которые, как это впервые в 1936 г. сделал Гамов, показали, что может существовать устойчивое состояние вещества при очень высоких плотностях, основным компонентом которых является вырожденная нейтронная жидкость. Теоретики подробно рассчитали модель нейтронной звезды. Она должна иметь радиус всего около 10 км при массе, близкой к массе Солнца. Температура ее поверхности — несколько тысяч градусов. При такой температуре внешний слой нейтронной звезды является твердой кристаллической корой толщиной около километра. К центру же звезды температура резко возрастает, достигая фантастического значения, превышающего 10 миллиардов градусов! Плотность материи в центральных областях нейтронной звезды также необычайно высока: в кубическом сантиметре содержатся сотни тонн вещества.

Нейтронная звезда, если она существует, может пульсировать с периодом в 2 секунды. Но к моменту,

когда за объяснением феномена пульсаров обратились к гипотезе нейтронных звезд, уже были открыты самые короткопериодические из известных ныне пульсаров PSR 0835 — 45 с периодом 0,089 секунды, а также пульсар, находящийся в Крабовидной туманности, — PSR 0531 + 21, имеющий наименьший из известных ныне периодов — 0,033 секунды. Столь малые периоды изменения блеска невозможно объяснить пульсацией даже нейтронной звезды.

Но появилась другая возможность объяснения. Теория показывает, что вращающаяся нейтронная звезда должна быть окружена пронизывающей ее магнитосферой — чрезвычайно мощным магнитным полем, синхронно вращающимся вместе с ней. Магнитное поле направляет поток заряженных частиц и ограничивает его областью одного или двух своих полюсов. Энергия, освобождаемая в соответствующем месте нейтронной звезды, над ее поверхностью, стимулирует излучение. Близ поверхности звезды образуется яркое пятно, посылающее излучение в направлении сравнительно узкого телесного угла. Нейтронная звезда действует как вращающийся радиомаяк. Расчет показывает, что вследствие чрезвычайно высокой плотности она может вращаться с огромной скоростью, не разрываясь и почти не деформируясь под влиянием центробежной силы даже при периоде вращения в 0,001 секунды. Белый карлик при таких периодах вращения, какие имеют пульсары PSR 0835 — 45 и PSR 0531 + 21, разлетелся бы на части.

Нет иной возможности физического объяснения явления пульсаров, кроме вращающихся нейтронных звезд. И все-таки такого рода удивительное объяснение, сопровождающееся материализацией, открытием ранее представлявшихся только теоретически допустимыми образований, требует подтверждений. В противном случае сомнение останется.

Прежде всего, поскольку принята гипотеза вращения, необходимо исследовать его подробнее. Период быстро вращающегося тела не может в течение долгого времени сохраняться совершенно строго. Вследствие любого взаимодействия с окружающей звезду средой, вращение должно замедляться. При выбрасывании из звезды каких-либо частиц или в результате излучения, угловая скорость вращения также должна изменяться. Изменится она также в том случае, если хоть немного

увеличится или уменьшится в ходе эволюции радиус звезды.

Выше мы писали, что у открываемых пульсаров обнаруживалась строгая периодичность пульсаций. Это утверждение, как вскоре выяснилось, не является совершенно верным. Благодаря тому, что период пульсаров можно определять с очень высокой степенью точности, достаточно точно можно определять и ничтожно малые вековые, т. е. постепенно накапливающиеся, изменения периода.

Впервые это удалось сделать для самого быстро вращающегося пульсара PSR 0531 + 21. Измерения, проведенные в октябре 1968 г. и в феврале 1969 г., показали, что в течение этого времени период пульсара увеличивался каждые сутки на 365 наносекунд (наносекунда — одна миллиардная доля секунды). В настоящее время уже более чем у 90 пульсаров измерены вековые изменения периодов вращения. Все они показывают постепенное увеличение периодов. По-видимому, это результат взаимодействия с окружающей средой.

Правда, в нескольких случаях зарегистрированы и небольшие скачкообразные уменьшения периодов, которые тоже находят любопытное и в то же время естественное объяснение. Когда период вращения нейтронной звезды постепенно увеличивается, ее форма должна соответственно немного изменяться. Этому препятствует твердая кора звезды. Нарастает напряжение, которое завершается взламыванием коры и скачкообразным изменением формы, — происходит «звездотрясение». Согласно механическим свойствам вращающихся тел новая форма всегда в таких случаях сообщает телу меньший момент инерции относительно оси вращения, что должно привести к увеличению (небольшому, конечно) угловой скорости вращения.

В таблице 25 для примера приведены данные о двенадцати пульсарах. Мы видим, что пульсары — это сравнительно близкие объекты (далекие обнаружить трудно). Большая часть периодов не превосходит одной секунды. Изменения периодов за сутки очень сильно различаются между собой.

Надо полагать, что в прошлом у каждого пульсара увеличение периода за сутки происходило не медленнее, чем в настоящее время, а быстрее. Поэтому если поделить период пульсара в секундах на увеличение периода

за сутки в секундах, то будет получен верхний, со значительным запасом, предел возраста пульсара, выраженный в сутках. Для пульсара PSR 0531+21 это дает $\frac{0,033}{36,5 \cdot 10^{-9}} \approx 9,0 \cdot 10^5$ суток ≈ 2470 лет. Он самый молодой из наблюдаемых пульсаров. В космогонии это чрезвычайно малый возраст. На самом деле пульсар еще существенно моложе, ведь в момент «рождения» его период

Т а б л и ц а 25. Периоды и расстояния двенадцати пульсаров

Название по каталогу	Период, с	Увеличение периода в наносекундах за сутки	Расстояние, пс
0153+61	2,352	16,358*	60
0329+54	0,715	0,177	26,8
0355+54	0,156	0,379	57,0
0531+21	0,033	36,526	56,8
0628-28	1,224	0,217	34,4
0823+26	0,531	0,145	19,4
0835-45	0,089	10,823	69,2
1133+16	1,188	0,323	4,8
1749-28	0,563	0,711	50,9
1919+21	1,337	0,116	12,4
1946+35	0,717	0,607	129,1
2106+44	0,414	0,005	129

уже должен был быть равен какой-то положительной величине. Если сопоставить все эти данные с тем, что пульсар PSR 0531+21 наблюдается в Крабовидной туманности, находится на том же расстоянии, что и она, и следовательно, погружен в эту туманность, а Крабовидная туманность образовалась в результате вспышки Сверхновой 1054 г., то нужно заключить, что и пульсар образовался в результате вспышки этой Сверхновой.

Дополнительные теоретические исследования показали, что материя нейтронных звезд может сформироваться только в условиях чрезвычайно высокого давления, когда под его нажимом электроны как бы вдавливаются в протоны, нейтрализуя их заряд. При нормальном спокойном течении эволюции звезды такой процесс произойти не может. Но условия, которые создаются во внутренних областях взрывающейся сверхновой звезды, как раз благоприятны для такого процесса. Нейтронные звезды должны образовываться после взрыва сверхновой, когда отделившаяся от звезды оболочка начинает рассеиваться

в окружающем пространстве. Это и есть рождение пульсара.

Обнажившаяся при рассеивании оболочки нейтронная звезда сначала имеет горячую поверхность: температура ее исчисляется миллионами градусов. Но затем происходит довольно быстрое охлаждение поверхности и поток направляющих электронов тоже теряет скорость, излучение индуцируется в основном длинноволновое, пульсар наблюдается только в радиочастотах. Однако у очень молодого пульсара охлаждение поверхности может быть еще не полным, соответственно излучение его может содержать коротковолновую часть — оптические и даже рентгеновские лучи. Это рассуждение замечательным образом находит подтверждение в том, что пульсар Крабовидной туманности является пока единственным наблюдаемым и оптически и в рентгеновских лучах. Период его пульсации в этих диапазонах длин волн тот же — 0,033 секунды.

И последнее подтверждение всей построенной картины. Именно пульсар PSR 0531+21 окружен яркой Крабовидной туманностью. Около еще двух сравнительно молодых пульсаров обнаруживаются туманности — остатки сверхновых звезд. У остальных пульсаров, значительно более старых, выброшенные оболочки сверхновых звезд успели уже рассеяться, раствориться в межзвездном пространстве.

Для того чтобы оценить общее число пульсаров в Галактике, нужно учесть, что те из них, которые удалены больше чем на 100—150 пс, пока не могут быть обнаружены вследствие слабости их излучения. Но и среди близких пульсаров более 80% остаются незамеченными, так как вследствие «неудачной» ориентации их оси вращения посылаемое ими направленное излучение минует Землю. Если все это учесть, то можно прийти к выводу, что в Галактике имеется около 300 тысяч пульсаров.

Загадочные «черные дыры»

Обнаружение нейтронных звезд спустя 30 лет после того, как теоретически была предсказана возможность их существования, является триумфом теории и аргументом, подтверждающим тезис Гегеля, что все разумное существует.

Несколько лет назад была предсказана возможность существования еще более необычайных для нашего понимания объектов, получивших название «черных дыр». Чтобы составить представление о природе и возможном процессе формирования этих объектов, рассмотрим для примера звезду, масса которой M в пять раз превосходит массу Солнца, а радиус R равен трем радиусам Солнца. Примерно такими характеристиками обладают звезды спектрального класса В8.

Критическая скорость на поверхности сферического тела определяется формулой

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (27)$$

и для рассмотренной звезды она оказывается равной 800 км/с, т. е. в 70 раз больше, чем на поверхности Земли.

Ускорение силы тяжести на поверхности звезды

$$a = \frac{GM}{R^2}, \quad (28)$$

оказывается равным 1,7 км/с² и в 170 раз превосходит гравитационное ускорение на поверхности Земли.

Звезда находится в равновесном состоянии, так как гравитационная сила, стремящаяся ее сжать, уравновешивается световым и газовым давлением. Если бы плотность звезды была всюду одинакова, то давление в ее центре, вызываемое гравитационными силами, которым противостоят силы газового и светового давления, равнялось бы

$$P = \frac{3M^2}{8\pi GR^4}. \quad (29)$$

Для рассмотренной звезды это давление составило бы огромную величину — около полутора миллиардов тонн на квадратный сантиметр. На самом деле плотность от поверхности к центру возрастает, и давление в центре звезды всегда значительно больше величины в правой части формулы (29).

Световое давление в недрах звезды поддерживается благодаря термоядерной реакции превращения водорода в гелий, сопровождающейся выделением энергии, переходящей в энергию излучения, которая затем медленно просачивается сквозь тело звезды и уходит с ее поверхности в мировое пространство. Однако наступает момент,

когда весь водород в центральных областях звезды, где температура достаточно высока и составляет несколько миллионов градусов, оказывается исчерпанным. Реакция приостанавливается. Так как энергия через излучение продолжает расходоваться, температура внутренних областей звезды понижается, и ослабленное световое давление начинает уступать гравитационному давлению. Внутренние области звезды сжимаются. При сжатии потенциальная энергия превращается в тепловую, температура центральных областей снова повышается, но тепловая энергия расходуется на излучение, и потому сжатие продолжается до тех пор, пока температура в центральной области звезды не достигнет нескольких сотен миллионов градусов. При этой температуре начинает действовать термоядерная реакция, при которой из трех атомов гелия образуется один атом углерода. После исчерпания гелия происходит новый процесс сжатия звезды, аналогичный тому, который последовал за выгоранием водорода, и вступают в действие новые различные термоядерные реакции, последовательность которых может длиться до образования железа. И в течение всех этих процессов звезда продолжает излучать энергию и сжиматься.

На самом деле теоретические расчеты показывают, что сжимается сначала лишь внутренняя область звезды, а ее атмосфера, оболочка, после выгорания водорода даже расширяется и охлаждается, так что звезда превращается в красный гигант. Однако эта стадия временная, в дальнейшем сжатие берет верх. При этом у звезд определенных классов, в результате накопления на некоторой глубине энергии, сбрасывается оболочка, происходит явление вспышки новых и сверхновых звезд.

Теоретическое исследование процессов показывает, что окончательная судьба звезд полностью зависит от величины их массы. Если масса звезды меньше, чем 1,2 массы Солнца, то она завершает свою эволюцию как белый карлик. При массах, заключенных между 1,2 и 3 массами Солнца, звезда превращается в нейтронную звезду. При этом на конечной стадии ей предшествует мощный сброс оболочки — вспышка сверхновой.

Если же масса звезды превышает три солнечных массы, то, оказывается, в соответствии с формулой (29), при уменьшении радиуса гравитационное давление в центральной области звезды становится настолько сокру-

шающе большим, что давление газа и световое давление не могут ему противодействовать в принципе. Перестает действовать закон, согласно которому увеличение сжатия сопровождается соответствующим увеличением его противодействия. Происходит так называемый коллапс, звезда оказывается раздавленной своей тяжестью. Так как радиус звезды при сжатии становится очень малым, формула (28) показывает, что ускорения при коллапсе — падении всей материи звезды в ее центр — чрезвычайно велики и, следовательно, очень велика становится и скорость падения.

Наконец, формула (27) показывает, что когда радиус звезды становится достаточно малым, критическая скорость на поверхности звезды станет равной скорости света. Подставим в равенство (27) вместо v значение скорости света и решим его относительно R :

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (30)$$

Величину R_g называют гравитационным радиусом звезды. Если радиус звезды стал меньше этой величины, то критическая скорость на ее поверхности становится больше скорости света. А так как в природе не может быть скорости, большей скорости света, то ничто не может выходить из этой звезды и удаляться, даже ее излучение. При этом звезда обладает сильным гравитационным полем, способным втягивать в себя окружающую ее материю. Звезда всё втягивает, всё поглощает, но ничего не выпускает, ничто не способно из нее выйти, даже излучение. Название, придуманное для таких звезд — «черные дыры», — нужно признать весьма удачным.

По формуле (30) находим, что гравитационный радиус рассмотренной звезды равен 30 км. Пять масс Солнца в шарике радиусом в 30 км! По этой формуле можно подсчитать, что если бы каким-нибудь образом Земля превратилась в «черную дыру», то ее гравитационный радиус равнялся бы всего 0,89 см. Вся Земля в шарике размером с вишенку!

Можно ли надеяться обнаружить «черные дыры», если они в действительности существуют? Казалось бы, нет. «Черные дыры» не излучают. Размеры их очень малы, и потому они не могут наблюдаться как темные объекты, заслоняющие свет звезд.

Но возможны косвенные методы обнаружения. При втягивании «черной дырой» из пространства диффузной материи движение последней будет чрезвычайно сильно ускоряться и, в общем случае, носить сложный характер. В окрестности «черной дыры» столкновения диффузных масс должны сопровождаться очень сильным разогревом и излучением, характерная особенность которого состоит в том, что значительная часть энергии будет коротковолновой — в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Это излучение, поскольку оно исходит не из самой «черной дыры», а из его окрестности, способно достигнуть наблюдателя и явиться признаком «черной дыры».

Фоновое реликтовое излучение

Как, вероятно, уже заметил читатель, история радиоастрономии сложилась так, что важнейшие открытия в этой области науки производились случайно. Само начало радиоастрономии было положено случайным открытием Янским дискретных источников излучения, приходящего на Землю из космоса. При исследовании явления мерцания радиоволн как случайный, побочный, но гораздо более важный результат, были обнаружены пульсары.

Еще одно крупное открытие наших дней было сделано совершенно неожиданно для тех, кто обнаружил новое явление. В 1965 г. Пензиас и Вилсон, два специалиста по радиоаппаратуре, исполняя поручение фирмы Белл, исследовали одно из весьма чувствительных устройств приема радиоизлучения и вносили в него усовершенствования для устранения влияния всех возможных помех. Когда после длительной работы они пришли к выводу, что в этом направлении ими все сделано и влияние земных источников радиоизлучения должно быть полностью уничтожено, обнаружилось, что в приемное устройство направленное на небо, продолжает поступать хотя и очень слабое, но уверенно регистрируемое радиоизлучение. Особенность его состояла в том, что интенсивность излучения показывала почти строгое постоянство для всех направлений, за исключением, разумеется, тех, в которых расположены дискретные космические источники радиоизлучения.

Значение сделанного открытия стало ясным тогда, когда дальнейшие исследования показали, что распределение приходящего излучения по длинам волн соответствует излучению «абсолютно черного тела». Оно такое, какое вызывалось бы телом, имеющим чрезвычайно низкую температуру: 3 кельвина (3 К). В соответствии с законом (24) Вина максимум энергии излучения при этой температуре приходится на длину волны около 1 мм.

Из почти полной независимости интенсивности обнаруженного радиоизлучения от направления (его изотропности) следует, что Вселенная пронизана этим излучением, оно заполняет все пространство между звездами и галактиками. Распределение энергии в спектре согласно закону для абсолютно черного тела с температурой 3 К показывает, что это излучение — не трансформированное излучение звезд, туманностей и галактик, а является независимой субстанцией, заполняющей пространство Вселенной. Поэтому оно получило название фонового излучения.

Как же произошло фоновое излучение? Единственное возможное объяснение, ставшее в настоящее время общепризнанным, такое. В первые мгновения «начального взрыва» температура взрывающегося «огненного шара» невероятно высока и составляет миллиарды градусов. Чрезвычайно сильно и его излучение. При расширении пространства температура «огненного шара» катастрофически быстро снижается, соответственно крайне быстро ослабевает его излучение. Поэтому основную часть энергии излучения, заполняющего ограниченную Вселенную, составляет та, которая была индуцирована в первые мгновения начального взрыва. В результате грандиозного расширения пространства Вселенной температура заполняющего ее излучения резко упала. Расчеты показывают, что 3 К — как раз та величина, которую следовало ожидать в настоящее время.

Возможность существования фонового излучения была предсказана С. Гамовым еще в 1938 г. Так что случайным и сенсационным было лишь его обнаружение. Само же явление получило немедленное признание и объяснение. Оно стало дополнительным доказательством верности гипотезы «начального взрыва», состоявшегося 13–20 миллиардов лет назад и породившего нашу Вселенную.

Новейшие исследования распределения фонового излучения по небу показали, что совершенно строгой изотропности нет. Наблюдается хотя и незначительное, но закономерное постепенное изменение его температуры через все небо от точки, находящейся в созвездии Льва, где она максимальна, до противоположной точки небесной сферы в созвездии Водолея, где она минимальна. Разность температур фонового излучения в этих двух точках составляет около 0,1 К. Она может толковаться единственным и очевидным образом — Солнечная система движется по отношению к фоновому излучению в направлении созвездия Льва со скоростью около 400 км/с. Вследствие эффекта Доплера спектр фонового излучения смещается в сторону более коротких волн, а это равносильно повышению температуры на 0,05 К. Спектр же излучения в направлении созвездия Водолея смещается в сторону длинных волн, и его температура воспринимается как понизившаяся на 0,05 К.

Угол между направлениями скоростей движения Солнца относительно фонового излучения и относительно центра Галактики (равной 220 км/с) составляет 61°. Из этого следует, что Галактика со скоростью, немного превышающей 500 км/с, движется относительно фонового излучения. Именно фоновое излучение, заполняющее Вселенную, нужно считать покоящимся, а Галактику движущейся. Поэтому перечисленные в первой главе космические движения, в которых участвует человек, нужно дополнить движением вместе с Галактикой относительно покоящегося во Вселенной фонового излучения. Скорость этого движения наибольшая среди всех космических движений, в которых участвует человек.

Дискретные источники рентгеновских лучей

Рентгеновские лучи занимают область спектра электромагнитных колебаний с длинами волн от 0,3 до 100 Å. Это область очень коротковолнового излучения и формально не следовало помещать этот параграф в главу, которая посвящена исследованию Вселенной с помощью радиоволн — самых длинноволновых электромагнитных колебаний. Но рентгеновские лучи не относятся и к оптической части спектра. Поэтому помещение данных о дискретных источниках рентгеновских лучей в настоящую главу имеет то оправдание, что оно позволит объе-

динить исследования, выполненные в неоптическом диапазоне лучей.

Рентгеновские лучи полностью поглощаются атмосферой и до поверхности Земли не доходят. Чтобы выяснить, нет ли во Вселенной объектов, испускающих эти лучи, нужно производить заатмосферные наблюдения. Вопрос этот очень важен, так как рентгеновские лучи находятся на другом от радиоволн конце спектра электромагнитных колебаний, в то время как оптические лучи занимают середину спектра. Имея данные об излучении небесных тел в радиодиапазоне, оптическом диапазоне и в диапазоне рентгеновских лучей, астрономия располагала бы возможностью извлекать основную информацию, содержащуюся во всем спектре электромагнитных колебаний.

Один дискретный источник рентгеновского излучения известен уже давно — это наше Солнце. Понятно, почему рентгеновское излучение Солнца доступно регистрации. Каждая звезда излучает во всех длинах волн. Но в радиоволнах и в рентгеновских лучах обычные звезды излучают энергии в миллионы раз меньше, чем в оптическом диапазоне, поэтому эти излучения пока неуловимы. Только благодаря большой близости Солнца можно принимать его радио- и рентгеновское излучение.

Возникает, однако, вопрос, нет ли на небе каких-нибудь специфичных объектов, обладающих сильным доступным измерению рентгеновским излучением? Ведь имеются, как выяснилось, объекты с сильным радиоизлучением. Разрешить этот вопрос можно только при помощи заатмосферных наблюдений.

В июне 1962 г. высотная ракета, снабженная специальным устройством для регистрации потока рентгеновских лучей в длине волны $3 \text{ \AA}$, поднялась в штате Нью-Мексико (США). Она обнаружила мощный источник рентгеновских лучей в области центра Галактики. Последующие запуски ракет позволили внимательно изучить значительную область (58% всего неба) при разрешающей способности детектора около двух градусов. Исследование записей приборов привело Х. Фридмана и его сотрудников к выводу о существовании еще двух сильных дискретных источников рентгеновских лучей.

Один из них находится в созвездии Скорпиона на расстоянии 20° от направления на галактический центр.

Детектор прошел область Скорпиона восемь раз, что позволило построить диаграмму распределения интенсивностей рентгеновских лучей в этой области. Полная интенсивность источника сравнима с интенсивностью в том же диапазоне спокойного Солнца, которая также измерена при помощи высотных ракет.

Третий дискретный источник рентгеновских лучей совпадает с Крабовидной туманностью, которая является результатом вспышки сверхновой звезды, происшедшей в нашей Галактике в 1054 г. Крабовидная туманность — оптически яркий объект и сильный источник радиоизлучения. Теперь выяснилось, что она является также мощным излучателем рентгеновских лучей.

Первые наблюдения дискретных источников рентгеновских лучей обладали малой точностью и чувствительностью. Недостаточная стабилизация высотных ракет, с которых велись наблюдения, не позволяла уверенно определять направление источника. По этой же причине низка была разрешающая способность наблюдений: два близких дискретных источника принимались за один.

Введение усовершенствований в методы стабилизации высотных ракет и использование искусственных спутников Земли позволило значительно повысить точность фиксации положений источников рентгеновского излучения. Теперь она доведена до десятка секунд дуги. Повысилась также чувствительность детекторов, что позволяет обнаруживать более слабые источники.

В 1977 г. Форман и его сотрудники составили каталог рентгеновских источников излучения, построенный при помощи наблюдений, выполненных на ИСЗ «Ухуру» и содержащий 261 источник. А общий каталог, опубликованный в 1979 г. П. Р. Амнуэлем, О. Г. Гусейновым и Ш. Ю. Рахамимовым, включает 517 рентгеновских источников излучения.

Расположение на небе этих объектов, как и в случае источников радиоизлучения, указывает на существование двух категорий объектов. Первые имеют достаточно сильную галактическую концентрацию — это, как правило, более сильные источники. Вторые галактической концентрации не обнаруживают. Очевидно, что среди первых должны преобладать галактические объекты, а среди вторых — внегалактические.

Благодаря достигнутой высокой точности определения положений значительное число рентгеновских источников

излучения уже отождествлено с оптически наблюдаемыми объектами. Около сорока из них оказались связанными с двойными звездами. В тесных двойных системах вследствие сильных взаимодействий происходит перетекание вещества от одного компонента к другому. В том месте, где сильно ускорившаяся струя вещества падает на поверхность звезды, резко возрастает температура, в излучении усиливается коротковолновая часть спектра, в том числе рентгеновская. Особенно велики скорости, высоки температуры и сильно рентгеновское излучение, если вещество перетекает с нормальной звезды на компактный компонент — нейтронную звезду либо, возможно, «черную дыру». Некоторые из этих объектов оказались рентгеновскими пульсарами.

Например, рентгеновский источник Her X-1 отождествлен с затменной двойной HZ Her. Наблюдения показали, что рентгеновский источник затмевается с периодом в 1,7 суток. При этом рентгеновское излучение полностью прекращается на 0,24 суток. «Включение» и «выключение» рентгеновского излучения происходит почти мгновенно, что, в соответствии с теорией, указывает на малую величину области, где генерируется это излучение. Оптическая переменность у двойной имеет тот же период — 1,7 суток. Рентгеновский источник кроме того обнаруживает импульсивную переменность с периодом 1,24 секунды — это пульсар.

Восемь рентгеновских источников излучения оказались связанными с шаровыми скоплениями. Здесь наиболее интересным является то обстоятельство, что во всех случаях источник расположен в центре скопления. Если это опять двойные системы, в которых один из компонентов в свою очередь — двойная звезда, то почему все они находятся в центре скоплений? Массы двойных систем невелики, и значительную часть времени они должны проводить на заметных расстояниях от центра скопления. Очень мала вероятность события, в котором все восемь двойных систем оказались бы в центре своих скоплений. Но если рентгеновское излучение вызывается столкновением и разогреванием струй вещества при приближении к «черной дыре», масса которой велика, порядка 1000 масс Солнца, то центральное положение источника в скоплении закономерно. Большие массы, взаимодействуя гравитационно с остальными телами скопления, должны скапливаться в его центре. Именно с рентгенов-

скими источниками излучения, расположенными в центрах шаровых скоплений, связаны наибольшие надежды на обнаружение «черных дыр». Но, конечно, нужны дополнительные аргументы, а пока их найти не удастся.

Интересно, что рентгеновский объект, расположенный в ядре Галактики, имеет сходные черты с теми, которые наблюдаются в центрах шаровых скоплений. Может быть, в центре Галактики находится «черная дыра»?!

Рентгеновским источником излучения является пульсар Крабовидной туманности. Он не входит в двойную систему, и его рентгеновское излучение является результатом высокой температуры не остывшей поверхности молодой нейтронной звезды. Рентгеновским излучателем является и сама Крабовидная туманность. В этом молодом реликте сверхновой скорости газовых масс еще велики, высокая температура их столкновений вызывает рентгеновское излучение.

Большое число внегалактических рентгеновских источников излучения отождествлено с галактиками. Во всех случаях это галактики, обладающие особенностями — широкими эмиссионными линиями в спектрах, указывающими на бурные процессы, и большими скоростями газовых масс в ядрах этих галактик.

Таким образом рентгеновское излучение, само редко встречающееся, являющееся особенностью, всегда оказывается связанным с телами, природа которых необычна.

Инфракрасные объекты

Успехи радиоастрономии и рентгеновской астрономии побудили наблюдателей искать возможностей применения новых, еще не использованных в астрономии длин волн электромагнитных колебаний.

Одну такую возможность предвидел еще Вильям Гершель, который экспериментально показал, что Солнце посылает на Землю невидимые глазу лучи, расположенные за красной границей оптического спектра, так называемые инфракрасные лучи.

Область инфракрасных лучей расположена между оптической частью спектра и областью радиоволн (см. рис. 106). Она простирается от длин волн 0,7 до 1000 мкм (1 мкм — 1 микрометр = 10^{-6} м = 10 000 Å). Для большей части этой области спектра земная атмосфера непрозрач-

на. Здесь лежат многочисленные линии и полосы поглощения водяного пара и других газов, имеющих в атмосфере Земли. Эти линии и полосы сливаются, делая атмосферу непрозрачной для большей части инфракрасных волн. Но все-таки сочетание сливающихся линий и полос поглощения таково, что остаются три сравнительно широких окна прозрачности: от 0,7 до 1,3 мкм — это так называемая ближняя инфракрасная область, от 8 до 14 и от 17 до 22 мкм. Кроме того, образуется четыре узких окна прозрачности, расположенных около 1,65, 2,2, 3,6 и 4,8 мкм.

Ближняя инфракрасная область волн (от 0,7 до 1,3 мкм) используется в астрономии уже давно. О некоторых результатах таких исследований мы сообщили в параграфе «Ядро Галактики». Но больший интерес представляет инфракрасное излучение, не примыкающее непосредственно к оптическому, а более далекое в спектре от него, расположенное где-нибудь между оптическим излучением и радиоизлучением и несущее в себе более независимую информацию. В то же время приходится считаться с тем, что по мере перехода к большим длинам волн излучение небесных тел в инфракрасных лучах быстро ослабевает и очень далеко от оптической области наблюдать становится невозможно.

Поэтому группа астрономов обсерватории Маунт Вилсон, построив для наблюдений в инфракрасной области специальный 1,5-метровый телескоп, избрала окно прозрачности около 2,2 мкм (оно простирается от 2,0 до 2,4 мкм) для выполнения инфракрасного обозрения неба. Согласно закону Вина около 2,2 мкм лежит максимум излучения звезд с температурой 1300 К.

Телескоп мог обозревать приблизительно 75% всего неба. Приемники инфракрасного излучения приблизительно в тысячу раз менее чувствительны, чем приемники оптического излучения. Поэтому 1,5-метровый телескоп смог надежно обнаружить, определить положения и измерить поток инфракрасных лучей в области 2,2 мкм только у 5500 точечных объектов.

При обозрении простым глазом 75% всего неба человек, обладающий острым зрением, видит примерно 6000 звезд. Следовательно, 1,5-метровый телескоп «видит» на небе в инфракрасных лучах примерно столько же точечных объектов-звезд, сколько в обычных оптических лучах видит невооруженный глаз человека.

Но общими из этих 5500 и 6000 звезд оказывается менее 2000. Вид украшающих небо созвездий в инфракрасных лучах совершенно иной, чем в оптических лучах. У ночных животных — летучих мышей, сов и других зрение более чувствительно к инфракрасным лучам, следовательно, они видят другое звездное небо, иной рисунок созвездий, чем мы.

Причина различия ясна. Звезды, имеющие высокие температуры (5000 К и более), излучают сравнительно много в оптических и ультрафиолетовых лучах и очень мало в инфракрасных. При наблюдении в инфракрасных лучах эти звезды становятся намного слабее, многие из них перестают быть видимыми. С другой стороны, звезды низких температур излучают больше в инфракрасных лучах, чем в оптических и ультрафиолетовых; они становятся ярче при наблюдении в инфракрасных лучах. Многие низкотемпературные звезды, не видимые невооруженному глазу, оказываются в инфракрасном обозрении яркими.

Так, например, в созвездии Ориона красноватая (следовательно, низкотемпературная) звезда первой величины Бетельгейзе в инфракрасном обозрении становится еще ярче, а ослепительный голубовато-белый Ригель превращается в совсем слабую звездочку. Голубоватые Беллатрикс и три звезды пояса Ориона в инфракрасном обозрении вовсе исчезают, но взамен их, на иных, разумеется, местах, появляются три низкотемпературные звезды, не видимые невооруженным глазом. В итоге созвездие Ориона полностью меняет свой вид.

Наибольший интерес представляют именно те звезды, которые не видны при наблюдении невооруженным глазом и даже в некоторые оптические телескопы, но фигурируют в инфракрасном обозрении. Эти звезды можно назвать инфракрасными звездами. Можно, например, подсчитать, что звезда с температурой менее 1000 К, фигурирующая в инфракрасном обозрении, не будет видна даже в 5-метровый телескоп.

Для инфракрасных звезд поток излучения дополнительно измерялся и в области 0,7—0,9 мкм, т. е. в ближней инфракрасной области. Сравнение яркости в двух инфракрасных областях, ближней и дальней, позволяет оценивать температуру звезды.

Из 5500 объектов инфракрасного обозрения у 1020 оценка температуры поверхности оказывается ниже 2000 К, в том числе у 110 даже ниже 1500 К.

Какова природа инфракрасных звезд? Действительно, ли у них такие низкие температуры? Не являются ли они протозвездами, т. е. объектами, превращающимися из сжимающихся газовых туманностей в звезды и начавшими постепенно разогреваться?

Оказалось, что у большинства этих объектов температура поверхности в действительности не так низка. Инфракрасные звезды показывают очень сильную галактическую концентрацию и, следовательно, многие из них расположены внутри поглощающей свет материи, стелющейся около плоскости Галактики. Кроме того, инфракрасные звезды показывают довольно сильную концентрацию к центру Галактики. В направлениях, близких к центру Галактики, плотность поглощающей свет материи особенно велика на большом протяжении.

Если в плоскости Галактики, в направлении к ее центру, на расстоянии 6000 пс находится звезда, то ее излучение в оптических лучах вследствие поглощения света ослабится примерно в 40 000 раз, а в инфракрасных лучах только в четыре раза. Если эта звезда обыкновенный желтый или даже белый сверхгигант с температурой 5000—8000 К, то она вследствие почти полного поглощения оптического излучения будет наблюдаться как инфракрасная звезда. Оказывается, большая часть инфракрасных звезд — это просто очень сильно покрасневшие в результате поглощения света в межзвездном пространстве обыкновенные гиганты и сверхгиганты, имеющие в действительности сравнительно высокую температуру поверхности.

Но у значительной части крайне инфракрасных звезд температура поверхности оказывается действительно очень низкой: от 1500 К до 2000 К. Большая часть из них является переменными звездами с большим периодом изменения блеска. У некоторых из них поток излучения за три года изменился почти в 10 раз. Существование очень красных долгопериодических переменных звезд было известно и ранее.

Особый интерес представляют несколько объектов, не обнаруживающих признаков переменности инфракрасного излучения. Один из них — крайне инфракрасная звезда, расположенная в созвездии Лебедя. Она специально подверглась дополнительному исследованию в различных областях инфракрасного излучения. Выяснилось, что в области 20 мкм ее блеск превосходит блеск всех светил,

кроме Солнца. Распределение энергии в спектре соответствует температуре поверхности в 1000 К. Эта звезда — редкое сочетание высокой светимости в инфракрасных лучах и отсутствия признаков переменности. Оценки межзвездного поглощения света в направлении этой звезды не позволяют считать, что ее крайне красный цвет объясняется поглощением. Можно предположить, что это гигантская звезда, окруженная сравнительно холодным газо-пылевым облаком. А может быть, это действительно разогревающаяся, формирующаяся из диффузного облака звезда? Но тогда, если область, в которой находится инфракрасный объект, есть область формирования звезд, то почему по соседству с ним нет молодых, но уже сформировавшихся звезд — горячих гигантов и сверхгигантов?

Еще один такой крайне инфракрасный точечный объект найден в туманности Ориона — огромной внутригалактической водородной туманности. Помимо отсутствия переменности блеска и очень высокой инфракрасной светимости этот объект примечателен тем, что сравнительно сильное инфракрасное излучение посылает не только он, но и небольшая примыкающая к нему протяженная область, по-видимому, некоторое туманное образование. Температура звезды оценивается в 650 К, а температура туманного образования — даже в 150 К, т. е. в 120 градусов Цельсия ниже нуля.

Сделав первые шаги, инфракрасная астрономия уже обнаружила новые интересные явления, поставила новые вопросы. Это неудивительно. Разнообразие тел Вселенной огромно и среди них существуют и такие, которые наиболее богатую информацию о себе посылают в инфракрасном излучении.

ЭЛЕМЕНТЫ ДИНАМИКИ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Основную часть массы звездных систем составляет материя звезд. На долю всех остальных форм материи — пыли, газа, а также, вероятно, имеющих холодных тел, подобных планетам и метеорам Солнечной системы, приходится несколько процентов общей массы галактик. Поэтому при изучении динамики звездных систем достаточно рассматривать только звезды, а другие формы материи можно не принимать во внимание.

Расстояния между звездами очень велики в сравнении с размерами звезд. Радиус Солнца равен $6,96 \cdot 10^5$ км, а расстояние от Солнца до ближайшей звезды α Центавра равно $4,07 \cdot 10^{13}$ км, т. е. приблизительно в $6 \cdot 10^7$ раз больше радиуса Солнца и во столько же примерно раз больше радиуса α Центавра, так как эта звезда по своим физическим характеристикам очень сходна с Солнцем.

Поэтому, рассматривая звездную систему как систему отдельных (дискретных) тел — звезд, мы практически можем эти тела считать точечными.

Часто звездные системы сравнивают с газом, называют «звездным газом». Ведь и обычный газ состоит из отдельных молекул или атомов, отделенных друг от друга расстоянием. Однако, если производить такое сравнение, то нужно считать звездные системы очень разреженным газом. В самом деле, например, в окружающем нас воздухе молекулы азота, являющегося главной составной частью воздуха, имеют радиусы $3,3 \cdot 10^{-8}$ см, а расстояние между соседними молекулами в среднем составляют около $3,3 \cdot 10^{-7}$ см. Таким образом, расстояния между соседними молекулами в воздухе только приблизительно в 10 раз больше, чем радиусы молекул. Для того чтобы сделать отношение расстояний между соседними атомами к радиусу атомов таким же, как отношение расстояний между звездами в звездных системах к размерам звезд,

нужно было бы расстояния между атомами воздуха увеличить в шесть миллионов раз. Плотность газа обратно пропорциональна кубу среднего расстояния между соседними атомами. Поэтому, сравнивая район Галактики в окрестностях Солнца с газом, мы должны считать этот газ в $\left(\frac{6 \cdot 10^7}{10}\right)^3 = 2,16 \cdot 10^{20}$ раз менее плотным, чем воздух в обычных условиях. Такой разреженный газ в настоящее время нельзя получить даже в вакуумных установках. Самая низкая достигнутая в лабораториях плотность газа приблизительно в 10^{18} раз меньше плотности воздуха в обычных условиях. Следовательно, «звездный газ» — это чрезвычайно разреженный «газ».

Другая особенность звездных систем — звездного газа — состоит в том, что это самогравитирующий газ. Это значит, что звездные системы сами создают то силовое поле, которое управляет движениями, происходящими в этих системах. И форма, которую принимает звездная система, определяется тем силовым полем, которое она сама создает. Этого нельзя сказать о том газе — воздухе, который нас окружает. Он находится в силовом поле, созданном главным образом Землей, а не им самим. В лабораторных условиях невозможно создать свободное самогравитирующее газовое облако, которое под действием своего собственного притяжения, не испытывая посторонних воздействий, приняло бы свойственную ему форму. Теоретически показано, что такое самогравитирующее газовое облако, если оно не вращается, примет форму шара, а если вращается — форму сжатого эллипсоида вращения. Мы можем наблюдать такие гигантские шары звездного газа, созданные природой, в виде шаровых звездных скоплений и эллиптических галактик Е0. Посмотрите на фотографию шарового скопления ω Центавра (см. рис. 21). Под действием самотяготения, вызванного звездами, скопление приняло правильную шарообразную форму. Созерцание этой гигантской системы производит глубокое впечатление гармонии. Здесь не властвует случай, а действует непреложный закон. Звезды располагаются самым тесным образом в центре. По мере удаления от центра ряды их, подчиняясь некоторому закону, постепенно редкнут и где-то, в не вполне определенном месте и дальше, чем это кажется глазу, скопление кончается. В этом космическом шаре звездного газа мы можем подсчитывать молекулы — звезды, подробно изучать его

строение и производить сравнение результатов наблюдений с теорией.

Эллипсоиды звездного газа — это эллиптические галактики с различной степенью сжатия, от E1 до E7, а также еще более сильно сжатые спиральные галактики.

Динамика двойных звезд и двойных галактик

Самым простым случаем звездных движений является движение компонентов двойной звезды. Эта задача, называемая задачей двух тел, была изучена применительно к планетам Солнечной системы в первой половине 17-го в. Кеплером и теоретически полностью обоснована во второй половине того же века Ньютоном. Как и планеты около Солнца, один компонент (т. е. одна из звезд)

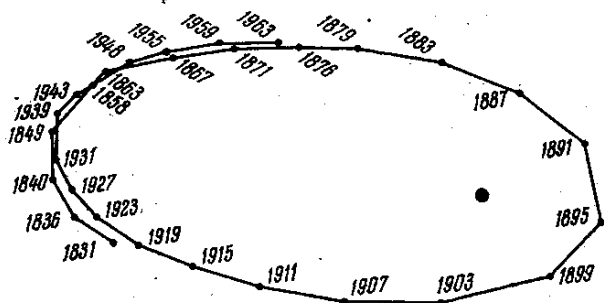


Рис. 111. Видимая относительная орбита двойной звезды 70 Змееносца.

двойной звезды движется около другого компонента по эллиптической орбите. Это подтверждается наблюдениями многих двойных звезд. Вот, например, как изменялось положение слабого компонента по отношению к яркому компоненту в двойной звезде 70 Змееносца за период с 1831 и по 1963 г. (рис. 111). Проставленные годы указывают момент наблюдения. Мы видим, что за 132 года один компонент прошел полный путь по эллиптической орбите вокруг другого компонента и еще часть этого пути. У двойных звезд с большими периодами обращения за время проводимых в астрономии наблюдений компоненты успели пройти только часть пути по орбите. Чем меньше эта часть, тем менее уверенно определяется орбита. Трудность задачи состоит еще в том, что наблюдае-

мый эллипс движения не есть истинный эллипс, а является проекцией последнего на небесную сферу. Проекция эллипса — всегда тоже эллипс. Нужно, используя дополнительные данные — скорость движения на различных участках видимого эллипса и положение главного компонента внутри видимого эллипса — по видимому эллипсу

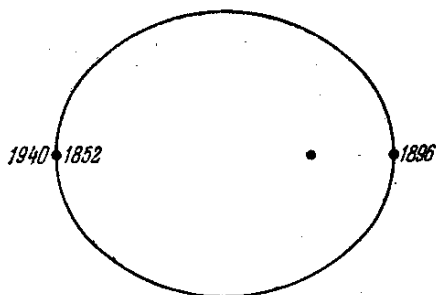


Рис. 112. Истинная относительная орбита двойной звезды 70 Змееносца.

восстановить истинный эллипс. Для этого разработано несколько методов. Вот, оказывается, как выглядит истинная орбита двойной звезды 70 Змееносца (рис. 112).

Когда получен истинный эллипс, то определяются его большая и малая полуоси a и b в условных единицах, а если известно расстояние до двойной звезды, то и в линейных единицах. Важное значение имеет определение большой полуоси. Согласно закону Кеплера сумма масс компонентов $M_1 + M_2$, период обращения P и большая полуось орбиты a связаны соотношением

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{P^2}. \quad (31)$$

Здесь G — постоянная всемирного тяготения, равная $6,67 \cdot 10^{-8}$, если $M_1 + M_2$ выражено в граммах, a — в сантиметрах, P — в секундах. Следовательно, зная период обращения и большую полуось, мы сразу находим сумму масс компонентов. Например, для двойной 70 Змееносца, истинная орбита которой изображена на рис. 112, большая полуось a равна $3,4 \cdot 10^9$ км, период — 89 годам, а суммарная масса оказывается равной $3,0 \cdot 10^{33}$ г, т. е. приблизительно 1,5 массы Солнца. Возможность определить массы звезд в двойных системах имеет огромное

значение, так как это до сих пор единственный способ определения масс звезд. Все наши сведения о массах звезд основаны исключительно на изучении двойных звезд.

Но можно ли определить массу каждого компонента отдельно? Оказывается, можно сделать и это, если учесть, что движутся оба компонента двойной звезды. На

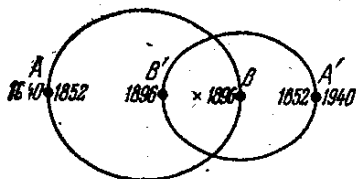


Рис. 113. Истинные абсолютные орбиты компонентов двойной звезды 70 Змееносца.

рис. 111 мы рассматривали движение одного из компонентов по отношению к другому, т. е. условно считали один из компонентов неподвижным и получили так называемую относительную орбиту. На самом деле каждый из компонентов движется по своей эллип-

тической орбите вокруг общего центра инерции двойной звезды. Это можно обнаружить, опираясь на другие звезды, достаточно далекие, чтобы их можно было считать неподвижными. Тогда мы вместо одной относительной орбиты получили бы две абсолютные орбиты, показанные на рис. 113. Сравнение взаимных положений компонентов на орбитах рис. 113 показывает, что это соответствует одной относительной орбите рис. 112. Если теперь определить большие полуоси истинных абсолютных орбит a_1 и a_2 , то легко найти отношение масс компонентов, так как они обратно пропорциональны большим полуосям:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}. \quad (32)$$

Если же известна сумма масс (31) и их отношение (32), то, решив эти два уравнения с двумя неизвестными, мы найдем массу каждого компонента двойной звезды. В 70 Змееносца первый компонент имеет массу 0,87, а второй — 0,63 массы Солнца.

Скорость движения v каждого компонента, например, первого, по своей абсолютной орбите, т. е. вокруг центра инерции, определяется из равенства

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{G m_1 m_2}{R} = - \frac{G m_1 m_2}{2a}. \quad (33)$$

В этом равенстве каждый член имеет важный физический смысл. Первый член левой части

$$\frac{M_1 v_1^2}{2} \quad (34)$$

называется кинетической энергией, т. е. энергией движения. Он пропорционален массе тела и квадрату его скорости. Может быть, это на первый взгляд кажется удивительным, но энергия движения пропорциональна не первой степени скорости, а второй. Пуля, летящая вдвое быстрее, при ударе о препятствие выделяет тепла больше не вдвое, а в четыре раза. Можно сказать, что вдвое быстрее летящий камень при ударе о тело нанесет повреждения в четыре раза большие. Если три автомобиля разогнались, первый до скорости 10 м/с, второй — до 20 м/с, и третий — до 40 м/с, а затем свободно с выключенными моторами въезжают в гору, то первый автомобиль остановится на высоте 5 м, второй — на высоте 20 м, а третий — на высоте 80 м. Мы видим, что энергия, характеризующая здесь способность подниматься вверх, преодолевать притяжение Земли, пропорциональна квадрату скорости.

Второй член левой части равенства

$$-\frac{GM_1 M_2}{R} \quad (35)$$

называется потенциальной энергией тела. Если компонент находится на расстоянии R от центра инерции двойной звезды, то работа, которую нужно затратить, чтобы преодолеть силу взаимного притяжения компонентов и удалить компонент на бесконечность, т. е. окончательно разделить двойную звезду, равна как раз величине (35).

Величина

$$-\frac{GM_1 M_2}{2a}, \quad (36)$$

стоящая в правой части равенства (33), во время движения компонентов двойной звезды не меняется, так как и постоянная тяготения G , и массы компонентов M_1 и M_2 , и большая полуось орбиты a остаются во время движения компонентов неизменными. Следовательно, сумма кинетической и потенциальной энергий компонента не изменяется во время движения. Когда компонент приближается к центру инерции, расстояние R уменьшается и

потенциальная энергия (35) по абсолютной величине возрастает, но нужно помнить, что она имеет знак минус. При приближении к центру инерции возрастает и скорость, так как сила тяготения разгоняет тело. При этом кинетическая энергия (34) возрастает ровно настолько, насколько возросла по абсолютной величине потенциальная энергия, так что с учетом знака потенциальной энергии сумма этих энергий остается во время движения неизменной. Наибольшая скорость, следовательно, достигается в точке, ближайшей к центру инерции, — в так называемом *периастрии* (точки B и B' рис. 113), а наименьшая скорость — в *апоастрии* (точки A и A').

Если рассматривать всё более вытянутые орбиты — эллипсы, то нужно считать, что в них полуось a становится все больше и, значит, член в правой части уравнения (33) все меньше. В предельном случае, когда мы считаем полуось a бесконечно большой, эллипс разрывается, превращается в параболу — уже в незамкнутую кривую. Каждый компонент двойной звезды, двигаясь по параболе, не будет совершать обращений вокруг центра инерции, а уйдет бесконечно далеко. Двойная система распадется. Так как при безграничном возрастании полуоси a выражение (35) стремится к нулю, при движении по параболе справедливо уравнение, получаемое из (33) после приравнивания его правой части нулю:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{G m_1 m_2}{R} = 0. \quad (37)$$

Таким образом, сравнивая (33) и (37), мы видим, что для устойчивости двойной звезды необходимо, чтобы сумма кинетической и потенциальной энергий каждого компонента была отрицательной величиной. Если эта сумма энергий оказывается равной нулю, то двойная звезда распадается. При положительности суммы кинетической и потенциальной энергий движение происходит по гиперболической орбите, которая незамкнута, следовательно, и в этом случае система распадается.

Если решить равенство (37) относительно скорости v_1 , то получим

$$v_1 = \sqrt{\frac{2Gm_2}{R}}, \quad (38)$$

что является значением скорости, достаточной для ухода компонента из системы. Эта скорость называется кри-

тической. Формулу (38) можно использовать для вычисления критической скорости на поверхности Земли, потому что движение какого-нибудь тела в поле Земли есть также задача двух тел. Если вместо M_2 подставить массу Земли $5,98 \cdot 10^{27}$ г, вместо R — радиус Земли $6,37 \cdot 10^8$ см, то найдем

$$v_1 = 1,12 \cdot 10^6 \text{ см/с} = 11,2 \text{ км/с.}$$

Эту скорость, необходимую для того, чтобы преодолеть притяжение Земли, уйти от нее, называют *второй космической скоростью*.

Теперь рассмотрим другой крайний случай. Пусть двойная звезда не только устойчива, но расстояние между компонентами во все время движения остается неизменным. Так будет, если орбиты звезд круговые. Тогда во все время движения $R = a$ и, сделав приведение подобных членов в равенстве (33), мы получим

$$\frac{M_1 v_1^2}{2} - \frac{1}{2} \frac{GM_1 M_2}{R} = 0. \quad (39)$$

Таким образом, при движении по круговой орбите, т. е. при неизменности размеров двойной звезды, равна нулю сумма кинетической энергии и половины потенциальной энергии.

Решая уравнение (39), мы получим значение скорости при движении по круговой орбите

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_2}{R}}. \quad (40)$$

По формуле (40) можно, например, вычислить скорость, которую должен иметь при запуске искусственный спутник Земли, чтобы двигаться по круговой орбите (у поверхности Земли). Получим $v_1 = 7,91$ км/с. Эта скорость обычно называется *первой космической скоростью*. Сравнение с (38) показывает, что вторая космическая скорость (скорость, нужная для удаления на бесконечность) в $\sqrt{2}$ раз больше первой космической скорости.

В заключение этого параграфа мы хотим еще раз обратить внимание читателя на полученные нами два важных вывода, которые понадобятся в дальнейшем: 1) если сумма кинетической и потенциальной энергий компонента двойной звезды равна нулю или положительна, то двойная звезда распадается, 2) если движение компонен-

та происходит по круговой орбите, т. е. если для двойной звезды характерна не только устойчивость, но и постоянство размера системы, то равна нулю сумма кинетической энергии и половины потенциальной энергии.

Двойные галактики

Если две звезды занимают на небе очень близкое друг к другу положение, то все-таки нельзя только на основании этого утверждать, что они образуют двойную систему. Может быть так, что две звезды находятся друг от друга очень далеко, между собой не связаны, но случайно направления на них оказались почти совпадающими, как могут для прохожего почти совпадать направления на уличный фонарь и на Луну. Такую пару звезд принято называть оптической парой. Только после того как в результате обычно многолетних наблюдений выяснится, что одна из звезд движется по орбите около другой, можно утверждать, что это не оптическая пара, что две звезды образуют физическую систему.

Как и звезды, галактики довольно часто встречаются в виде пар. Пример тесной пары галактик NGC 4567 и NGC 4568 приведен на рис. 114. Но для галактик гораздо труднее выяснить, является ли наблюдаемая пара физически двойной галактикой или это только оптическая пара. У двойной галактики движение одного компонента по орбите вокруг другого настолько медленно, что его невозможно заметить даже после многолетних наблюдений. Покажем это простым расчетом. Пусть физически двойная галактика находится от нас на сравнительно небольшом внегалактическом расстоянии 10 Мпс и наблюдаемое угловое расстояние между центрами компонентов составляет $20'$. На расстоянии 10 Мпс угол $20'$ соответствует приблизительно 50 кпс, следовательно, если массы галактик одинаковы, то расстояние каждого компонента до центра инерции двойной системы равно 25 кпс. Будем считать теперь для простоты, что орбита компонента круговая, а масса его равна массе нашей. Галактики и составляет приблизительно 10^{11} г. Тогда по формуле (40) мы сосчитаем, что скорость орбитального движения равна приблизительно 100 км/с. Это, конечно, немалая скорость. Но на расстоянии 10 Мпс скорость в 100 км/с даст за год смещение, приблизительно равное $0'',000002$. Значит, нужно ждать 5000 лет, чтобы смещение составило

0",01 и могло быть обнаружено современными методами. Для того чтобы выяснить, является ли двойная система физической, недостаточно просто обнаружить смещение компонента, нужно еще убедиться в том, что движение является орбитальным, т. е. происходит по дуге. Это потребовало бы по крайней мере еще в 100 000 раз большего времени наблюдений за двойной галактикой, т. е. $5 \cdot 10^8$ лет.



Рис. 114. Двойная галактика в созвездии Девы NGC 4567 и NGC 4568.

Итак, обнаружить орбитальное движение у двойной галактики за приемлемый срок невозможно. Значит ли это, что мы не можем вообще утверждать, что двойные галактики существуют, что среди наблюдаемых пар галактик во всяком случае не все являются оптическими парами? Для решения таких задач применяется статистический метод. Используем его сначала для доказательства существования физических двойных звезд. Можно считать, что звезд 8-й звездной величины на небе всего 15 000, а звезд более ярких 8000. Предположим, что все эти звезды распределены по небу приблизительно равномерно, но не как солдаты в строю, а в среднем равномер-

но с естественными случайными отклонениями. Определим, сколько при этом можно ожидать образований таких оптических пар, у которых один компонент ярче 8^m , второй имеет 8-ю звездную величину, а угловое расстояние между компонентами не превосходит $1'$. Для этого мысленно окружим каждую из звезд ярче 8^m кружочками с радиусом $1'$. Суммарная площадь всех этих кружочков составит $8000 \cdot \pi \cdot (1')^2 \approx 25\,000$ кв. минут. А поверхность всего неба содержит $1486 \cdot 10^8$ кв. минут. Значит, площадь кружочков в 5920 раз меньше площади всего неба и в них можно ожидать попадания

$$\frac{15\,000}{5920} = 2,53,$$

т. е. двух или трех звезд 8-й звездной величины. Это и будет ожидаемое число оптических пар. На самом деле число двойных звезд, у которых главный компонент ярче 8^m , слабый компонент имеет 8-ю звездную величину, а расстояние между ними меньше $1'$, составляет около трехсот. Как мы подсчитали, следует ожидать, что из этого числа две или три являются оптическими парами. Значит, остальные пары не могут быть результатом случайностей проектирования и являются физическими двойными. Соотношение — 2—3 оптические пары и 300 физических двойных — показывает, что если обнаружена пара звезд с главным компонентом ярче 8^m и слабым компонентом 8-й звездной величины при угловом расстоянии между компонентами меньшим $1'$, то вероятность того, что это оптическая пара, равна $\frac{2,53}{300} \approx 0,008$, а вероятность того, что это физическая двойная, равна $1 - 0,008 = 0,992$. Следовательно, имеются значительные основания полагать, что обнаруженная двойная является физической двойной. Но полной уверенности нет, пока не будут выполнены наблюдения, подтверждающие, что движение компонента происходит по эллиптической орбите.

Мы привели простой расчет, годный для данного типа пары. Можно обосновать более общие критерии для двойных звезд, при выполнении которых двойная с большой степенью вероятности является физической двойной.

В общем каталоге двойных звезд Айткена принят, например, такой критерий отбора: в каталог включаются все двойные, у которых

$$\lg \rho \leq 2,8 - 0,2 m,$$

где ρ — расстояние между компонентами в секундах, m — видимая звездная величина главного компонента. Можно сосчитать, что если пара удовлетворяет этому условию, то вероятность, что она оптическая, очень мала.

Описанный статистический метод отбора двойных звезд еще более важен для отбора двойных галактик, потому что для большей части двойных галактик нет возможности каким-нибудь способом точно установить, что это физическая двойная. Приходится опираться на некоторый критерий, выполнение которого делает физичность двойной галактики весьма вероятной. Каталог двойных галактик был составлен шведским астрономом Хольмбергом. Хольмберг выделил все пары галактик, у которых взаимное расстояние компонентов не более чем в два раза превосходит сумму их диаметров.

При таком отборе в каталоге оказалось 695 двойных галактик. Можно быть уверенными, что подавляющее большинство из них физически двойные галактики. Но о каждой паре отдельно можно сказать: весьма вероятно, что это физически двойная галактика. Впрочем, в некоторых случаях наша уверенность в том, что пара физическая, становится почти полной. Это те случаи, когда можно обнаружить взаимодействие компонентов двойных галактик. Об этих взаимодействиях говорилось в гл. III. Если между компонентами пары протянулись мосты или если компонент выбросил в сторону другого хвост, если взаимодействие компонентов вызывает у них разрушение фасада (по образной терминологии Б. А. Воронцова-Вельяминова) или если пара погружена в общий туман, то мы становимся почти уверенными в физичности пары.

Читатель спросит, почему мы все еще сохраняем слово «почти». Ответ на этот вопрос сложен, так как мы не дали точного определения, что следует понимать под выражением «физически двойная галактика». И не сделали этого потому, что в современной научной литературе нет общепринятой формулировки. Пару галактик можно назвать физически двойной в трех случаях: 1) если компоненты имеют общее происхождение; 2) если компоненты динамически связаны, т. е. сумма кинетической и потенциальной энергий компонентов отрицательна; 3) если компоненты расположены в пространстве близко друг к другу.

Можно убедиться, что ни одно из определений не влечет за собой других. В самом деле, две галактики могут

иметь общее происхождение. Но если в момент формирования их или в какой-нибудь следующий момент в результате действия каких-то сил, например, сил взрывного характера, галактики приобретут большую скорость одна относительно другой, так что кинетическая энергия компонентов будет больше абсолютной величины потенциальной энергии, то компоненты начиная с этого момента перестанут быть динамически связанными, начнут расходиться, и наступит время, когда они станут весьма далеки друг от друга. С другой стороны, компоненты пары могут быть динамически связанными между собой, могут описывать около общего центра инерции эллиптические орбиты, но это может быть результатом взаимного захвата двух галактик, ранее ничего общего между собой не имевших. Захват — редкий процесс, требующий особого сочетания взаимных положений и скоростей в присутствии третьего тела, в данном случае третьей галактики, которая способствует захвату, но не подвергается захвату сама. И все же захват возможен и потому динамически связанные галактики не обязательно имеют общее происхождение. Наконец, из того, что в данный момент две галактики близки друг к другу, вовсе не следует обязательно, что они имеют общее происхождение или динамически связаны. Пространственная близость может быть результатом случайного сближения ранее ничего не имевших общего галактик, которые ни в какой момент не будут динамически связаны и в дальнейшем разойдутся.

Вот поэтому, если мы примем первое или второе определение физически двойной галактики, то обнаружение взаимодействия двух галактик, определенно указывающее на их пространственную близость друг к другу, только почти убеждает, что наблюдаемая пара является физически двойной.

Автор считает, что физически двойной галактикой нужно называть пару галактик в двух случаях: 1) если две галактики имеют общее происхождение и расстояние между ними существенно меньше среднего расстояния между соседними галактиками в той же области Вселенной или 2) если две галактики динамически связаны.

Компоненты физически двойной галактики находятся практически на одинаковом от нас расстоянии. Поэтому лучевые скорости, вызванные расширением пространства, у них одинаковы. Но так как компоненты совершают ор-

битальные движения около общего центра инерции, лучевые скорости у них все-таки должны быть различны, потому что различны в общем случае проекции орбитальных скоростей компонентов на луч зрения.

Итак, различная лучевая скорость компонентов двойной галактики отражает скорость орбитального движения компонентов. Но скорость орбитального движения связана с массой галактик. Не представляется ли счастливая возможность и в этих двойных системах определить массы компонентов? Только теперь компоненты уже не звезды, а галактики.

Основная трудность состоит в том, что разность лучевых скоростей компонентов равна разности не самих орбитальных скоростей, а их проекций на луч зрения. Проекция лишь в особом случае равна самой величине, но обычно она меньше, при этом она может быть меньше во много раз и даже равняться нулю. Если плоскость орбит компонентов двойной галактики перпендикулярна к лучу зрения, то проекция орбитальных скоростей на луч зрения будет все время равна нулю.

Наиболее интересен случай, когда луч зрения лежит в плоскости орбиты. Предположим, что компоненты двойной галактики принадлежат к одному и тому же типу галактик и потому можно считать их массы одинаковыми. Кроме того, для простоты предположим, что орбиты, по которым движутся компоненты, круговые. Тогда величины орбитальных скоростей и их проекций на луч зрения определяются из рис. 116. Буквой O обозначен центр инерции двойной галактики, буквой S — положение наблюдателя. В момент, когда первый компонент находится в точке 1, второй компонент находится в точке 5, их орбитальные скорости направлены у первого компонента к нам, у второго компонента от нас. Следовательно, половина разности лучевых скоростей компонентов равна орбитальной скорости компонента. В тот же момент, как легко понять из рис. 115, радиус орбиты равен

$$R = r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (41)$$

где α — наблюдаемое угловое расстояние между компонентами, а r — расстояние до двойной галактики. Расстояние можно получить по лучевой скорости двойной галактики, считая ее равной полусумме лучевых скоростей компонентов и используя закон Хабла. Теперь, так

как при движении по круговой орбите справедлива формула (39), мы, решив ее для $\mathfrak{M}$, и употребляя обозначение $\mathfrak{M}$, поскольку массы компонентов считаем одинаковыми, получаем

$$\mathfrak{M} = \frac{v^2 \cdot R}{G}. \quad (42)$$

Это позволит вычислить массу галактики.

Полученный таким путем результат будет верен лишь в том случае, если компоненты двойной находятся точно

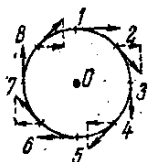


Рис. 115. Лучевая скорость компонентов двойной системы в зависимости от положения на орбите.

в положениях 1 и 5. Если же они находятся, например, в точках 2 и 6, то орбитальная скорость будет в $\sqrt{2}$ больше полуразности лучевых скоростей и радиус орбиты будет в $\sqrt{2}$ раза больше того, которое определяется из формулы (41), так как расстояние между компонентами тоже будет наблюдаться в проекции. Поэтому вычисленная по формуле (42) масса галактики окажется преуменьшенной в $(\sqrt{2})^3 \approx 3$ раза. Чем ближе один из компонентов к точке 3, а другой соответственно к точке 7, тем в большей степени будет преуменьшаться масса галактик.

Если орбиты в двойной галактике не проходят через луч зрения, а наклонены к нему под разными углами, то соотношения будут иными, но всегда, вычисляя массу по формуле (42), мы будем в различной степени в зависимости от положения компонентов на орбите преуменьшать их массу. Если бы наклон орбиты и положение компонентов на ней были известны, то поправочный множитель нетрудно было бы вычислить. Однако, по крайней мере в настоящее время, нет никакой возможности определить наклон орбиты и положение компонентов на орбите в двойной галактике. Поэтому поправочный коэффициент определить нельзя. Но нельзя им и пренебрегать, так как

он может быть очень велик. Значит ли это, что положение безвыходно?

Да, для какой-либо определенной двойной галактики положение пока безвыходное — определить ее массу по орбитальному движению компонентов невозможно. Но возможен другой подход, к которому в звездной астрономии прибегают, когда нельзя решить задачу для каждого индивидуального объекта. Это метод статистический.

Представьте себе, что вы имеете большое число двойных галактик с измеренными лучевыми скоростями обоих компонентов. Для каждой двойной мы не знаем наклона орбиты и положения на ней компонентов. Но естественно полагать, что наклоны орбит у разных двойных различны и различны положения компонентов на орбите. Более того, можно приблизительно считать, что компоненты равномерно распределены по орбитам, а сами орбиты равномерно распределены по всем возможным ориентациям в пространстве. Тогда можно теоретически вычислить средний поправочный коэффициент к формуле (42). Он оказался равным 3,39. Значит, при применении статистического метода нужно использовать формулу

$$\bar{M} = 3,39 \cdot \frac{\bar{v}^2 \bar{R}}{G}. \quad (43)$$

В этой формуле $\bar{v}^2$ — средняя величина квадрата разности скоростей между компонентами у рассмотренных двойных галактик, $\bar{R}$ — среднее наблюдаемое расстояние между компонентами, а искомой величиной $\bar{M}$ является средняя масса компонентов в рассмотренных парах галактик.

Статистический метод применил американский астроном Пейдж. Ему удалось получить лучевые скорости компонентов 65 двойных галактик. Средняя масса галактики получилась равной $2,5 \cdot 10^{11}$ масс Солнца. Для выделенных из общего числа 45 E- и S0-галактик средняя масса оказалась равной $4 \cdot 10^{11}$ масс Солнца, а для 20 S- и I-галактик $0,3 \cdot 10^{11}$ масс Солнца.

Теперь мы можем сравнить массы, вычисленные в двойных галактиках, с массами галактик в табл. 15, определенными по их вращению. Сравнение масс спиральных и неправильных галактик показывает достаточно хорошее согласие. Это убеждает, что примененные методы обоснованы. В частности, правильно предположение, что

рассмотренные Пейджем пары, составленные спиральными и неправильными галактиками, являются физически двойными галактиками.

С другой стороны, привлекает внимание вывод, что эллиптические и S0-галактики в среднем более чем в 10 раз массивнее спиральных и неправильных. Если это верно, то эллиптические галактики не могут быть эволюционно связаны со спиральными и неправильными, так как в ходе эволюции масса галактики не может увеличиться или уменьшиться в 10 раз. Она остается в ходе эволюции практически неизменной.

Тройные звезды и тройные галактики

Если движутся одна относительно другой две звезды и известны в какой-то момент времени их положения и скорости, то теория позволяет предсказать положение и скорость каждой из звезд в любой момент времени и как угодно точно. Задача двух тел имеет общее решение. Известно, что в двойных системах орбитами компонентов могут быть только эллипсы, параболы и гиперболы.

Но как только от двух тел мы переходим к трем телам, задача в огромной степени усложняется. Существует, правда, общее решение задачи, полученное в 1912 г. финским математиком Зундманом, дающее зависимость положений трех точечных тел от времени в виде бесконечных рядов. Но это один из тех редких случаев, когда ценный теоретический результат оказывается неприменимым на практике, так как использование его требует чрезмерно больших усилий. Как показал французский математик Белорицкий, для получения положений в задаче трех тел с той точностью, с какой в настоящее время обычно определяют положения планет, в рядах Зундмана необходимо брать сумму не менее $10^{8000000}$ членов — число, находящееся не только за пределами практики, но и недоступное нашему воображению. Для сравнения укажем, что полное число атомов во всей той области Вселенной, которая достижима современной астрономии (до расстояния 3000 Мпс), оценивается в $10^{75} - 10^{76}$.

Другой, на первый взгляд малопривлекательный путь исследования, называемый численным методом, состоит в том, что выбирают какие-то начальные положения и скорости трех тел и затем, шаг за шагом, вычисляют положения и скорости этих тел через равные малые проме-

жутки времени Δt . При этом учитывают, что положения тел через время Δt изменятся в соответствии с их скоростями, а значения скоростей тел через время Δt изменятся в соответствии с их ускорениями, вызываемыми взаимным тяготением. Ускорения легко вычислить, если известно взаимное положение тел.

Численный метод исследования задачи трех тел не мог быть до сих пор успешно использован главным образом вследствие его большой трудоемкости. Вычисление шаг за шагом траекторий и скоростей точечных тел требует при ручном счете огромной работы. Существенно то, что этот метод приближенный, так как при его применении принимается, что в течение малого промежутка времени точечные тела движутся по прямым, а ускорения и скорости постоянны и изменяются скачком лишь в самом конце промежутка времени Δt . Для повышения точности необходимо уменьшать в вычислениях промежутки времени Δt . Но уменьшение Δt , очевидно, сильно увеличивает объем работы.

Кроме того, если рассмотреть один какой-то пример начальных условий и получить путем численного метода картину движений в этом примере, то это еще очень малая информация о динамике трех тел: ведь примеров начальных условий бесчисленное множество и у каждого свои особенности. Только рассмотрев большое число примеров и позаботившись о том, чтобы эта совокупность примеров была представительной, т. е. чтобы она достаточно правильно выражала основные свойства бесконечного множества возможных примеров начальных условий, можно вынести общие суждения о динамике точечных масс в задаче трех тел.

До изобретения электронно-вычислительных машин выполнение работы такого объема было совершенно невы мыслимым делом. Теперь же использование быстродействующих ЭВМ делает применение численных методов для решения проблем космогонии, связанных с задачей трех тел, вполне возможным и эффективным. При этом особое внимание нужно уделять разработке способа получения представительной совокупности примеров начальных условий. Метод разработки такой совокупности примеров и ее использования в численных исследованиях называется в математике методом Монте-Карло.

Тройные системы весьма распространены среди звезд Галактики. В последнем каталоге IDS двойных и кратных

звезд (близких к Солнцу) их число равно 4160. Одной из тройных звезд, например, является ближайшая к нам звезда α Центавра.

Среди конфигураций тройных систем целесообразно различать два типа. В первом случае взаимное расположение звезд такое, как на рис. 116: две звезды близки друг к другу, а третья отдалена. Во втором случае (рис. 117) все три расстояния между звездами сравнимы между собой.

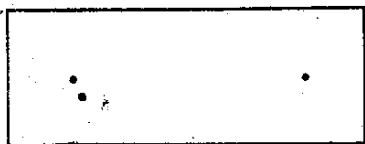


Рис. 116. Конфигурация типа I тройной системы. Система, имеющая такую конфигурацию, может быть устойчивой.

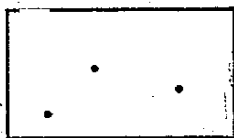


Рис. 117. Конфигурация типа II тройной системы. Система, имеющая такую конфигурацию, неустойчива.

При конфигурации типа I возможна следующая динамика системы: в тесной паре звезды движутся одна вокруг другой, как в двойной звезде, а третья звезда в свою очередь движется вокруг тесной пары, как если бы эта пара была одной звездой. Все движения звезд тогда будут почти эллиптическими. Небольшое отличие от эллипса у орбиты тесной пары будет вызываться влиянием отдаленной звезды, а у орбиты отдаленной звезды тем, что она обращается около пары звезд, а не около одиночной звезды. При таком характере движений тройная система устойчива, она сохраняется сколь угодно долго, распадается никогда не будет, если не произойдет вмешательства посторонних сил.

При конфигурации типа II (см. рис. 117) орбиты, близкие к эллиптическим, в тройной системе невозможны (за исключением некоторых особых и очень редких случаев). Движения должны быть лишены свойств периодичности, траектории очень сложны.

Можно предвидеть, что подобного рода сложные движения должны завершаться распадом тройной системы. Время от времени звезды в ней тесно сближаются и сильно взаимодействуют между собой. При сильном взаимодействии происходит значительный обмен энергиями,

в результате чего скорость одной из звезд может резко возрасти и превысить критическую скорость. Эта звезда покинет систему, а две оставшиеся образуют двойную звезду, которая сама по себе, без вмешательства извне, уже не распадется.

Предвидя распад тройных систем, имеющих конфигурацию типа II, В. А. Амбарцумян отмечал, что если среднее время распада не велико, то из этого следует вывод о сравнительной молодости таких наблюдаемых тройных систем, раз они еще не успели распасться. Более того, если тройные звезды с конфигурациями типа II наблюдаются в каких-нибудь более обширных системах, например, в звездных ассоциациях или рассеянных скоплениях, то имеются основания считать, что молоды и эти более обширные образования.

Но действительно ли неизбежен распад тройных систем с конфигурацией типа II? Доказательств этому не существовало. И если распад неизбежен, то как скоро он происходит?

Для решения поставленных вопросов Ж. П. Аносова применила метод Монте-Карло.

Было получено 200 случайных начальных условий невращающейся тройной системы и были приняты меры, чтобы эта совокупность начальных условий являлась представительной выборкой всего бесконечного множества начальных условий для невращающихся тройных систем. Для каждого из 200 начальных условий при помощи ЭВМ численно решались уравнения движения. Определялись траектории звезд, а также положения и скорости звезд в каждый момент времени.

Во всех двухстах сосчитанных случаях движения звезд завершились распадом системы. Каждый раз распад происходил после тесного тройного сближения. Тесные сближения двух звезд при отдаленности третьей, происходящие чаще, чем тесные тройные сближения, ни разу не привели к распаду системы.

На рис. 118, а, б, в, г последовательно показано, как в одном из вычисленных случаев протекали движения звезд от начального момента до распада тройной системы. Траектория звезды А проведена сплошной линией, В — прерывистой линией с длинными штрихами и С — прерывистой линией с короткими штрихами. Начало координат помещено в центр инерции системы. В начальный момент (рис. 118, а) звезды были неподвижны и

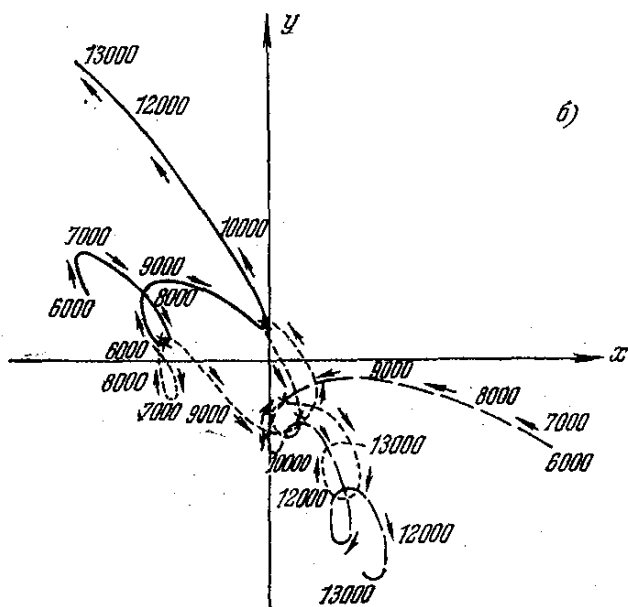
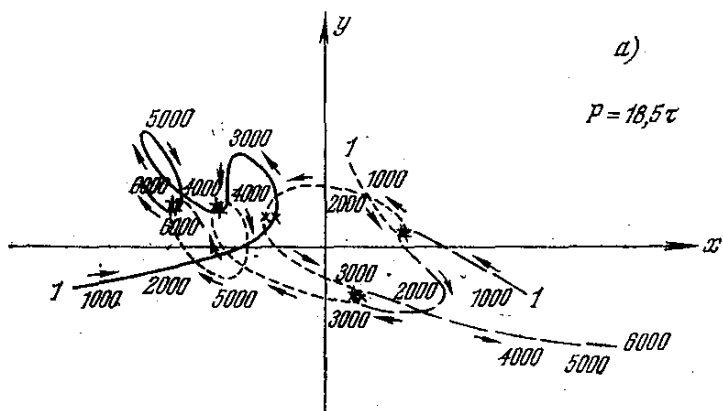
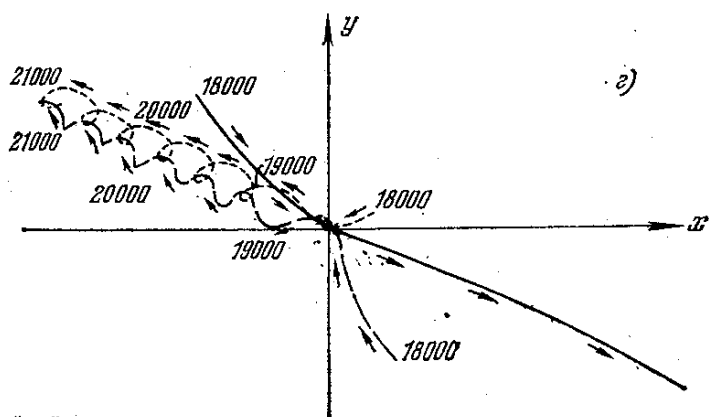
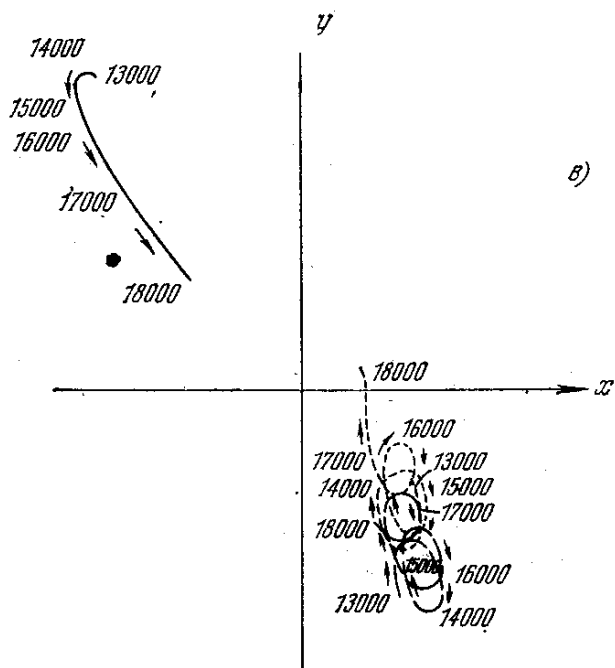


Рис. 118. Распад



тройной системы.

находились в точках, помеченных цифрами 1. Под действием взаимного притяжения они начали двигаться. Так как звезды *B* и *C* были ближе друг к другу и, следовательно, их взаимное притяжение было сильнее, чем взаимодействие со звездой *A*, то эти две звезды стали двигаться почти точно одна навстречу другой и в первое время скорость их возрастала быстрее, чем у звезды *A*, которая тоже начала двигаться в направлении звезд *B* и *C*. Числами 1000 обозначены положения звезд через 1000 единиц времени Δt , употребленного в вычислениях. После этого движения звезд навстречу друг другу продолжали ускоряться, и раньше, чем прошло время $2000 \Delta t$, состоялось тесное сближение звезд *B* и *C*. Если бы не влияние звезды *A*, то произошло бы столкновение звезд *B* и *C*. Но тут они, набрав скорость, прошли в тесной близости, обогнули друг друга и разошлись. После этого, как показывает рисунок 118, *a*, звезда *B* сблизилась со звездой *A*, а затем около момента $3000 \Delta t$ снова со звездой *C*. В результате этого последнего сближения звезда *C*, набрав скорость, стала отдаляться от двух других, образовавших временно двойную систему. Однако скорость удаления звезды *C* была недостаточно велика, чтобы покинуть систему, под влиянием притяжения двух других звезд она после момента $6000 \Delta t$ повернула обратно и стала снова приближаться к ним (рис. 118, *b*). Состоялось еще несколько двойных сближений и после того сближения, которое около момента $9500 \Delta t$ произошло между звездами *A* и *C*, теперь уже звезда *A* стала удаляться от двух других звезд. Но и в этом случае распад не произошел. Звезда *A* через некоторое время повернула и стала возвращаться обратно (рис. 118, *c*). Навстречу к ней с двух сторон двинулись звезды *B* и *C*. И вот тогда (рис. 118, *г*) произошло тесное тройное сближение (оно, разумеется, произошло около начала координат, центра инерции). Мы видим, что в результате сильного тройного взаимодействия звезда *A* на большой скорости устремилась прочь от центра инерции и так же в противоположную сторону устремились, образовав двойную, звезды *B* и *C*. Произошел распад тройной системы.

Резонно моментом распада считать то мгновение, когда в ходе тройного сближения, вызвавшего распад, звезды окажутся ближе всего друг к другу и периметр треугольника, образованного звездами, окажется минимальным. В этот момент звезды сильно взаимодействовали

между собой, произошло перераспределение энергий, вызвавшее распад.

Для измерения срока, проходящего от начала движения до момента распада, важно правильно выбрать характерную физическую единицу времени. Такой единицей является среднее время τ пересечения звездной системы, т. е. время, необходимое, чтобы звезда, если бы она двигалась со средней скоростью, пересекла средний размер системы.

Единица времени τ определяется равенством

$$\tau = \frac{a^{3/2}}{\sqrt{GM}},$$

где G — постоянная тяготения, M — масса звезды, a — средний размер системы, равный приблизительно среднему расстоянию между компонентами тройной звезды.

Выбранная единица времени τ обладает тем важным свойством, что срок от начала движения до распада, выраженный в этих единицах, не зависит от размеров системы и масс тел. Поэтому результаты одинаково приложимы и к тройным звездам любых масс, и к тройным галактикам, и к системам, состоящим, например, из трех пылинок.

Для каждого из двухсот случайных начальных условий было найдено время распада, выраженное в единицах времени τ .

Разумеется, они получились различными для разных начальных условий. Средняя величина времени распада оказалась равной

$$\bar{T} = 95,4\tau.$$

Оценим среднее время распада реальных тройных систем.

Если, например, тройная система с конфигурацией типа II (см. рис. 117) состоит из звезд, подобных Солнцу ($M = 2 \cdot 10^{33}$ г), и эта система сравнительно широкая, $a = 5000$ астрономических единиц $= 7,5 \cdot 10^{16}$ см, то согласно (40), учитывая, что $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$, получаем

$$\tau = 1,88 \cdot 10^{12} \text{ с} = 5,6 \cdot 10^4 \text{ лет}$$

и, следовательно, среднее время распада

$$\bar{T} = 95,4\tau = 5,4 \cdot 10^6 \text{ лет.}$$

Примерно таков же или немного больше средний период распада у тройных звезд с конфигурацией типа II, встречающихся в звездных ассоциациях. Компоненты здесь — звезды горячие гиганты — имеют массы примерно в 10 раз больше массы Солнца, но зато и средние расстояния между звездами больше, составляя несколько десятков тысяч астрономических единиц.

Мы видим, что даже широкие тройные системы с конфигурациями типа II сравнительно недолговечны и должны в среднем распадаться за время около 10 млн. лет. Поэтому предположение о молодости наблюдаемых тройных систем этого типа было правильным.

Если бы тройные системы звезд с конфигурациями типа II были тесными, если бы их средний размер был порядка расстояний между компонентами спектроскопических или фотометрических двойных, т. е. a не превосходило бы астрономической единицы, то τ было бы меньше полугода, а среднее время распада — меньше 50 лет. Теперь понятно, почему не существует ни одной спектроскопической или фотометрической тройной. Они крайне недолговечны.

Иное дело тройные галактики. Если массы галактик равны 10^{11} г, а средний размер тройной системы галактик $= 100$ кпс $\approx 3 \cdot 10^{23}$ см, то $\tau = 2 \cdot 10^9$ лет, а $\bar{T} = 2 \cdot 10^{11}$ лет. Мы видим, что космогонические сроки недостаточны для распада тройных систем галактик. Это утверждение верно, если скорости всех трех галактик в начальный момент меньше критической скорости. Если же галактики в тройной системе образовались в результате взрывного процесса, сообщившего им с самого начала большие скорости, то тройная система распадется быстро. Но это уже иная механическая и космогоническая задача.

Первоначально методом Монте-Карло было исследованы тройные системы со звездами одинаковых масс. Затем тот же метод был применен к системам со звездами различных масс. Были рассмотрены три случая отношения масс: $9:3:1$, $3:3:1$ и $3:1:1$. Для каждого из них численное решение уравнений движения было выполнено при 100 случайных начальных конфигурациях.

Во всех 300 решенных примерах движения в системах завершились распадом. Как оказалось, распад тройных систем с существенно неравными массами звезд происходит примерно в три раза быстрее, чем в случае равных звездных масс. При отношении масс звезд $9:3:1$ среднее

время распада $\bar{T}$ получилось равным 26,8 τ , при отношении масс 3:3:1 $\bar{T}=27,4\tau$ и при отношении масс 3:1:1 $\bar{T}=29,2\tau$. Этот вывод можно было предвидеть. В самом деле, звезды малых масс при взаимодействии со звездами больших масс особенно сильно изменяют скорость и для них достижение критической скорости при таком взаимодействии более вероятно. В ста сосчитанных случаях распада систем с отношением масс звезд 9:3:1 в 90 случаях из системы ушла звезда с массой 1, в 10 случаях звезда с массой 3 и ни разу не зарегистрирован уход звезды с массой 9. В системах 3:3:1 уход звезды с массой 1 случился 94 раза, а звезды с массами 3 — только шесть раз. В системах 3:1:1 легкие звезды удалялись соответственно 52 и 48 раз, а массивная звезда не удалась ни разу.

В природе системы с телами одинаковых масс составляют исключение. Как правило, массы звезд и галактик в тройных системах существенно различны. Поэтому приведенные выше оценки времени распада тройных звезд и тройных галактик нужно примерно в три раза уменьшить.

С другой стороны, как выяснилось, наличие вращения в тройной системе значительно увеличивает среднее время распада. Для 100 случайных начальных конфигураций при равных массах звезд и наличии некоторого вращательного движения время распада оказалось равным $\bar{T}=170\tau$, т. е. более чем в 1,8 раза превосходящим среднее время распада невращающихся систем.

Вращение системы препятствует распаду потому, что оно препятствует сближению тел системы. В особенности редко должны случаться тесные тройные сближения, которые, как правило, и вызывают распад.

Вращение вообще делает устойчивыми системы и тел. Наша Солнечная система не распадается именно из-за вращения. Энергия вращения Солнечной системы почти равна величине ее полной механической энергии.

В. А. Амбарцумян обратил внимание на значение типа конфигурации тройных и кратных систем. Исследовав каталог двойных и кратных звезд Айткена, он установил, что из имеющихся в каталоге 1076 тройных звезд 897 имеют конфигурацию типа I и 179 конфигурацию типа II. Таким образом, среди тройных звезд конфигурации типа II составляют 16,5%. При этом оказалось, что среди тройных звезд, у которых хотя бы один из компонентов

является горячим гигантом спектрального класса О или В, 39% имеют конфигурацию II, свидетельствующую о неустойчивости. В то же время среди тройных звезд, не имеющих в своем составе горячих гигантов, лишь 12% имеют конфигурацию типа II. Эти соотношения весьма знаменательны. Они указывают на то, что присутствие горячих гигантов классов О и В является в какой-то мере признаком неустойчивости, а неустойчивость есть всегда признак молодости того состояния, которое наблюдается. Раз тройная система, имеющая конфигурацию типа II, должна скоро распасться, то она и в прошлом не могла долго существовать, иначе она бы уже распалась. Если, наконец, мы предположим, и это разумно, что тройная система образовалась тогда, когда сформировались в ней сами звезды, то должны рассматривать наличие большого числа конфигураций типа II среди тройных звезд, содержащих горячие гиганты, как аргумент в пользу молодости самих звезд горячих гигантов. Согласно нашей оценке их возраст должен быть порядка 5 млн. лет.

В цепи приведенных рассуждений имеется незамеченная нами пока особенность, которая может повлиять на сделанные выводы. На рис. 116 и 117 предполагается, что плоскость, проходящая через три звезды, и плоскость рисунка совпадают. Между тем мы рассматриваем тройные системы всегда в проекции. Тогда, как нетрудно представить, конфигурация типа I может быть так спроектирована на картинную плоскость, что будет выглядеть как конфигурация типа II, и наоборот, конфигурация типа II может спроектироваться в конфигурацию типа I. Значит, нужно различать видимые и истинные конфигурации. Если большое число треугольных линеек различной формы развесить на нитках, то вследствие проекции форма каждого треугольника представится иной, мы будем наблюдать распределение видимых форм треугольников, а не распределение их истинных форм. Так как нас всегда интересует не то, что кажется, а то, что есть, нужно как-то суметь перейти от распределения видимых конфигураций тройных звезд к распределению их истинных конфигураций. Это такая же по смыслу задача, как и рассмотренная в гл. III задача нахождения распределения истинных сжатий эллиптических галактик по наблюдаемому распределению видимых сжатий. Как и в той задаче, для решения нужно сделать естественное предпо-

ложение, что плоскости треугольников в пространстве не имеют преимущественного направления, т. е. все возможные ориентации плоскостей равновероятны. На основе этого разработан математический метод, позволяющий перейти от видимого распределения к истинному. Он показал, что среди тройных звезд содержащих горячие гиганты, при переходе от видимых конфигураций к истинным доля конфигураций типа II сохраняется практически неизменной. У тройных звезд без горячих гигантов доля конфигураций II типа при переходе к истинным конфигурациям заметно уменьшается.

Значит, основанный на соображениях звездной динамики аргумент в пользу молодости звезд — горячих гигантов полностью сохранился.

Имеются и астрофизические доводы в пользу молодости звезд-гигантов спектральных классов О и В. Эти звезды очень мощно излучают в пространство. Расход энергии через излучение у них происходит в тысячи и даже десятки тысяч раз быстрее, чем у Солнца. Можно подсчитать, что за счет ядерных реакций, поддерживающих излучение звезд, такой интенсивный расход энергии может продолжаться только миллионы, но никак не миллиарды лет. Значит, опять-таки пребывание в состоянии горячего гиганта не может быть долгим. Это снова аргумент в пользу молодости.

Чрезвычайно ценно, чтобы выводы относительно эволюции звезд делались не на основании какого-нибудь одного способа исследования, а были результатом подтверждающих друг друга заключений, сделанных различными способами. Как криминалист сопоставляет различные вещественные доказательства и свидетельские показания, затем строит правдоподобную версию происшествия, но после этого вновь и вновь ищет неиспользованные аргументы, подтверждающие созданную версию, так и астроном, придя к каким-нибудь космогоническим выводам, должен находить новые аргументы, особенно ценя те, которые основаны на иных, не использованных ранее наблюдательных данных и методе. В этом отношении очень важную роль играет сопоставление результатов, полученных методами астрофизики и звездной динамики, поскольку и методы, и наблюдательные данные здесь совершенно различны.

Исследования, выполненные Ж. П. Аносовой и автором, показывают, что, по-видимому, можно пойти еще

далее в интерпретации распределений конфигураций тройных звезд. Обратим внимание читателя на то, что когда объяснялась конфигурация типа I, то указывалось, что такая конфигурация может быть устойчивой, в то время как конфигурация II должна привести к распаду. Но конфигурация I может быть и неустойчивой. Она устойчива в том случае, если тесные компоненты движутся по не очень вытянутому эллипсу друг около друга, а отдаленный компонент движется по не очень вытянутому эллипсу около тесной пары. Для устойчивости важно, чтобы отдаленный компонент не сблизился ни с одним из других компонентов, иначе конфигурация типа I превратится в конфигурацию типа II и устойчивости не будет.

Легко понять, что неустойчивые тройные системы могут временно принять конфигурацию типа I. В результате взаимодействий звезд в конфигурации типа II время от времени одна из звезд приобретает скорость относительно центра инерции большую, чем две другие. Если набранная скорость меньше критической, то этот компонент, преодолевая притяжение двух других компонентов, удалится на некоторое расстояние. Кинетическая энергия окажется израсходованной, звезда остановится, а затем притяжение двух других компонентов заставит ее двигаться обратно к ним. Таким образом, неустойчивые системы должны попеременно принимать то конфигурацию типа I, то конфигурацию типа II. Расчет показывает, что если иметь большое число неустойчивых тройных систем, то в каждый момент приблизительно 86% из них будут принимать конфигурацию типа I, а 14% — конфигурацию типа II. Как раз примерно такое соотношение типов конфигураций наблюдается у тройных звезд, не содержащих горячих гигантов. Поэтому можно сказать, что наблюдения согласуются с предположением, что все тройные системы, не содержащие горячих гигантов, — неустойчивые системы.

Значит, повторяя сделанные ранее заключения, мы должны прийти к выводу, что даже в тройных системах без горячих гигантов все звезды — молодые, с возрастом, оцениваемым лишь миллионами лет.

Что же такое тогда тройные системы, содержащие горячие гиганты? Ведь в них процент конфигураций типа II даже выше значения, которое устанавливается в неустойчивых тройных системах после того, как компоненты

системы успеют, сходясь и расходясь, в достаточной степени провзаимодействовать друг с другом.

Ответ должен быть простым. Эти системы настолько молоды, что в них компоненты не успели в достаточной степени провзаимодействовать друг с другом, вследствие чего еще не успело образоваться достаточного числа конфигураций типа I. Иначе говоря, конфигурации тройных звезд, содержащих горячие гиганты, еще мало ушли от тех конфигураций, которые системы получили в момент своего формирования. Поэтому если возрасты тройных систем, не содержащих горячие гиганты, мы оценили миллионами лет, то возрасты тройных систем, содержащих горячие гиганты, еще меньше, и должны оцениваться лишь сотнями тысяч лет.

Как и звезды, галактики наряду с двойными образуют и иные кратные системы. Все рассуждения об устойчивости тройных систем, проведенные для звезд, приблизительно верны и для галактик. Не точно, а приблизительно, потому что в тройных системах галактик расстояния между центрами галактик не намного больше их диаметров и мы не можем большие галактики считать точечными массами. Взаимодействия петочечных масс сложнее — появляются приливные силы, влияющие на общее движение галактик. Но все-таки приведенные выше рассуждения приблизительно верны и для тройных галактик. Поэтому обратимся к их статистике.

В каталоге Хольмберга тройных галактик 97. Из них 21 имеют конфигурацию типа I и 76 конфигурацию типа II. На эти соотношения должно было повлиять то, что при отборе Хольмберг применял критерий, состоящий в том, что физически тройной галактикой считалась такая система, у которой расстояние между центрами компонентов не больше чем вдвое превосходит сумму диаметров компонентов.

В. А. Амбарцумян исследовал влияние принятого Хольмбергом критерия и пришел к выводу, что на самом деле среди тройных галактик конфигурации типа II составляют около 50%. Значит, на основании всего сказанного для тройных звезд, мы должны прийти к выводу, что все системы тройных галактик неустойчивы и притом в этих неустойчивых системах компоненты еще не успели, сходясь и расходясь, провзаимодействовать между собой. Однако для тройных галактик это не приводит к таким молодым возрастам, как для звезд. В тройных га-

лактиках расстояния между компонентами огромны, порядка 50—100 кпс, а скорости компонентов, если они меньше критических, должны быть порядка 100 км/с, поэтому время, необходимое компоненту для того, чтобы пройти расстояние, отделяющее его от другого компонента, должно составлять несколько сотен миллионов лет. Следовательно, нужно полагать, что возраст галактик, входящих в состав тройных систем, не превышает нескольких сотен миллионов лет.

Тесные группы галактик

Новый и неожиданный поворот в вопросе динамической устойчивости системы галактик произошел в последние годы, когда стали изучать так называемые тесные группы галактик. Это название было дано кратным галактикам, содержащим от трех до 6—7 членов и примечательных тем, что компоненты группы располагаются друг к другу очень близко, почти касаясь. Диаметр всей группы бывает обычно 30—50 кпс. При таком тесном расположении приблизительно одинаковых по величине галактик очень маловероятно, чтобы какой-нибудь член группы был оптическим, т. е. не входил в состав группы, а проектировался на нее, располагаясь ближе группы или дальше нее.

Первым обратившим внимание на значение тесных групп галактик для выяснения вопроса динамической устойчивости систем галактик был В. А. Амбарцумян, пришедший в 1958 г. к выводу, что здесь имеются серьезные свидетельства о неустойчивости. Подробно исследовали тесные группы американские астрономы супруги Е. М. и Г. Р. Бербиджи. В их списке 1961 г. содержится девять тесных групп галактик.

Об устойчивости можно судить, сравнивая лучевые скорости членов группы. Вот, например, данные о так называемом квинтете Стефана. Эта красивая группа, изображенная на рис. 119, состоит из двух эллиптических и трех спиральных галактик. До 1961 г. были измерены лучевые скорости четырех галактик из пяти. Вот они:

NGC 7317 + 7015 км/с

NGC 7318a + 6916 »

NGC 7318b + 5916 »

NGC 7319 + 6935 »

Средняя лучевая скорость составляет $+6695$ км/с. Если считать, что массы всех членов равны, то эта скорость равна скорости центра инерции четверки галактик и по закону Хаббла (приняв постоянную Хаббла равной

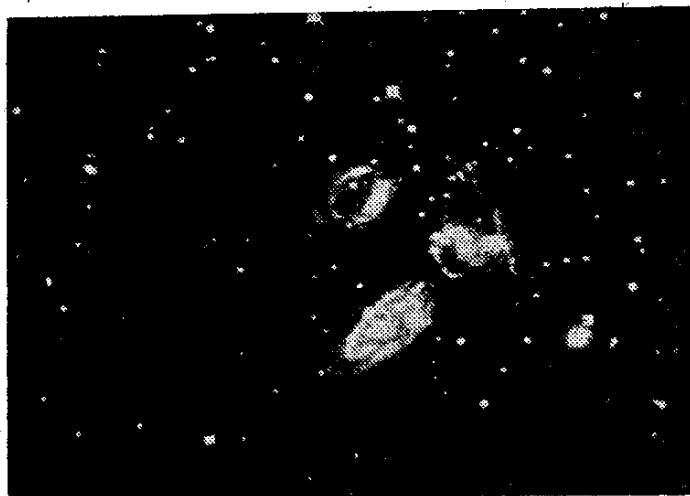


Рис. 119. Тесная группа галактик — квинтет Стефана.

$75 \text{ км/с} \cdot \text{Мпс}$) можно оценить расстояние до группы:

$$\frac{6695}{75} = 89 \text{ Мпс.}$$

Мы определим также лучевую скорость каждой галактики по отношению к их центру инерции:

$$\text{NGC 7317} + 319 \text{ км/с,}$$

$$\text{NGC 7318a} + 221 \quad \gg$$

$$\text{NGC 7318b} - 779 \quad \gg$$

$$\text{NGC 7319} + 240 \quad \gg$$

Знак «плюс» означает, что галактика удаляется быстрее, а знак «минус» — медленнее, чем центр инерции.

Для исследования устойчивости нужно вычислить кинетическую и потенциальную энергию группы и сравнить их. Как и в случае двух тел, если сумма кинетической и половины потенциальной энергий группы окажется равной нулю, то это будет показывать, что группа устойчи-

ва, и, более того, сохраняет в среднем неизменный размер. Если эта сумма больше нуля, то группа имеет склонность к расширению. Если сумма кинетической энергии и всей потенциальной энергии равна нулю или положительна, то расширение системы не будет временным, а завершится распадом.

Кинетическая энергия группы равна сумме кинетических энергий всех ее членов, вычисляемых при помощи выражения (34), в котором, как и в случае задачи двух тел, v_1 означает скорость относительно центра инерции, а M_1 — массу галактики. Мы уже предположили массы галактик одинаковыми. Будем на основании табл. 15 считать их равными $3 \cdot 10^{44}$ г. Тогда кинетическая энергия группы составит

$$1,2 \cdot 10^{33} \text{ Дж.} \quad (44)$$

На самом деле кинетическая энергия больше, так как мы приняли во внимание только один компонент скорости — лучевую скорость. Два других компонента скорости, лежащие в картинной плоскости, теоретически равноправны с лучевой, так что вся ожидаемая кинетическая энергия в три раза больше и равна

$$3,6 \cdot 10^{33} \text{ Дж.} \quad (45)$$

Потенциальная энергия группы равна сумме потенциальных энергий всех пар, которые можно составить из галактик членов группы. Потенциальная энергия каждой пары равна выражению (31), в котором R — расстояние между галактиками пары и должно вычисляться по формуле (37). В этой формуле r — расстояние от нас до группы, равное, как мы отмечали, 89 Мпс, а α — угловые расстояния между галактиками. Последние легко измеряются по фотографиям (например, на рис. 119).

Из четырех галактик можно составить шесть различных пар. Вычислив для каждой пары потенциальную энергию и просуммировав, мы найдем, что потенциальная энергия системы равна

$$- 2,8 \cdot 10^{52} \text{ Дж.} \quad (46)$$

Но опять-таки и здесь, как это было с кинетической энергией, нужно внести поправку. Это связано с тем, что вычисленная по формуле (41) величина не есть расстояние между двумя галактиками. Она равна проекции этого расстояния на картинную плоскость. Самого же рассто-

нения мы не знаем. Поэтому и здесь мы должны говорить об ожидаемом расстоянии.

Длина проекции отрезка на неподвижную плоскость в зависимости от направления отрезка может быть различна и принимать значения от нуля до длины самого отрезка. Если считать все ориентации отрезка равновероятными, то можно подсчитать, что средняя величина длины проекции равна $2/\pi$ длины самого отрезка. Поэтому ожидаемое расстояние между двумя галактиками равно вычисленной по формуле (41) величине, деленной на $2/\pi$. Так как в выражении для потенциальной энергии расстояние стоит в знаменателе, то ожидаемая потенциальная энергия каждой пары получится из вычисленной, после умножения на $2/\pi$ и, равным образом, ожидаемая потенциальная энергия всей группы равна выражению (46), умноженному на $2/\pi$. Итак, ожидаемая потенциальная энергия равна

$$- 1,8 \cdot 10^{52} \text{ Дж.} \quad (47)$$

Сравнивая (45) и (47), мы видим, что сумма кинетической и потенциальной энергий положительна и притом значительна по величине, так что группа галактик должна быстро распасться. Даже если учесть, что мы сравнивали ожидаемые кинетическую и потенциальную энергии, а не действительные, которые нам неизвестны, и предположить, что имеет место самый крайний, почти невероятный случай, когда компоненты скоростей галактик в картинной плоскости равны нулю и все проекции отрезков, соединяющих две галактики, на луч зрения равны нулю, то и тогда кинетическая энергия, равная (44), после сложения с потенциальной энергией, равной (46), даст величину, большую нуля.

Это означает, что распад группы представляется неизбежным. Но это не значит, что должны обязательно разойтись все члены группы. В данном, например, случае у одной из галактик, именно у NGC 7318 b, лучевая скорость сильно отличается от лучевой скорости трех остальных. Эта галактика как бы вылетает из группы со скоростью более 1000 км/с по отношению к трем другим галактикам. После ее ухода оставшаяся тройная система будет, по-видимому, устойчивой. В ней лучевые скорости по отношению к своему центру инерции равны всего +59, -39 и -20 км/с. Эти величины в десять и более раз меньше тех, которые мы имели, когда рассматривали

четыре члена группы. Так как кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости, то величина всей ожидаемой кинетической энергии группы получится более чем в сто раз меньшей, а именно, равной

$$2,4 \cdot 10^{51} \text{ Дж}, \quad (48)$$

тогда как потенциальная энергия хотя и изменится вследствие уменьшения числа пар (вместо шести три пары), но далеко не во столько раз: ее ожидаемая величина будет равна

$$- 7 \cdot 10^{51} \text{ Дж}. \quad (49)$$

Теперь сумма кинетической и потенциальной энергий оказывается отрицательной и, значит, система устойчива.

Итак, если бы группа состояла только из трех галактик, NGC 7317, NGC 7318a и NGC 7319, то ее можно было бы считать устойчивой. Принадлежность к этой группе галактик NGC 7318b заставляет изменить мнение и считать группу неустойчивой. При этом мы делаем вывод, что NGC 7318b вылетает из этой группы со скоростью около 1000 км/с. Такой вывод имеет большие последствия для наших представлений о происхождении галактик и групп галактик, потому что действиями обычных сил тяготения никак нельзя объяснить появление столь большой скорости у NGC 7318b по отношению к другим трем галактикам группы. В результате взаимодействий сил тяготения одна из галактик может получить скорость, равную критической или немного большую, и уйти из группы. Но критическая скорость для NGC 7318b, как это нетрудно подсчитать, приблизительно равна 250 км/с. Совершенно невозможно, чтобы в результате взаимодействий с другими галактиками группы одна из галактик группы получила скорость, в четыре раза большую критической. Следовательно, должны действовать какие-то иные силы, отличные от сил тяготения, и притом настолько мощные, чтобы придать галактике, состоящей из десятков миллиардов звезд, скорость около 1000 км/с. Невозможно себе представить, чтобы такие силы могли действовать между галактиками в то время, когда галактики уже отделены друг от друга значительными расстояниями. Поэтому В. А. Амбарцумян делает вывод, что все вещество группы галактик имеет общее происхождение, группа формировалась как нечто целое в результате очень бурного процесса, связанного с внутриядерными силами;

этот процесс завершился разбиением материи на отдельные галактики, а внутри галактик — на отдельные звезды, и галактикам при этом были сообщены значительные скорости. В этой гипотезе процесс формирования галактик и процесс формирования звезд рисуется как бурный скоротечный процесс, сопровождающийся выделением огромного количества энергии и приводящий к большим скоростям. По-видимому, он возможен лишь в том случае, если материя, из которой формируются галактики и звезды в галактиках, сверхплотная, таящая в себе огромные запасы энергии.

В другой гипотезе, предполагающей, что звезды и галактики формируются из диффузного вещества, т. е. из газа и пыли, процесс формирования рисуется как медленный и спокойный: звезды образуются в результате постепенного сжатия газовых облаков под действием силы самотяготения; только после того как этот длительный процесс зайдет достаточно далеко, газ сожмется и в центре разогреется до температур в несколько миллионов градусов, в нем начнутся внутриядерные процессы с выделением большого количества энергии. При таком процессе происхождения звезд и галактик в группе галактик, образовавшихся совместно, невозможны относительные скорости, значительно превосходящие критическую.

Должны ли мы на основании исследования квинтета Стефана окончательно высказаться в пользу гипотезы о бурном характере процесса формирования галактик и звезд? В космогонии такие поспешные выводы недопустимы.

Во-первых, не исключена возможность, что галактика NGC 7318b не принадлежит группе, а случайно проектируется на нее. Вероятность того, что галактика примерно той же величины спроектируется на такую тесную группу или случайно влетит в нее, конечно, очень мала. По подсчетам Бербиджей эта вероятность равна $\frac{1}{1500}$. Но даже

столь малая вероятность не является еще решающим аргументом, потому что это вероятность, подсчитанная после того как установлен факт, а не до его установления.

Поясним это соображение следующим примером. Допустим, вам навстречу издали идут три человека. Пока они далеко, вы подсчитываете вероятность того, что все трое окажутся рыжеволосыми. Эта вероятность, если считать, что в среднем на 100 человек приходится один рыже-

волосый, равна $\frac{1}{100} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{100}$, т. е. одной миллионной. Поэтому если после приближения трех человек окажется, что все они действительно рыжеволосые, то у вас имеются все основания поражаться тому, что столь маловероятное событие произошло.

Иное дело, если вы сначала увидите, что приблизившиеся три человека рыжеволосые, а после подсчитаете вероятность этого события. В этом случае вы не должны в такой же мере удивляться тому, что произошло событие, имеющее вероятностью одну миллионную. Ведь ваше внимание было привлечено к самому явлению уже после того, как оно произошло. Вот если теперь, после того, как вас уже заинтересовал определенный признак, подойдет четвертый пешеход и окажется, что и он рыжеволосый, тогда уже действительно у вас будут все основания изумляться или выдвигать гипотезы, что местность населена преимущественно рыжеволосыми или что четыре пешехода генетически связаны, принадлежат, например одной семье.

Посмотрим, нельзя ли найти и в нашей задаче дополнительные данные. Читатель помнит, что до 1961 г. у одной из галактик квинтета, именно у NGC 7320, лучевая скорость не была известна. Теперь эта скорость стала вызывать большой интерес. Если бы оказалось, что она составляет около $+6900 - +7000$ км/с, т. е. близка к значению скоростей трех галактик, имеющих приблизительно одинаковую скорость, то можно было бы допустить, что четыре галактики образуют устойчивую группу, а пятая, NGC 7318b, случайно проектируется на эту группу. Если же скорость NGC 7320 заметно отличается от $+6900 - +7000$ км/с, то нужно будет считать, что квинтет Стефана — действительно неустойчивая группа, так как вероятность того, что две галактики, NGC 7318b и NGC 7320, случайно проектируются на группу, уже вовсе ничтожна и равна

$$\frac{1}{1500} \cdot \frac{1}{1500} = \frac{1}{2\,250\,000}.$$

Бербиджи измерили лучевую скорость NGC 7320. Результат оказался поразительным: $+1073$ км/с. NGC 7320 движется со скоростью почти 6000 км/с по отношению к четырем другим галактикам квинтета. Можно сказать, что она «выстреливается» из группы.

Таким образом, исследование динамики квинтета Стефана приводит к аргументам в пользу гипотезы об образовании галактик из сверхплотной материи в результате бурного, взрывного процесса.

Правда, остается возможность защищать гипотезу формирования галактик из диффузной материи. Для этого нужно предположить, что: 1) NGC 7320 не физический член, а проектируется на группу, 2) массы остальных четырех галактик равны не $3 \cdot 10^{11}$ г, как мы приняли при расчетах, а в 21 раз больше. Тогда, как показывают выражения (34) и (35), потенциальная энергия возрастет

Т а б л и ц а 26. Лучевые скорости галактик в тесной группе VV 172

Галактика	Лучевая скорость, км/сек	Лучевая скорость по отношению к центру инерции галактик А, С, D и E, км
A	+16070	+305
B	+36880	+21 115
C	+15820	+55
D	+15690	-75
E	+15480	-285

в 441 раз, а кинетическая энергия только в 21 раз, и сумма их для четверки галактик станет меньше нуля. Четверка окажется устойчивой. Массы $6,3 \cdot 10^{11}$ г велики для галактик, но совершенно исключить возможность столь массивных галактик в квинтете Стефана нельзя.

Еще более наглядный пример возможного «выстреливания» галактики из тесной группы галактик привел недавно Серджент. Он получил при помощи 5-метрового телескопа спектры пяти слабых галактик (видимая звездная величина от $17^m,0$ до $17^m,5$) в тесной группе VV 172, обнаруженной Б. А. Воронцовым-Вельяминовым (см. рис. 91). Эта группа образует отчетливую цепочку из шести галактик, пространственная взаимная близость образующих ее членов не вызывает сомнений. Шестая, крайняя справа на рис. 91, галактика очень слабая, ее спектр не был получен. Измеренные лучевые скорости остальных пяти галактик (они обозначены буквами А, В, С, D, E — справа налево на рис. 91) приведены в табл. 26.

Бросаются в глаза три особенности в распределении скоростей галактик. Первая состоит в том, что если не считать галактики В, то лучевые скорости членов группы

схожи. Это подтверждает их одинаковую удаленность от нас и, следовательно, пространственную взаимную близость, реальность тесной группы. Средняя лучевая скорость галактик А, С, D и Е равна 15 765 км/с, что при значении постоянной Хаббла 75 км/с · Мпс, дает оценку расстояния до тесной группы 210 Мпс.

Вторая особенность заключается в том, что лучевые скорости галактик А, С, D, Е последовательно убывают. В третьем столбце табл. 26 приведены лучевые скорости галактик по отношению к центру инерции четырех галактик А, С, D, Е. Они свидетельствуют о вращении системы, вследствие чего галактики А и С имеют индивидуальную скорость удаления, а галактики D и Е индивидуальную скорость приближения. Период вращения группы легко подсчитать. Он равен 600 млн. лет — в три раза больше, чем период вращения Галактики в районе Солнца.

Третья наиболее удивительная особенность распределения — резкое несоответствие лучевой скорости галактики В лучевым скоростям четырех других галактик. Сердженд рассмотрел возможные объяснения этого явления. Предположение, что большая лучевая скорость галактики В может быть вызвана гравитационным эффектом общей относительности, должно быть отвергнуто, так как это требует недопустимо большой массы галактики — примерно в миллион раз большей, чем масса нашей Галактики. Второе предположение состоит в том, что галактика В есть галактика фона, случайно спроектировавшаяся на тесную группу. Но один взгляд на последовательное расположение галактик в цепочке убеждает в малой вероятности такого случайного совпадения направлений на галактики. Кроме того, если галактика В есть галактика фона и ее расстояние соответствует ее лучевой скорости и равно 490 Мпс, то при данной видимой величине это должна быть сверхгигантская галактика, тогда как остальные четыре — галактики умеренной светимости. Случайное расположение сверхгигантской галактики фона точно на «вакантном» месте в цепочке галактик представляется еще менее вероятным.

Проанализировав все предположения, Сердженд приходит к выводу, что в тесной группе VV 172, как и в квинтете Стефана, наблюдается «выстреливание» галактики из тесной группы галактик. Скорость «выстреливания» здесь превышает 21 000 км/с и намного превосходит аналогичные скорости в квинтете Стефана.

Особый интерес представляет тройная тесная группа, у которой лучевые скорости компонентов следующие:

IC 3481 + 7011 км/с

Безымянная + 7229 »

IC 3483 + 33 »

IC 3483 «выстреливается из тройки со скоростью около 7000 км/с. В этой тесной группе очень важным обстоятельством является то, что галактика IC 3481 явно связана светящимся мостом с галактикой безымянной, которая в свою очередь связана светящейся дугой со спиральной галактикой IC 3483. Следовательно, все три компонента взаимодействуют и предположение, что IC 3483 очень близка к нам и случайно проектируется на пару других далеких галактик, следует отклонить.

Исследование еще семи тесных групп показывает, что четыре из них следует считать распадающимися, разлетающимися системами, а остальные три группы, по-видимому, устойчивы. Но неправильно было бы считать, что разваливающиеся группы подкрепляют одну гипотезу, а устойчивые группы другую, так сказать, на равных правах. Если галактики формируются из диффузной материи в результате спокойного процесса конденсации, то не должно быть ни одной группы с разлетающимися галактиками. С другой стороны, кажется странным, чтобы при формировании тесной группы галактик в результате бурного взрывного процесса несколько членов группы получали очень малые друг относительно друга скорости и только одна галактика «выстреливалась» из группы. Выполненные в последнее время оценки расстояний галактик в рассмотренных группах укрепляют предположение, что наблюдаемое явление вызвано случайным проектированием галактик, не принадлежащих тесной группе, на тесную группу.

Устойчивость скоплений галактик

Неожиданные результаты, полученные для тесных групп, заставляют сразу поставить вопрос: а устойчивы ли скопления галактик?

Ни в одном скоплении галактик не известны лучевые скорости всех членов. Однако приближенное значение кинетической энергии скопления можно получить, если измерены лучевые скорости хотя бы части членов скоп-

ления и сосчитано общее число членов скопления N . В самом деле, известным уже нам способом можно определить сумму кинетических энергий n членов, для которых измерены лучевые скорости, а затем, умножив эту сумму на N/n , получить кинетическую энергию всего скопления. При этом мы поступим так же, как издатель, желающий узнать число печатных знаков в книге, подсчитывающий для этого число знаков на странице и умножающий затем результат на число страниц в книге.

Чтобы вычислить потенциальную энергию скопления, нужно просуммировать взаимную потенциальную энергию всех пар, какие только можно мысленно составить из всех галактик скопления. Число таких пар равно

$$\frac{1}{2} N(N-1). \quad (50)$$

Это выражение, как легко понять, равно, например, числу всех рукопожатий, которыми обмениваются N собравшихся знакомых, если каждый пожимет руку каждому.

Потенциальная энергия одной пары галактик равна

$$\frac{GM_1 M_2}{r}. \quad (51)$$

Чтобы ее вычислить для каждой пары, нужно знать и массы галактик и расстояние, их разделяющее. Но мы можем определить только проекцию расстояния, а не само расстояние, которое для каждой пары в отдельности нам неизвестно. Поэтому для вычисления потенциальной энергии скопления нужно применить статистический метод. Можно математически вычислить, что среднее значение величины $1/r$, обратной расстоянию между двумя точками в однородном шаре, равно $\frac{6}{5R}$, где R — радиус шара. Поэтому если использовать это среднее и принять массы всех галактик в скоплении одинаковыми, то потенциальная энергия скопления определится выражением

$$-\frac{3N(N-1)GM^2}{5R}. \quad (52)$$

Значение этого выражения для каждого скопления галактик нетрудно подсчитать.

Вычисления показали, что во всех скоплениях галактик кинетическая энергия больше потенциальной, следовательно, нужно сделать вывод, что все скопления неустойчивы, что они разваливаются. Для некоторых скопле-

ий галактик, таких, как скопление в Волосах Вероники или Северной Короне, этот вывод кажется неправдоподобным. Правильная сферическая форма этих скоплений, постоянное уплотнение галактик по мере приближения к центру скопления, концентрирование более ярких галактик к центру скопления — все это явно свидетельствует о противоположном: об устойчивости, равновесии. Объяснение может быть найдено, если предположить, что в сферических скоплениях галактик имеются значительные массы невидимой материи, например, пыли и газа или дозвездного вещества. Их присутствие увеличит потенциальную энергию скопления и сделает его устойчивым.

Что касается неправильных скоплений галактик, таких, как скопления в Деве или в Печи, то их неустойчивость, распад не вызывает сомнений. Превышение кинетической энергии над потенциальной в них особенно значительно. А строение этих скоплений, напоминающее о хаосе, само подсказывает мысль об их неустойчивости.

Нужно сказать, что неустойчивость и распад не означают обязательно полную неустойчивость и полный распад. Если кинетическая энергия скопления больше его потенциальной энергии, то распад, уход из скопления членов неизбежен. Но после того как из скопления уйдут самые быстродвижущиеся галактики, кинетическая энергия скопления уменьшится и может стать меньше потенциальной энергии — будет достигнута устойчивость. Как показал автор этой книги, если закон распределения скоростей галактик в скоплении максвелловский — такой же, как закон распределения скоростей у молекул окружающего нас воздуха, то степень распада скопления следующим образом зависит от отношения потенциальной энергии к кинетической. Если это отношение равно — 0,90, то скопление станет устойчивым после того, как из него уйдут 8% его членов. Если отношение энергий составляет — 0,81, то скопление покинут 41% галактик. Если же отношение энергий составляет — 0,806 или меньше, то состояние устойчивости никогда не будет достигнуто, скопление распадается полностью.

Вырисовывается следующая общая картина образования и развития скоплений галактик. Скопления формируются одновременно с формированием в них галактик. В ходе этого процесса галактики получают значительные скорости. Если при этом образовавшееся скопление недостаточно плотное — такое, как скопления в Деве или в

Печи, и потенциальная энергия его недостаточно велика, то оно окажется неустойчивым и начнет распадаться. Распад может быть полным, но может быть и частичным. Может случиться так, что от огромного скопления останется лишь небольшой устойчивый остаток — горстка членов. Если же образовавшееся скопление плотное — такое, как скопления в Волосах Вероники и в Северной Короне, то потенциальная энергия его велика, больше кинетической, оно устойчиво. В результате движений галактик внутри такого скопления достигается правильная форма скопления и устанавливается некоторый закон плотности числа галактик внутри скопления: плотность тем больше, чем ближе место к центру скопления.

Регулярные и нерегулярные силы в звездных системах

Силовое поле звездной системы создается отдельными материальными точками — звездами, находящимися одна от другой на больших расстояниях. Такое силовое поле имеет сложную структуру и в нем необходимо различать силы двух родов. Каждая является силой тяготения, вызываемой притяжением масс, но свойства их различны.

Посмотрим, какие силы действуют на некоторую звезду, движущуюся в звездной системе. Ее притягивают все остальные звезды системы. Эти силы геометрически складываются в одну силу. Но в той суммарной силе целесообразно рассмотреть две части. Одна часть образована притяжением ближайшей звезды, или двух-трех, нескольких ближайших звезд-соседей, а другая часть вызвана притяжением всех остальных звезд системы. Нетрудно понять, что сила притяжения всех звезд системы, исключая ближайшие, зависит от того, в каком месте звездной системы находится рассматриваемая звезда. Если, например, рассматриваемая звезда находится на некотором расстоянии от центра звездной системы, имеющей сферическую симметрию, то общее притяжение звезд системы, исключая ближайших соседей, составит силу, направленную к центру системы. Зависимость величины этой силы от расстояния рассматриваемой звезды до центра системы будет определяться общим законом распределения звезд в системе. В самом центре сферической системы эта сила будет равна нулю, так как притяжения всех звезд, исключая ближайших соседей, в центре системы уравновеши-

вают друг друга. Итак, сила притяжения всех звезд системы, кроме звезд — ближайших соседей, определяется характером строения звездной системы и тем местом, которое занимает в ней в данный момент рассматриваемая звезда. При движении звезды в звездной системе изменение этой силы носит закономерный характер. Поэтому ее называют регулярной (т. е. правильной). Если известно общее строение системы, то для каждого места в ней можно вычислить величину и направление регулярной силы.

Иное дело — часть суммарной силы, образованная притяжением ближайшего соседа или нескольких ближайших соседей — звезд. Нетрудно понять, что эта сила носит случайный характер. Она зависит от того, как случайным образом сложится обстановка в ближайших окрестностях рассматриваемой звезды, как расположатся в окрестностях звезды-соседи. Заранее предсказать величину или направление этой силы невозможно. Она является случайной величиной, и единственное, что можно сделать, это найти вероятность того, что она примет то или иное значение. Поэтому эти силы, вызванные притяжением ближайшего соседа или нескольких ближайших звезд-соседей, называют иррегулярными, то есть неправильными.

Как, наверное, уже успел заметить читатель, тонкость вопроса состоит в том, что нельзя по смыслу задачи определенно указать количество ближайших соседей, притяжение которых образует иррегулярную силу. Очевидно лишь, что в иррегулярной силе наибольшую роль играет ближайший сосед, следующую по значению роль — второй по расстоянию сосед и т. д.

Разделение влияний на регулярные и иррегулярные, вызываемые общим закономерным характером условий и условиями, случайным образом складывающимися в непосредственной близости от рассматриваемого тела, субъекта, является универсальным. Какую бы среду, какую бы область взаимоотношений в природе мы ни рассмотрели, такое разделение влияний естественно и целесообразно. Даже в такой сложной по своему характеру области взаимоотношений, как взаимоотношения человека и общества, ясно проступает разделение влияний на регулярные: влияние общества в целом — выработанные им законы, уклад жизни, и иррегулярные: влияние тех членов общества, с которыми субъект непосредственно общается — членов семьи, друзей, товарищей по работе. И здесь вы не можете указать точно той гра-

ницы, где кончается влияние на вас отдельных людей и начинается влияние общества в целом.

Невозможно полностью отделить друг от друга регулярные и иррегулярные силы звездной системы. Они составляют единство. Но они являют и противоположность, так как природа их различна. Их единство и их противоположность — это единство и противоположность закономерности и случайности.

Попробуем теперь сравнить роль регулярных и иррегулярных сил в звездной системе. Для простоты будем

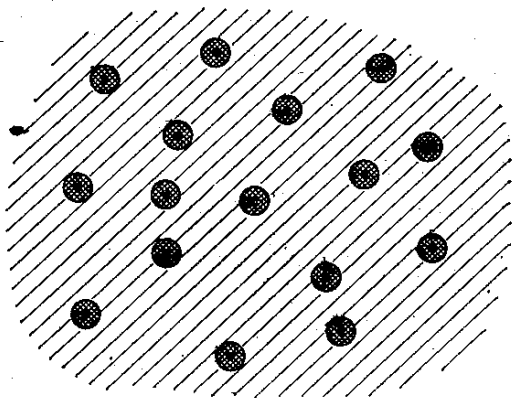


Рис. 120. Разбиение пространства звездной системы на области, где преобладают регулярные силы (косая штриховка), и области, где преобладают иррегулярные силы (кружки с двойной штриховкой).

сравнивать силу, прилагаемую к данной звезде всей звездной системой, с силой притяжения только одного самого близкого соседа. Если ближайший сосед находится далеко, то притяжение его незначительно и регулярная сила (сила притяжения всей звездной системы) больше иррегулярной силы (силы притяжения ближайшего соседа). Если же ближайший сосед достаточно близок, то иррегулярная сила больше регулярной. Поэтому около каждой звезды в звездной системе можно некоторым радиусом провести сферу и разбить таким образом все пространство звездной системы на две части: одна часть — это пространство вне этих сфер, здесь преобладают регулярные силы, и вторая часть — пространство в сферах (рис. 120), здесь преобладают иррегулярные

силы, так как если звезда, за движением которой мы следим, попадет внутрь одной из сфер, то там у нее окажется очень близкий сосед, вызывающий большую иррегулярную силу.

Если для простоты предположить, что звездная система имеет сферическую форму и звезды распределены внутри сферы равномерно, то можно подсчитать, что отношение суммы маленьких объемов, внутри которых иррегулярная сила больше регулярной, к объему всей звездной системы равно

$$\frac{2}{\sqrt{N}} \frac{\overline{m^{3/2}}}{\overline{m}^{3/2}} \quad (53)$$

Очевидно, что чем больше отношение (53), тем значительнее роль иррегулярных сил в звездной системе. Следовательно, в системах с большим числом звезд N иррегулярные силы играют меньшую роль, чем в бедных звездами системах. Имеет также значение множитель $\overline{m^{3/2}}/\overline{m}^{3/2}$. Числитель этой дроби означает среднюю величину степени $3/2$ массы звезды, а знаменатель — степень $3/2$ средней величины массы звезды. Если бы все массы звезд были равны, то числитель и знаменатель этой дроби были бы одинаковы. Если же массы звезд не одинаковы, то можно математически доказать, что эта дробь всегда больше единицы, причем она тем больше, чем больше различия в массах. Для примера рассмотрим три случая для двух масс: 1) когда массы равны, 2) когда вторая масса вдвое больше первой массы и 3) когда вторая масса в десять раз больше первой. Значение дроби будет подсчитываться так:

$$1) \quad \frac{\frac{1}{2} (1^{3/2} + 1^{3/2})}{\left[\frac{1}{2} (1 + 1) \right]^{3/2}} = 1,$$

$$2) \quad \frac{\frac{1}{2} (3^{3/2} + 1^{3/2})}{\left[\frac{1}{2} (3 + 1) \right]^{3/2}} \approx 1,09,$$

$$3) \quad \frac{\frac{1}{2} (10^{3/2} + 1^{3/2})}{\left[\frac{1}{2} (10 + 1) \right]^{3/2}} \approx 1,27.$$

Мы видим, что для двух масс значение дроби тем больше, чем больше различие в массах.

Роль иррегулярных сил тем больше, чем больше различие в массах тел звездной системы, т. е. чем более неоднородна звездная система. Значение этого вывода велико потому, что в некоторых звездных системах, а именно в галактиках, нужно рассматривать как отдельные тела не только одиночные звезды, но и шаровые скопления, рассеянные скопления, звездные облака, облака диффузной материи. Массы некоторых из этих объектов в десятки и сотни тысяч раз больше масс отдельных звезд, неоднородность системы весьма значительна, и дробь $\frac{M^{3/2}}{\Sigma m^{3/2}}$ может достигать значений $10^2 - 10^3$.

Все изложенное справедливо не только для звездных систем, но и почти в равной степени для систем, состоящих из галактик, т. е. кратных галактик и скоплений галактик. Некоторое отличие состоит в том, что в кратных галактиках и скоплениях галактик расстояния между галактиками не намного превосходят диаметры галактик. А в звездных системах, как мы отмечали выше, расстояния между звездами огромны в сравнении с диаметрами звезд. Однако это отличие не является коренным. Оно будет сказываться лишь в том, что формулы, которые совершенно точны для звездных систем, для систем, составленных из галактик, верны приближенно.

Выражение (53) показывает, что в системах, где число тел не превосходит 10, а именно в кратных звездах и в кратных галактиках, область пространства, где иррегулярные силы больше регулярных, составляет большую часть всего пространства системы. Значит, в кратных звездах и в кратных галактиках роль иррегулярных сил превосходит роль регулярных сил. В рассеянных звездных скоплениях и небольших скоплениях галактик, где число тел исчисляется сотней или несколькими сотнями, эффективность иррегулярных сил меньше, чем эффективность регулярных сил, но весьма существенна. В шаровых звездных скоплениях число звезд измеряется многими сотнями тысяч. Здесь в сравнении с регулярными силами роль иррегулярных сил очень мала. Таково же положение в сферических скоплениях галактик, содержащих многие тысячи членов. Наконец, совершенно ничтожна роль иррегулярных сил в галактиках, где число звезд исчисляется миллиардами и десятками миллиардов.

Понятие стационарности и нестационарности

Представим себе необитаемый остров, который в некоторой момент был открыт мореплавателями и начал заселяться. Проследим за тем, как будут изменяться численность населения и характер его расселения на острове. Сначала земли будет много для всех. На остров будут приезжать и прочно на нем оседать новые и новые поселенцы. Но затем, по мере того, как население острова станет расти, а хорошие земли окажутся занятыми, приток новых поселенцев на остров начнет уменьшаться и наступит время, когда число людей приезжающих на остров, чтобы попытаться на нем счастья, станет равно числу людей, потерпевших на острове неудачу и покидающих его. Математик и физик скажут, что число жителей острова было сначала нестационарной величиной, оно определенно возрастало, а потом стало стационарной величиной. Стационарность не означает строгого постоянства. Каждый раз, как от острова отходит судно, и каждый раз, как на остров приходит судно, число жителей острова изменяется, но эти изменения носят характер случайных колебаний в ту и другую сторону. В среднем же общей тенденции возрастания или убывания населения нет.

Когда наиболее удобные прибрежные земли острова окажутся занятыми, начнется заселение гористой местности внутри острова. Это будет период, когда распределение населения на острове будет нестационарным — во внутренних частях острова население будет расти за счет прибрежных частей. Но затем и в распределении людей на острове наступит стационарность. Число лиц, переселяющихся из прибрежных областей острова во внутренние районы, станет равно числу лиц, переселяющихся из внутренних районов на побережье.

Дороги, построенные на острове в начальный период заселения, будут связывать внутренние районы с побережьем. Если в этот период рассматривать перемещения транспорта во внутренней области острова, то преобладающими окажутся перемещения в радиальных направлениях — в сторону берега и в направлении центра острова. Но по мере того, как внутренние районы станут обживаться и развиваться, появится потребность связать и их между собой, будут строиться и поперечные дороги. Во внутренних областях станет возрастать число дви-

жений в поперечном направлении. Мы скажем, что распределение движений транспорта сначала было нестационарным. Но в итоге эволюции установилось стационарное состояние, когда число поперечных перемещений достигло определенной доли числа радиальных перемещений и эта доля перестала изменяться.

Во всех рассмотренных нами процессах, происходящих при заселении острова, сначала проявляется нестационарность, а затем достигается стационарность. Стационарность достигается в ходе эволюции вследствие взаимодействия людей и природы и взаимодействий людей между собой.

Стационарность числа людей на острове, стационарность характера расселения людей на острове и стационарность в движении транспорта на острове достигаются в разные моменты времени. Наблюдатель, приехавший на остров и не знающий, как долго длится заселение острова, может вынести суждение об этом, сравнивая число лиц, приезжающих на остров и покидающих его, исследуя распределение людей на острове и распределение движений транспорта на острове.

Рассмотрим еще один пример. Порыв ветра раскрыл форточку и в комнату ворвалась струя холодного воздуха. Форточку захлопнули. В первый момент в движении частиц воздуха будет преимущественное направление от форточки в глубь комнаты. Кроме того, в области этой струи воздуха будет холоднее, чем в других местах комнаты. Но очень скоро движение струи воздуха утихнет, а температура во всех местах комнаты выравняется. Сначала мы имели нестационарное состояние. Затем, в результате взаимодействий молекул воздуха между собой, было достигнуто стационарное состояние, характеризующееся одинаковой повсюду температурой и отсутствием движений струй воздуха. В каждой точке число молекул воздуха, движущихся в некотором направлении, равно числу молекул, летящих в противоположном направлении, так что в среднем в каждой точке воздух неподвижен, хотя отдельные молекулы движутся с большой скоростью.

Для нестационарного состояния характерны неравномерность, клочковатость структуры, грубая неравномерность в распределении скоростей. Переход в стационарное состояние сопровождается сглаживанием структуры (не обязательно полным), уменьшением неравномерности в распределении скоростей.

Эволюция от нестационарного состояния в состояние стационарное является универсальным законом природы. Различие состоит лишь в том, что в одних областях, системах, переход в стационарное состояние происходит очень быстро, в других случаях для этого перехода нужны огромные промежутки времени.

Стационарность и нестационарность звездных систем

Звездная система в момент, когда она сформировалась, должна быть нестационарной. Так должно быть потому, что для каждой системы с заданным числом звезд определенной массы, заданными общими потенциальной и кинетической энергиями и заданным общим количеством вращения, имеется лишь одно-единственное стационарное состояние. Все остальные состояния, а их бесчисленное множество, являются нестационарными. Поэтому практически невероятно, чтобы звездная система при формировании оказалась сразу в стационарном состоянии.

Также невозможно, расселив жителей на острове в соответствии с некоторым планом, надеяться, что это точно то самое расселение, которое отвечает условиям жизни и взаимоотношению людей на острове. Безусловно, расселение в соответствии с планом окажется нестационарным, жизнь внесет в него свои поправки, стационарное состояние будет достигнуто в результате взаимодействия людей и природы и людей между собой.

Если при составлении плана расселения людей на острове будут учтены географические особенности острова, то распределение поселенцев на острове, определяемое планом, хотя и не будет стационарным, но окажется сравнительно близким к нему. Поправки, внесенные жизнью, будут невелики. В том же случае, если географические особенности острова не будут учитываться или будут учитываться неправильно, например, если большая часть поселенцев будет размещена во внутренней гористой области острова, а не на плодородных землях побережья, то полученное нестационарное распределение будет очень далеким от стационарного, эволюция к стационарному распределению будет сопровождаться коренными изменениями в расселении поселенцев.

Таким образом, среди нестационарных состояний одни близки к стационарному, другие далеки от него.

Звездная система, нужно полагать, в момент, когда она сформировалась, находится в состоянии, весьма далеком от стационарного. Это утверждение вытекает из того, что формирование звездной системы есть, по всем данным, процесс, характеризующийся резким изменением состояний вещества и сопровождающийся выделением огромных количеств энергии. Результатом таких резких изменений состояния всегда является нестационарность.

Даже в том случае, если верна гипотеза формирования звезд и звездных систем из диффузной материи и, следовательно, процесс формирования протекает менее бурно, без выделения больших количеств энергии, звездная система в начальный момент окажется в состоянии, весьма далеком от стационарного. В самом деле, представим себе сферическое газовое облако, достигшее стационарного состояния. В этом облаке притяжение материи в направлении центра облака уравнивается газовым давлением, поэтому газ в целом неподвижен, хотя отдельные молекулы, разумеется, движутся.

Допустим теперь, что весь газ этого облака сконденсировался в отдельные звезды, сформировалась звездная система. В самый первый момент после формирования звезды будут неподвижны, так как были неподвижны массы газа, из которых сконденсировались звезды. Притяжение к центру системы сохранит свою величину, так как сила тяготения зависит от массы, а масса системы не изменилась. А вот давления газа, уравнивающего это притяжение, теперь уже не будет. Все звезды начнут двигаться в направлении центра системы, система начнет сжиматься, следовательно, она станет нестационарной.

Подчиняясь универсальному закону природы, звездная система после этого должна эволюционировать, стремясь к стационарному состоянию.

Вот здесь необходимо рассмотреть влияние регулярных и иррегулярных сил отдельно. Во всех звездных системах с числом членов, большим нескольких десятков, т. е. в шаровых скоплениях и галактиках, регулярные силы эффективнее, действуют быстрее, чем иррегулярные силы, поэтому сначала достигается стационарность, как принято говорить, в регулярном поле. Это означает достижение такого состояния, при котором ни распределение звезд в системе, ни распределение скоростей звезд не

меняется в результате действия одних регулярных сил. При таком состоянии каждая звезда движется и скорость ее меняется. Но как только из данного места системы под действием регулярных сил уходит звезда, регулярные силы в это же место приводят другую звезду, обладающую той же скоростью, поэтому хотя звезды меняются, положение в каждом месте системы остается неизменным.

Возвратимся к примеру возможного формирования звездной системы в результате конденсации звезд в сферическом газовом облаке. Как мы уже отметили, сразу после формирования каждая звезда станет двигаться к центру. В центре системы звезда достигнет наибольшей скорости, пройдет центр и станет удаляться от него, теряя постепенно скорость, остановится на некотором расстоянии и снова двинется в сторону центра. Так каждая звезда будет совершать радиальные колебания через центр системы. Но период колебания разных звезд около центра будет различным, поэтому если в самом начале все звезды двигались в направлении центра, то после того, как каждая из них совершит несколько колебаний, в каждый данный момент часть звезд будет приближаться к центру, а часть удаляться от него. Произойдет перемешивание звезд. Наконец, наступит время, когда в каждой точке системы число звезд, движущихся в сторону центра, будет равно числу звезд, движущихся от него. Это и будет состояние стационарное в регулярном поле.

В дальнейшем регулярные силы не будут изменять ни распределения звезд в системе, ни распределения скоростей звезд. Время перехода в состояние стационарное в регулярном поле равно, следовательно, нескольким периодам колебаний звезды около центра. Можно подсчитать, что это время T_1 , выраженное в секундах, приблизительно равно

$$T_1 = \frac{2}{\sqrt{G\rho}}, \quad (54)$$

где G — постоянная тяготения, а ρ — средняя плотность системы, выраженная в граммах на 1 куб. сантиметр. Как показывает формула (54), время перехода в состояние стационарное в регулярном поле зависит только от средней плотности системы.

В рассеянных и шаровых звездных скоплениях средняя плотность материи равна приблизительно 10^{-22} — 10^{-23} г/см³, поэтому для звездных скоплений время пере-

хода в состояние стационарное в регулярном поле приблизительно равно $3 \cdot 10^7 - 10^9$ лет. Этот промежуток времени в масштабах космогонии невелик, — возраст звезд в шаровых скоплениях в десятки раз больше. Значит, шаровые скопления должны были давно успеть перейти в состояние стационарное в регулярном поле. И действительно, правильная форма шаровых скоплений, закономерное увеличение звездной плотности по мере приближения к их центру показывают, что в шаровых скоплениях достигнута стационарность в регулярном поле.

У рассеянных скоплений форма менее правильна. Но, во-первых, некоторые рассеянные скопления очень молоды, их возраст меньше 10^8 лет и, возможно, они еще нестационарны. Во-вторых, система, состоящая всего из нескольких десятков звезд и уже достигшая стационарного состояния, будет все-таки не вполне симметричной просто потому, что всякое случайное отклонение положения одной, двух, нескольких звезд, вызываемое иррегулярными силами, существенно нарушает симметрию системы.

Средняя плотность галактик меньше средней плотности звездных скоплений и составляет $10^{-23} - 10^{-24}$ г/см³. Кроме того, галактики, в отличие от звездных скоплений, являются вращающимися системами. В них перемешивание, вызываемое регулярными силами, происходит медленнее, и время перехода в состояние стационарное в регулярном поле больше того, которое получается по формуле (54). Его можно оценить в $3 \cdot 10^8 - 10^9$ лет, т. е. в несколько периодов обращения Солнца около центра Галактики.

Можно ли считать, что наша Галактика и другие галактики достигли стационарности в регулярном поле? Возраст Солнца оценивается в $5 \cdot 10^9$ лет или больше. Если бы все звезды галактик, а следовательно, и сами галактики, имели тот же возраст, то состояние стационарное в регулярном поле должно было быть достигнуто давно, галактики имели бы строго правильную форму, близкую к сжатому эллипсоиду вращения. И действительно, эллиптические галактики имеют правильную форму, близкую к форме сжатого эллипсоида вращения. Нельзя заметить никаких неправильностей, отклонений, даже мелких, от этой формы.

В спиральных галактиках (в том числе в нашей Галактике) подавляющая часть населения образует пра-

вильную симметричную систему, сходную со сжатым эллипсоидом вращения. Но наряду с этим в спиральных галактиках наблюдается спиральная структура и ряд неправильностей строения. Все эти отклонения от правильной эллипсоидальной формы в основном связаны с особым расположением звезд горячих гигантов и других молодых звезд. Естественно, что недавно образовавшиеся звезды еще не успели в достаточной степени испытать воздействие регулярного поля галактики. Мы можем сказать, что подсистема горячих гигантов и других молодых звезд еще не достигла состояния, стационарного в регулярном поле. Таким образом, изучение строения и динамики спиральных галактик приводит к выводу, что подавляющая часть звезд этих звездных систем сформировалась раньше, чем миллиард лет назад. Небольшая часть звезд сформировалась «недавно», менее миллиарда лет назад. Эти звезды, в основном горячие гиганты, имеют огромные светимости, поэтому, хотя число их и невелико, образуемая ими спиральная структура и ряд местных уплотнений в спиральных галактиках оптически выражены очень отчетливо, если, разумеется, наблюдать со стороны. При наблюдении изнутри картина спиральной структуры смазывается. Например, в спиральной галактике NGC 5457 (см. рис. 65) яркие спиральные ветви, кажется, излучают больше, чем все остальные области этой галактики. Но общая масса всех горячих гигантов, создающих сияние спиральных ветвей, составляет менее тысячной доли массы галактики.

Форма неправильных галактик явно показывает, что они не находятся в состоянии, стационарном в регулярном поле. Значит ли это, что подавляющая часть звезд неправильных галактик моложе миллиарда лет? Нет, такой вывод был бы поспешным. Система, достигшая стационарного состояния, может стать снова нестационарной в результате действия внешних сил. Если, например, тесно сблизятся две галактики, то взаимное приливное действие исказит форму каждой из них. Давно было замечено, что галактики типа II встречаются, как правило, парами. По-видимому, неправильная форма таких галактик объясняется изменениями, вызванными взаимным приливным действием. Ярким примером такой пары неправильных галактик являются Большое и Малое Магеллановы Облака. Возможно, что сильные искажения их формы вызваны и близостью нашей Галактики, имеющей

значительно большую массу, чем масса Магеллановых Облаков. Весьма интересно, что детальное изучение строения Магеллановых Облаков, выполненное Вокулером, обнаружило в каждом из них признаки спиральной структуры. Нужно думать, что и спиральная структура в результате действия приливных сил подверглась искажениям, стала неотчетливой.

Степень искажения формы и степень нестационарности зависят от того, насколько тесно сблизилась две галактики. Может быть, в данный момент расстояние между ними не очень мало, но если до этого они были ближе друг к другу, искажение форм могло быть сильным и оно будет сохраняться в течение периода, пока галактики не достигнут снова состояния стационарного в регулярном поле.

Общая плотность материи в скоплениях галактик значительно ниже, чем в самих галактиках, и равна 10^{-28} — 10^{-27} г/см³. Время достижения состояния стационарного в регулярном поле составляет $3 \cdot 10^9$ — 10^{10} лет. Этот период времени примерно равен оценке возраста обозреваемой области Вселенной и самих скоплений галактик. Поэтому процесс перехода в состояние стационарное в регулярном поле для тех скоплений галактик, которые устойчивы, может быть, только недавно завершился, а может быть, еще и не произошел. Как мы выяснили выше, неправильные скопления галактик, подобные скоплению в Деве или в Печи, неустойчивы и должны распадаться. Имеет смысл говорить о переходе в стационарное состояние лишь правильных сферических скоплений галактик, подобных скоплению в Волосах Вероники и в Северной Короне. Изучение скопления в Волосах Вероники показывает, что в его областях, близких к центру, расположение галактик обнаруживает симметрию, а число галактик в единице объема пространства закономерно и быстро растет по мере приближения к центру скопления. На периферии же скопления видны существенные неоднородности в распределении галактик, значительные нарушения симметрии. Можно считать, что центральные области скопления достигли состояния стационарного в регулярном поле, а периферийные области еще нет. Эта точка зрения подкрепляется тем, что во внутренних областях скопления плотность материи выше и потому переход в стационарность здесь должен происходить быстрее.

Как мы видим, разные части одной и той же системы могут находиться на разных стадиях эволюции. Так как в центральных областях звездных систем и систем галактик плотность материи более высокая, то эти области в ходе эволюции опережают другие части системы. Регулярные силы действуют быстрее нерегулярных там, где число звезд больше нескольких десятков. Поэтому, когда система стала стационарной в регулярном поле,

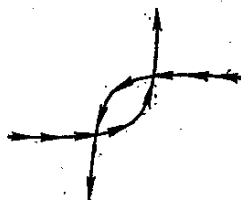


Рис. 121. Изменение направлений скоростей при звездных сближениях.

она еще нестационарна в нерегулярном поле. Это значит, что нерегулярные силы — силы, возникающие при звездных сближениях, изменяют распределение звезд в системе и распределение скоростей звезд. В нашем примере со звездной системой, сформировавшейся в сферическом газовом облаке, звезды под действием регулярных сил совершают радиальные колебания через центр системы и перемешиваются. Но регулярная сила в сферической системе всегда направлена точно в центр системы и потому под ее действием радиальные колебания всегда останутся радиальными колебаниями. Поперечные скорости не смогут появиться. Иное дело — нерегулярные силы. При сближении две звезды описывают одна относительно другой гиперболические орбиты, как это показано на рис. 121, направление их скоростей после сближения изменяется. Постепенно под действием нерегулярных сил все направления для скоростей становятся равноправными. Число звезд, движущихся в радиальном и поперечном направлениях, сравнивается. Помимо равномерного распределения по направлениям устанавливается определенное распределение по величинам скоростей, называемое максвелловским распределением. При этом распределении число тел, имеющих скорость v , пропорционально

$$v^2 e^{-3v^2/2\sigma^2}.$$

(55)

Здесь $\bar{v}$ — средняя скорость тел в системе, а e — основание натуральных логарифмов, постоянное число, широко употребляемое в высшей математике и равное приблизительно 2,72.

Выражение (55) показывает, что при максвелловском распределении преобладают скорости, близкие к средней скорости. Число тел с очень малыми скоростями незначительно, так как при этом мал множитель v^2 . Мало и число тел с большими скоростями, так как при увеличении v очень быстро уменьшается множитель $e^{-3v^2/2\bar{v}^2}$.

Австрийский физик Больцман доказал, что в результате взаимодействий сближающихся тел, какие бы тела ни были и какие бы силы между ними ни действовали, всегда в конечном счете устанавливается максвелловское распределение скоростей. Поэтому и скорости молекул окружающего нас воздуха и скорости звезд в той системе, где установилось состояние стационарное в иррегулярном поле, распределены по максвелловскому закону. В свою очередь изменение скоростей вызывает новое перераспределение звезд в пространстве. Когда этот процесс закончится, система достигнет состояния стационарного в иррегулярном поле. Необходимое для этого время называют временем релаксации. Теоретическое исследование показывает, что оно приблизительно равно

$$T_2 = \frac{\bar{v}^3}{200G^2M^2D}. \quad (56)$$

Время релаксации тем меньше, чем больше D — число звезд в единице объема, так как при большей звездной плотности звезды чаще тесно сближаются, иррегулярные силы действуют быстрее. Эти силы тем больше, чем массивнее каждая из сблизившихся звезд, поэтому большие массы M сильно способствуют эффективности иррегулярных сил. А большие скорости, наоборот, сильно уменьшают роль иррегулярных сил. Это объясняется тем, что две звезды, при сближении быстро пролетевшие одна около другой, просто не успевают значительно повлиять друг на друга, изменить друг у друга величину и направление скорости. Поэтому время релаксации пропорционально даже третьей степени средней скорости $\bar{v}$ звезд в системе.

В рассеянных скоплениях средняя скорость звезд невелика и равна 0,3—0,4 км/с. Поэтому время релаксации

в рассеянных скоплениях не очень велико: оно составляет 10^7 — 10^8 лет. В рассеянных скоплениях стационарные в регулярном и в иррегулярном поле, достигаются приблизительно одновременно.

В шаровых скоплениях средние скорости звезд приблизительно в 10 раз больше, а следовательно, время релаксации приблизительно в 1000 раз больше. Ясно, что шаровые скопления еще не успели достигнуть состояния стационарного в иррегулярном поле. Впрочем, в центральных областях шаровых скоплений очень высокая звездная плотность D . Это способствует уменьшению времени релаксации, и надо полагать, что центральные области шаровых скоплений уже стационарны в иррегулярном поле.

В галактиках средние относительные скорости звезд еще в десять раз больше, чем средние скорости в шаровых скоплениях. Поэтому время релаксации в галактиках очень велико, порядка 10^{13} — 10^{14} лет, т. е. в тысячи раз больше времени существования галактик. То, что иррегулярные силы в Галактике еще не успели сработать, подтверждается и наблюдаемым распределением скоростей звезд в окрестности Солнца. Вместо максвелловского распределения скоростей, при котором все направления скоростей равноправны, в окрестности Солнца звезды преимущественно движутся в направлении на центр Галактики и от него, а скорости, перпендикулярные к основной плоскости Галактики, встречаются редко. Только в ядрах галактик, где скорости звезд меньше, а звездная плотность больше, по-видимому, достигнута стационарность в иррегулярном поле.

Большой величине времени релаксации в скоплениях галактик сильно способствуют их огромные скорости одна относительно другой, равные нескольким сотням километров в секунду, и очень малое число галактик в единице объема D . Уменьшают время релаксации гигантские массы галактик — членов скопления. В итоге время релаксации получается равным 10^{11} — 10^{13} лет, из чего ясно, что скопления галактик не могли достигнуть стационарности в иррегулярном поле.

Диссипация звездных систем

Две противоположные точки зрения, рассматривающие происхождение звезд: первая — как процесс сжатия массивного диффузного облака и вторая — как процесс рас-

пада сверхплотного вещества, сходятся в одном. Обще-признанно, что звезды формируются не в одиночку, а группами, скоплениями. Конденсация звезд в массивном диффузном облаке должна происходить практически одновременно, и при этом сформировавшиеся звезды образуют скопление. Распад сверхплотной материи, сопровождающийся передачей скоростей образующимся звездам, в результате чего они выбрасываются из некоторой области, также можно считать образованием коллектива, скопления.

Не существует механизма, который вызывал бы объединение в скопления не связанных поначалу между собой отдельных звезд. Поэтому звезды любого наблюдаемого скопления, рассеянного или шарового, должны были сформироваться вместе, образовав скопление уже в первый момент после формирования.

А распад уже существующих звездных скоплений, выбрасывание из них отдельных звезд, происходить должен. Механизмы, управляющие такими процессами, подробно изучены, доказано, что они эффективно действовали в ходе эволюции звездных скоплений.

Мы уже писали, что число рассеянных скоплений, имеющих в настоящее время в Галактике, оценивается приблизительно в 300 000, среднее число звезд в рассеянном скоплении можно считать близким к 300, общее число звезд, содержащихся во всех рассеянных скоплениях, должно быть порядка 10 миллионов. Это только одна десятитысячная доля стомиллиардного населения диска Галактики. Поэтому нужно сделать вывод, что подавляющая часть сформировавшихся в прошлом рассеянных скоплений уже распалась или (обратим внимание читателя и на такую возможность) так изменилась, что перестала наблюдаться как рассеянные скопления.

Если бы процесс формирования и распада рассеянных скоплений в Галактике был процессом равномерным, не ускоряющимся и не замедляющимся, то отношение времени существования Галактики (приблизительно 10^{10} лет) к среднему времени распада рассеянного скопления t должно было бы равняться отношению общего числа звезд в диске Галактики к числу звезд, содержащихся в настоящий момент во всех рассеянных скоплениях. Справедлива была бы пропорция

$$10^{10} : t = 10^{11} : 10^7.$$

Согласно этой пропорции t должно было быть равно од-

ному миллиону лет. Изучение механизмов распада рассеянных скоплений показывает, что среднее время распада в 30—50 раз больше. Из этого следует важный вывод, что формирование рассеянных скоплений, а следовательно и формирование звезд, в прошлом происходило значительно интенсивнее, чем в настоящее время. В наше время процесс звездообразования в Галактике уже затухает.

Общее число шаровых скоплений в Галактике заключено между 150 и 200. Если принять его равным 175, а среднее число звезд в одном шаровом скоплении равным 600 000, то общее число звезд, содержащихся в шаровых скоплениях должно оцениваться в 100 миллионов. Число звезд в гало Галактики, т. е. в областях Галактики, значительно удаленных от галактической плоскости, тоже оценивается в несколько сотен миллионов. Так как шаровые скопления входят в состав гало, то нужно сделать вывод, что звезды поля гало — это бывшие члены шаровых скоплений, диссипировавшие, покинувшие в прошлом эти скопления. Возрасты шаровых скоплений оцениваются в несколько, до десятка, миллиардов лет. В Галактике нет молодых шаровых скоплений. Пример шаровых скоплений тоже указывает на то, что процесс звездообразования в Галактике раньше, несколько миллионов лет назад, был более бурным, чем в наши дни.

Изучение процессов диссипации (ухода звезд), которые должны происходить в звездных скоплениях, показывает, что нужно отдельно рассматривать механизм, действующий на ранней стадии эволюции скопления, и отдельно механизм, удаляющий звезды из скопления, когда оно уже достигло квазистационарного состояния. Эти механизмы несколько различны. Рассмотрим их.

Шаровые и рассеянные скопления не обнаруживают заметного вращения и их форма очень близка к сферической. Поэтому если они образовывались путем конденсации в массивной диффузной туманности, то каждая звезда, сформировавшись как сгусток материи в поле туманности, под действием общего притяжения туманности устремлялась к ее центру. До образования сгустка материи, из которой сформировалась звезда, удерживало на месте газовое давление, уравновешивавшее силу притяжения к центру туманности. На образовавшийся сгусток газовое давление уже не действует, и звезда начинает двигаться, подвинувшись только силе тяготения.

Все траектории звезд на этой первоначальной стадии эволюции почти прямолинейные, проходящие почти точно через центр инерции скопления. Мы пишем «почти», потому что на самом деле у туманности неизбежны небольшие отклонения от сферической формы и, кроме того, процесс конденсации звезд в ней тоже не должен строго подчиняться закону сферического распределения.

Исследования динамики сферических звездных скоплений с прямолинейными радиальными траекториями показывает, что в непосредственной близости около центра инерции средняя скорость звезд должна быть равна

$$\bar{v} = 0,064 \left(\frac{nM}{\rho} \right)^{1/2} \left(\lg \frac{1}{x} \right)^{1/3} \text{ км/с,} \quad (57)$$

где M — масса звезды, выраженная в единицах массы Солнца (для простоты предполагается, что массы звезд одинаковы), n — число звезд в скоплении, ρ — радиус скопления, выраженный в парсеках, x — отношение расстояния до центра к радиусу скопления. Формула верна для области скопления около ее центра инерции, следовательно, x — малая величина. Выражение (57) показывает, что при приближении к центру инерции системы скорости звезд возрастают.

Звездная плотность вблизи центра инерции системы оказывается равной

$$D = 0,057 \frac{nM}{\rho^3} x^{-2} \left(\lg \frac{1}{x} \right)^{-1/3} \quad (58)$$

единиц солнечных масс в кубическом парсеке. Плотность очень быстро растет при приближении к центру инерции.

Если подставить значения $\bar{v}$ и D в выражение для времени релаксации (56) и учесть численное значение постоянной тяготения G , то получим

$$T_2 = 1,2 \cdot 10^6 \left(\frac{n\rho^3}{M} \right)^{1/2} x^2 \left(\lg \frac{1}{x} \right)^{4/3} \text{ лет.} \quad (59)$$

Следовательно, время релаксации вблизи центра очень мало. Это означает, что при прохождении около центра инерции скопления звезды успевают сильно провзаимодействовать между собой, обмениваться энергиями.

У некоторой части звезд скорости резко возрастают, становятся больше критической, и звезды покидают скопление. Происходит бурное выбрасывание их в звездное

поле. Этот процесс тем более бурный, чем ближе к центру инерции проходят траектории звезд в самом начале процесса, т. е. чем меньше наименьшее значение x .

По мере того как звезды выбрасываются из центральной области скопления, траектории звезд, оставшихся в скоплении, но испытавших взаимодействия, становятся все более отличными от прямолинейных, уплотнение близ центра скопления ослабевает, и бурная диссипация звезд на начальной стадии эволюции затухает и прекращается.

Вычисления показывают, какой процент звезд покидает скопление на начальной стадии эволюции в зависимости от наименьшего значения x в начале процесса:

x	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	$10^{-1,5}$
Процент диссипировавших из скопления звезд	86	75	59	27	8

Так как шаровые скопления содержат много сотен тысяч звезд и их форма очень близка к строгой сферичности, значение x у них в начальный момент эволюции должно было быть весьма малым, и согласно приведенной таблице они должны были потерять больше половины своих звезд в процессе бурной диссипации. Эти звезды, ушедшие из шаровых скоплений, образовали гало Галактики.

Когда процесс бурной диссипации шаровых скоплений заканчивается и они приближаются к квазистационарному состоянию, дальнейший уход звезд из них практически прекращается. Время релаксации шаровых скоплений, подсчитываемое по формуле (56), весьма велико, и за 10^{10} лет (время, сравнимое со временем существования Вселенной) они должны терять меньше 1% своего звездного состава. Шаровые скопления неограниченно долго останутся системами гравитирующих, т. е. притягивающих друг друга, тел, и будут наблюдаться до тех пор, пока входящие в них звезды не израсходуют через излучение всю содержащуюся в них внутриатомную энергию.

Иная судьба у рассеянных скоплений. Так как число звезд в них невелико и составляет лишь несколько сотен, случайные отклонения от сферической формы должны быть у них больше, чем у шаровых скоплений, траектории звезд сильнее отличаются от прямых и начальное значение наименьшего x больше. Поэтому диссипация на первой стадии эволюции у них протекает менее бурно. В итоге рассеянные скопления теряют всего несколько процентов своих звезд. Но, в отличие от шаровых скоплений, диссипация рассеянных скоплений не прекращается после достижения ими квазистационарного состояния. По формуле (56) можно подсчитать, что время релаксации у среднего рассеянного скопления составляет несколько десятков миллионов лет. За время релаксации в среднем 1% звезд приобретает скорость большую критической и полностью покидает скопление. При этом по мере ухода звезд время релаксации уменьшается, и процесс ухода звезд ускоряется.

Кроме того, за время релаксации около 2% звезд приобретает скорость хотя и меньшую критической, но достаточную, чтобы отойти от скопления на значительное расстояние. Если бы не было звезд галактического поля и самой Галактики, то такая удалившаяся на конечное расстояние звезда под действием притяжения скопления вернется назад, войдет в тело скопления и в результате взаимодействий с его членами испытает торможение, останется внутри тела скопления. Отдаление от скопления и возвращение в него происходило бы по почти прямолинейной траектории. Наличие звездного поля Галактики изменяет положение. В области наибольшего удаления отошедшая от скопления звезда движется очень медленно, находится на этом участке пути очень долго. В течение этого длительного времени звезды поля, взаимодействуя с отошедшей от скопления звездой, успевают сообщить ей некоторую скорость. Величина составляющей этой скорости, перпендикулярной к направлению на скопление, достаточна, чтобы при возвращении к скоплению звезда не вошла в его основное тело, а прошла около скопления и, не испытав поэтому торможения, снова отошла примерно на такое же расстояние. Этот процесс ведет к образованию у скопления «короны» — разреженной оболочки из звезд, обращающихся с очень малыми скоростями около центрального тела скопления. Явление корон у звездных скоплений было впервые в результате наблюдений обна-

ружено и исследовано П. Н. Холоповым и Н. М. Артюхиной.

Так постепенно часть звезд уходит из центрального тела скопления вовсе, а другая, несколько большая, переходит в корону. За срок в 1—3 миллиарда лет, в зависимости от первоначального числа звезд в скоплении, его центральное тело полностью диссипирует, на его месте останется лишь двойная звезда. Останется и корона. Но звездная плотность в короне очень мала, она намного меньше даже звездной плотности в поле галактики. Небольшое добавление звездной плотности короны к звездной плотности галактического поля при наблюдениях не может быть обнаружено как уплотнение звезд на небесной сфере и становится как бы невидимым.

Однако у звезд короны сохраняется важная общая черта. Скорость каждой звезды короны относительно центра инерции скопления была очень мала, и поэтому скорости звезд короны должны мало различаться между собой.

Такие образования, состоящие из разбросанных звезд, имеющих одинаковые пространственные скорости, наблюдаются, изучены и получили название движущихся скоплений. Наиболее примечательным из них является движущееся скопление Большой Медведицы. Измерение собственных движений семи ярких звезд, образующих всем хорошо известный ковш созвездия, показало, что пять из них (из которых одна двойная) имеют общее собственное движение. Практически те же собственные движения еще у семи более слабых звезд созвездия. Эти данные приведены в таблице 27, где в третьем столбце дана величина собственного движения μ звезды, в четвертом — угол θ между направлением от звезды на северный полюс и направлением собственного движения звезды, в пятом — видимая звездная величина звезды, а в шестом — ее спектральный класс.

Равенство пространственных скоростей группы звезд должно проявляться, строго говоря, не в равенстве их собственных движений, а в том, что продолжения их собственных движений должны пересекаться в одной точке. Это хорошо известное свойство перспективы, которым, например, пользуются художники и чертежники, когда рисуют параллельные улицы или стороны улиц вдоль прямых, пересекающихся в одной точке. Точка неба, в которой пересекаются продолжения собственных движений

**Таблица 27. Список звезд движущегося скопления
Большой Медведицы**

№ п/п	Название звезды	μ	θ	m	Sp
1	β	0",087	67,9	2,4	A0
2	γ	0,094	84,6	2,5	A0
3	δ	0,106	85,6	3,4	A3
4	ϵ	0,113	95,0	1,7	A0
5	ζ	0,126	101,5	2,4	A2
6	η	0,122	103,8	4,0	A2
7	37	0,074	58,5	5,2	F1
8	78	0,114	95,8	4,9	F0
9	80	0,120	101,5	4,0	A5
10	HD 109011	0,111	90,8	8,1	K2
11	HD 110463	0,127	90,8	8,4	K3
12	HD 111456	0,107	88,9	5,9	F6
13	HD 115043	0,115	102,3	6,7	A5
14	HD 124752	0,149	126,2	8,2	K0

звезд движущегося скопления, называется радиантом скопления. Конечно, они пересекаются не строго в одной точке: все-таки пространственные скорости звезд движущегося скопления немного различны. Кроме того, говорится то, что собственные движения определяются с некоторыми ошибками. Тем не менее общность пространственных скоростей перечисленных звезд не вызывает сомнений. В этом нас убеждает и то, что соблюдается закон, согласно которому при равенстве пространственных скоростей величины собственных движений должны быть пропорциональны синусам углов между направлениями на звезду и на радиант. Более того, как нетрудно понять, величины лучевых скоростей у таких звезд должны быть пропорциональны косинусам тех же углов. У звезд движущегося скопления Большой Медведицы лучевые скорости измерены, и они замечательным образом подтверждают равенство пространственных скоростей этих звезд.

Объем пространства, который занимают звезды движущегося скопления Большой Медведицы, равен приблизительно 300 кубическим парсекам. Следовательно, звездная плотность этого скопления составляет около 0,047 звезды на кубический парсек, она в три раза меньше звездной плотности поля Галактики. Только механизм

распада рассеянного скопления, сопровождающийся образованием вокруг него исчезающего центрального тела короны, может объяснить явление столь разреженного коллектива звезд, имеющих одинаковые пространственные скорости.

Нужно сказать, что еще около сотни звезд, расположенных вокруг созвездия Большой Медведицы, имеют пространственные скорости, очень близкие к скорости его движущегося скопления. Несомненно, что несколько десятков из них также являются членами движущегося скопления Большой Медведицы. Но эти звезды, расположены внутри очень большого объема, содержащего сотни тысяч звезд, среди которых некоторые случайным образом должны иметь скорости, близкие к скорости членов скопления. Поэтому уверенно отделить члены скопления от звезд, случайно имеющих те же скорости, — задача трудная и пока еще неразрешимая.

Кроме движущегося скопления Большой Медведицы известны еще несколько движущихся скоплений, обладающих примерно теми же характеристиками, но они изучены менее подробно. Это скопления в Персее, Волосах Вероники и Скорпионе — Центавре.

Малое число известных движущихся скоплений объясняется трудностью их выявления. На самом деле число их должно быть очень велико и равняться числу всех сформировавшихся и распавшихся за время существования Галактики рассеянных скоплений. Диск Галактики в значительной степени состоит из проникших друг в друга, движущихся скоплений.

Звездные системы на разных стадиях эволюции

Чтобы подвести итоги исследованию динамики звездных систем, укажем, на какой стадии эволюции находятся различные системы.

Неустойчивыми системами с кинетической энергией, большей потенциальной, являются звездные ассоциации, тесные группы галактик. Эти системы быстро распадаются, их члены одновременно расходятся в разные стороны.

Устойчивыми системами, но находящимися в нестационарном состоянии, являются неправильные галактики типа II и периферийные области сферических скоплений галактик.

Стационарными в регулярном поле (но нестационарными в иррегулярном поле) системами являются эллиптические галактики и шаровые скопления. Спиральные галактики в основном достигли стационарностей в регулярном поле, однако благодаря продолжающемуся формированию звезд в этих системах они частично нестационарны.

Стационарности в иррегулярном поле достигли кратные звезды, рассеянные скопления, а также центральные области шаровых скоплений и галактик.

ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Возможны ли полеты человека к другим звездам и другим галактикам?

Космическая ракета, доставившая в ночь с 13 на 14 сентября 1959 г. вымпел Советского Союза на Луну, прошла свой путь за 1,5 суток. Приблизительно столько же времени понадобилось американской космической ракете, произведшей в июле 1964 г. перед падением на поверхность Луны фотографирование лунных ландшафтов с близких расстояний. При будущих полетах человека на Луну фактор времени не будет играть большой роли. Длительность этого космического путешествия будет меньше длительности многих путешествий по земным маршрутам.

Но уже при планировании полетов на планеты вопрос длительности путешествия становится важным. Чтобы достичь Венеры с наименьшей затратой горючего, необходимо около 150 суток, а для достижения Марса — около 260 суток. Разумеется, когда будут использованы более эффективные средства тяги, чем те, которые применяются в космических ракетах наших дней, и необходимость придерживаться маршрута с наименьшей затратой энергии отпадет, время путешествия на планеты можно будет значительно сократить. В принципе, жителю Земли будет возможно значительную часть своего месячного отпуска проводить на одной из соседних планет.

Совершенно иначе выглядит проблема полетов к другим звездам и другим галактикам. Здесь расстояния столь огромны, что фактор времени приобретает решающее значение.

Скорость космической ракеты на различных участках пути ограничивается предельным ускорением, которое способны длительное время переносить пассажиры. Кро-

ме того, скорость ракеты не может достичь скорости света

Если ракета будет двигаться с постоянным ускорением 10 м/с^2 , то пассажиры будут чувствовать себя превосходно. Состояния невесомости не будет, люди будут стоять на дне кабины ракеты точно так же, как они это делали в различных помещениях при обычной жизни на Земле, и будут испытывать совершенно те же физические ощущения, в том числе и ощущение того же веса отдельных частей своего тела и веса других предметов. Это объясняется тем, что ускорение силы тяжести на Земле также равно 10 м/с^2 (точнее, $9,81 \text{ м/с}^2$).

Но для уменьшения длительности полета нужна возможно большая скорость и, следовательно, возможно большее ускорение. По-видимому, здоровые люди могут длительное время удовлетворительно переносить постоянное ускорение в 20 м/с^2 . При таком ускорении ракеты вес пассажира, измеренный в кабине при помощи пружинных весов, был бы вдвое больше того, который он имел на Земле. Иначе говоря, пассажир чувствовал бы себя так же, как и на поверхности такой планеты, на которой ускорение силы тяжести и, значит сила тяжести, вдвое больше, чем на Земле. Дополнительная нагрузка к обычному весу будет при этом равномерно распределяться по всему организму человека, ее будет значительно легче переносить, чем груз, равный весу человека, взваленный на его плечи. Итак, будем исходить из возможного постоянного ускорения 20 м/с^2 .

При таком ускорении на огромных расстояниях скорость может достичь очень больших величин. А при больших скоростях классические законы механики, законы Ньютона, становятся неверными. Необходимо использовать законы, даваемые теорией относительности Эйнштейна, которые верны для любых скоростей, и малых и больших.

Для выполнения расчетов нам удобнее принять, что во все время движения постоянным остается отношение силы тяги ракеты к ее массе и это отношение равно

$$b = 20 \text{ м/с}^2.$$

Если бы при космических полетах к звездам и галактикам действовала классическая механика, то во все время движения ускорение a было бы постоянным и было бы

справедливо равенство

$$a = b. \quad (60)$$

Однако классическая механика неверна, теория относительности дает следующую форму для мгновенного ускорения:

$$a = b \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (61)$$

где v — скорость космической ракеты в данный момент, а c — скорость света. При очень малых значениях скорости v в сравнении со скоростью света формулы (60) и (61) практически дают одно и то же, но когда v/c не очень мало, формула (60) уже неверна.

Если бы движение происходило по законам классической механики, ускорение было бы постоянным и равным b . Тогда скорость v и пройденный путь S через время t после начала движения определялись бы известными из школьного курса физики формулами

$$v = b \cdot t, \quad (62)$$

$$S = \frac{bt^2}{2}. \quad (63)$$

Но, как мы видим, согласно формуле (58) по мере роста скорости ускорение будет уменьшаться. Вследствие этого формулы для скорости и пройденного пути в момент t , даваемые релятивистской механикой, т. е. механикой, основанной на теории относительности, другие и имеют следующий вид:

$$v = \frac{b \cdot t}{\sqrt{1 + \frac{b^2 t^2}{c^2}}}, \quad (64)$$

$$S = \frac{c^2}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{b^2 t^2}{c^2}} - 1 \right). \quad (65)$$

В классической механике предполагалось, что скорость тела может становиться сколь угодно большой. Это следует и из формулы (62), в которой по мере увеличения времени t может неограниченно возрастать и скорость v . Одной из важнейших основ релятивистской механики является закон невозможности в природе скоро-

сти, большей скорости света. Если в формуле (64) неограниченно увеличивать время t , то скорость v не станет расти неограниченно: она будет приближаться к скорости света, но никогда не превзойдет ее.

Самым поразительным выводом теории относительности является утверждение, что ход времени в двух движущихся одна относительно другой системах различен. Именно, если в начальный момент, когда космическая ракета покоилась на поверхности Земли, ход времени для ее пассажиров и ход времени для жителей Земли был одинаков, то после того как ракета станет двигаться, ход времени в ней замедлится. Малому промежутку времени $t_2 - t_1$ на Земле будет соответствовать малый промежуток времени в ракете $\tau_2 - \tau_1$, равный

$$\tau_2 - \tau_1 = (t_2 - t_1) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (86)$$

Формула (63) ведет к удивительным выводам. Если космонавты, покинув Землю, будут совершать полеты на больших скоростях, а затем возвратятся на Землю, то окажется, что от разлуки и до встречи времени у них прошло существенно меньше, чем у жителей Земли. Один из близнецов, путешествовавший в космосе, после возвращения окажется моложе близнеца, оставшегося на Земле. Более того, отец, оставивший на Земле малолетнего сына и совершивший космическое путешествие на больших скоростях, может после возвращения на Землю, оставаясь сам еще сравнительно молодым человеком, застать сына дряхлым стариком.

В 1895 г. Г. Уэллс написал роман «Машина времени». Из всех фантастических романов писателя этот роман казался самым фантастическим. Однако, как мы видим, путешествие во времени все-таки оказывается возможным. Машиной времени должна служить космическая ракета, развивающая большие скорости в пространстве. Но путешествовать во времени можно только в направлении будущего. Путешественник во времени Уэллса мог достичь страны будущего, где жили «элои» и «морлоки», но он не смог бы после этого возвратиться назад, как и не смог бы посетить страну прошлого.

Если движение происходит с постоянным, как мы приняли, отношением b силы тяги ракеты к ее массе, то из соотношения (86) можно получить связь между временем t , прошедшим на Земле, и временем τ , прошедшим

$$\tau = \frac{c}{b} \operatorname{Arsh} \frac{bt}{c}, \quad (67)$$

где Arsh есть особая функция, обратная так называемому гиперболическому синусу. Таблицы этой функции приводятся во многих математических справочниках. Каким бы ни было t , по формуле (67) τ получается всегда меньше t , причем чем больше t , тем существеннее различие между τ и t . Этот эффект иногда называют релятивистским расширением времени.

Различие хода времени в движущихся одна относительно другой системах не только предсказано теорией относительности, но и подтверждено в наши дни экспериментами. Например, доказано, что у мюонов (так называются быстро распадающиеся элементарные частицы с массой, равной 207 массам электрона, и единичным положительным или отрицательным зарядом), движущихся медленно, среднее время, протекающее до распада, равно $2,22 \cdot 10^{-6}$ с, а у мюонов космических лучей, движущихся с очень большой скоростью, время распада больше, в точном соответствии с формулой (67).

В табл. 28 для различных расстояний вычислено время, необходимое для прохождения их ракетой, у которой отношение силы тяги к массе все время постоянно и равно 20 м/с^2 . Во втором столбце приведено время, которое давала бы классическая механика по формуле (63). На самом деле движение ракеты не будет происходить по законам классической механики, так как достигаемые скорости очень большие. По формуле (62) они к тому же получаются во много раз больше скорости света, и мы приводим этот столбец только для того, чтобы показать, насколько ошибочны результаты классической механики в подобных случаях. В третьем столбце вычислено время, которое пройдет на Земле до момента достижения ракетой указанного расстояния. При $b = 20 \text{ м/с}^2$ ракета уже на расстоянии $1/2$ не разовьет скорость, очень близкую к скорости света, и потому на расстояниях во много парсек время, требуемое для полета ракеты, практически равно времени нужному для прохождения света, следовательно, начиная с пятой строки данные в третьем столбце численно равны количеству световых лет в указанном расстоянии.

Но иной промежуток времени будет проходить у пассажиров ракеты. Особенно разительно различие для боль-

ших расстояний. Так как на больших расстояниях ракета успеет развить скорость, очень близкую к скорости света, релятивистское расширение времени будет особенно велико.

Таблица 28. Время, необходимое для достижения заданного расстояния при постоянном отношении силы тяги ракеты к ее массе, равному 20 м/с^2

Пройденное расстояние, пс	Классическая механика	Релятивистская механика	
	протекающее время в годах, одинаковое и у космонавтов и на Земле	время, протекающее на Земле, в годах	время, протекающее у космонавтов, в годах
0,01	0,175	0,177	0,174
0,1	0,555	0,638	0,521
1	1,75	3,70	1,29
10	5,55	$3,29 \cdot 10$	2,38
10^2	17,5	$3,26 \cdot 10^2$	3,43
10^3	55,5	$3,26 \cdot 10^3$	4,52
10^4	175	$3,26 \cdot 10^4$	5,61
10^5	555	$3,26 \cdot 10^5$	6,70
10^6	1750	$3,26 \cdot 10^6$	7,82
10^7	5550	$3,26 \cdot 10^7$	8,89
10^8	17500	$3,26 \cdot 10^8$	10,0
10^9	55500	$3,26 \cdot 10^9$	11,1

Пользуясь данными табл. 28, представим себе путешествие к ближайшей нашему Солнцу звезде — α Центавра. На самом деле это тройная звезда. Главный компонент — звезда спектрального класса G4 с абсолютной величиной $+4^m,7$ — двойник нашего Солнца: почти те же спектр, цвет, светимость, масса. Второй компонент имеет спектральный класс K1 (оранжевая звезда), а абсолютную звездную величину $6^m,1$, светимость ее вдвое меньше, чем у Солнца. Третий компонент носит название Проксима, т. е. «ближайшая» Центавра. Он чуть ближе к нам, чем два других компонента этой тройной системы, и из наблюдаемых пока звезд является самым близким соседом Солнца. Светимость его очень мала: в 10 000 раз меньше, чем у Солнца ($M = 15^m,7$). Спектральный класс — M, значит, это красная звездочка, красный карлик.

Эта тройная система, состоящая из желтой, оранжевой и красной звезд, находится на расстоянии 1,32 пс. Во время путешествия к ней нужно сначала полпути, т. е. 0,66 пс, двигаться с ускорением. На это расстояние ракета потратит, как можно подсчитать при помощи формулы (65), 2,58 земных года, а при помощи формулы (67) мы узнаем, что в ракете протечет 1,13 года. Затем нужно будет, используя ту же силу тяги ракеты, двигаться с замедлением. Тогда к моменту достижения тройной звезды α Центавра ракета остановится.

Характер движения на второй половине пути до α Центавра будет как бы симметричным отражением движения на его первой половине. В любых двух точках, одинаково удаленных от середины пути, скорость окажется одинаковой. Поэтому и время, затраченное на вторую половину пути, будет как на Земле, так и в ракете, то же самое, что и для первой половины пути.

После этого ракета двинется обратно к Земле, снова сначала ускоряя движение, а затем, после прохождения половины пути, замедляя его. К моменту возвращения на Землю у пассажиров в ракете пройдет $1,13 \cdot 4 \approx 4,5$ года. Но они убедятся в том, что на Земле к моменту их прибытия прошло уже $2,58 \times 4 \approx 10$ лет.

Для посещения звезды, находящейся на расстоянии 20 пс, например α Треугольника, и возвращения обратно, ракете нужно пройти с попеременным ускорением и замедлением движения четыре отрезка, длиной 10 пс каждый. Согласно табл. 28 к моменту возвращения у пассажиров ракеты пройдет $2,33 \times 4 \approx 9$ лет. Но приземляясь, пассажиры ракеты не узнают страны, которую оставили: так велики будут перемены. Они не застанут никого из людей, кого знали — на Земле к моменту прибытия пройдет $32,9 \times 4 \approx 130$ лет и успеют смениться несколько поколений.

Полет к туманности Андромеды, NGC 224, находящейся на расстоянии 460 кпс, и возвращение будут протекать совсем не так, как это описано в интересной книге И. А. Ефремова «Туманность Андромеды». Путешествие займет у космонавтов около 30 лет, а возвратятся они фактически в другой мир, — на Землю, на которой от начала полета прошло около 30 млн. лет.

Огромная экономия времени, протекающего в ракете, в сравнении со временем, протекающим на Земле, достигается благодаря тому, что подавляющую часть

расстояния ракета движется со скоростью, очень близкой к скорости света. В таком случае, как показывает формула (66), промежуток времени $t_2 - t_1$ может быть очень мал в сравнении с промежутком времени $t_2 - t_1$.

Вообще табл. 28 показывает, что если обеспечить в течение всего времени постоянное отношение силы тяги ракеты к ее массе, равное 20 м/с^2 , то человеку доступно посещение любых областей обозреваемой нами Вселенной. Даже для достижения отдаленнейших скоплений галактик, расположенных на расстоянии 1000 Мпс, потребуется только 11 лет «ракетного» времени. Разумеется, вопрос о возвращении на Землю для таких космических странников окажется лишенным смысла. Разве лишь будет интересно узнать, что произошло с Землей и Солнечной системой. Разумнее будет искать годный для обитания мир на новых местах.

Все предыдущие расчеты выполнялись в предположении, что можно обеспечить в течение всего рассматриваемого времени постоянное отношение силы тяги ракеты к ее массе, равное 20 м/с^2 . Посмотрим теперь, можно ли этого практически добиться? Что покажет энергетический расчет? Легко убедиться, что применяемые в наше время двигатели космических ракет, сжигающие химическое топливо, совершенно непригодны для путешествий к звездам и галактикам.

Важнейшую роль играет скорость w , с которой образующиеся при сгорании газы вылетают из сопла ракеты. Чем больше эта скорость, тем большее ускорение в противоположном направлении будет иметь ракета. Скорость вылета газов тем больше, чем выше, температура сгорания. Температура же ограничивается способностью материала, из которого сделано сопло ракеты, противостоять высокой температуре, не плавиться. По-видимому, пределом в этом отношении являются 4000 К. При такой температуре сгорания от некоторых видов топлив можно получить скорость вылета w около 4 км/с.

В астронавтике известна формула

$$\frac{v}{w} = 2,3 \cdot \lg \frac{M_0}{M}, \quad (68)$$

связывающая M_0 — массу ракеты с топливом, M — массу ракеты после сгорания топлива, w — скорость вылета газов из сопла и v — скорость, которую приобретет ракета после того как сгорит топливо. Формула эта верна

только в рамках классической механики, когда и скорость вылетающих газов и скорость, достигаемая ракетой, очень малы в сравнении со скоростью света. Оба эти условия в данном расчете соблюдаются.

Мы видим, что величина достигаемой ракетой скорости тем больше, чем больше отношение массы ракеты к топливу к ее массе без топлива. Но как велико может быть это отношение? Предположим маловероятное, что удалось построить такую ракету, в которой 0,999999 массы составляет горючее, так что вес после израсходования горючего составит только одну миллионную веса ракеты на старте. Тогда правая часть равенства (68) будет равна 13,8 и, следовательно, если скорость вылета газов равна 4 км/с, ракета сможет достичь скорости 55,2 км/с. Пока не достигнуты очень большие скорости и можно пользоваться классической механикой, постоянное отношение силы тяги к массе ракеты 20 м/с^2 равно ускорению ракеты. Скорость 55,2 км/с будет достигнута через 2760 с, когда пройденный путь окажется равным 76 000 км. После этого расстояния топливо будет исчерпано, устройство ракеты перестанет действовать.

Таким образом, употребляемый в настоящее время в космонавтике способ сообщения ракете тяги при помощи сгорания химического топлива не может быть применен для полета к звездам и галактикам. Он годен только в пределах Солнечной системы.

Формула (68) показывает, что основная задача состоит в нахождении такого метода создания реактивной тяги, при котором вылетающие частицы имели бы гораздо большую скорость, чем у современных ракет. Нужно, чтобы эта скорость была сравнима со скоростью света или даже равна ей. Идея такой ракеты предложена давно. Роль вылетающих из ракеты в определенном направлении частиц должны играть частицы света — фотоны, а ракета будет двигаться в противоположном направлении. Источником излучения могут быть ядерные реакции и другие процессы, при которых происходит выделение электромагнитной энергии. Трудности связаны с необходимостью получить мощный поток фотонов при сравнительно небольшом весе устройства, чтобы употреблявшаяся в наших расчетах величина b была достаточной. Кроме того, нужно оградить устройство от разрушающего действия высоких температур. Пока такой источник энергии не создан. Но он, по-видимому, будет создан.

Поэтому оценим возможности фотонной ракеты в межзвездных и межгалактических полетах. Для фотонной ракеты с постоянным отношением b силы тяги к массе ракеты релятивистская механика дает следующие формулы: для проходимого расстояния

$$S = \frac{c^2}{2b} \left(\frac{m_0}{m} + \frac{m}{m_0} - 2 \right), \quad (69)$$

для достигнутой скорости

$$v = c \frac{m_0^2 - m^2}{m_0^2 + m^2}. \quad (70)$$

Чтобы совершить полет до ближайшего соседа, тройной звезды α Центавра, и вернуться обратно, можно предложить следующий план. Фотонная ракета движется с ускорением $b = 20 \text{ м/с}^2$, пока ее масса не станет равной половине первоначальной. При этом согласно формулам (69) и (70) будет пройдено расстояние 0,073 пс и развита скорость 180 000 км/с. После этого двигатель выключается и ракета движется по инерции. Когда в свободном движении будет пройдено около 1,17 пс и до цели останется 0,073 пс, двигатель снова включается, но уже на торможение. Ракета остановится около α Центавра, израсходовав еще половину той массы, которая у нее имела при начале торможения. В той же последовательности должен быть проделан обратный путь. Двигатель будет включаться всего четыре раза, каждый раз расходуя половину имеющейся массы, так что отношение m_0/m к моменту прибытия на Землю должно составить 16. Расчет показывает, что от момента вылета до момента возвращения в ракете протечет около 9,5 лет, а на Земле 16,5 лет.

Можно, конечно, совершать подобные полеты и к более далеким звездам, увеличивая участок пути с выключенным двигателем. Но тогда с увеличением расстояния будет существенно увеличиваться время, протекающее в ракете.

При полетах на расстояния свыше 5 пс чрезвычайно важно развивать, насколько возможно, высокие скорости, близкие к скорости света; тогда не только уменьшается требуемое для совершения полета время, протекающее на Земле, но, что особенно важно, в очень сильной степени уменьшается время, протекающее в ракете. А чтобы

развить, насколько возможно, высокие скорости, двигатель должен быть постоянно включенным.

Из формулы (69) следует, что, доведя отношение M_0/M до 200, можно с постоянно включенным, поставленным только на ускорение двигателем достичь звезды Капеллы, удаленной приблизительно на 14 пс.

Но если бы мы хотели, не включая двигателя, разогнавшись полпути и полпути замедляя полет, долететь до Капеллы, повернуть обратно и возвратиться на Землю, то пришлось бы затратить столько энергии, что отношение M_0/M потребовалось бы довести до 10^8 , что, конечно, невысказимо даже для техники будущего.

Точно так же весьма мало вероятна возможность простого достижения (без возвращения) человеком других галактик. При путешествии с постоянно включенным двигателем, чтобы покрыть расстояние до Магеллановых Облаков, нужно, чтобы M_0/M было равно $6 \cdot 10^5$.

Рассуждения и подсчеты, проведенные в этой главе, привели нас к следующим выводам: 1) соотношение двух факторов — длительности жизни и способности переносить ускорение, у человека таково, что он в принципе мог бы совершить путешествие до любых, даже самых отдаленных из наблюдаемых тел Вселенной; 2) технические, энергетические ограничения резко сужают возможности человека. Даже использование в будущем фотонной ракеты с очень большим отношением начальной и конечной масс позволит совершать полеты с возвращением только до нескольких самых близких звезд. Расстояния в несколько десятков парсек могут быть доступны при отношениях M_0/M порядка нескольких сотен. Однако это могут быть лишь полеты без возвращения; 3) достижение других галактик никогда не будет доступно человеку.

Насколько распространены во Вселенной условия, благоприятные для возникновения жизни!

Мы переходим к вопросу очень деликатному, не допускающему еще в наше время категорических суждений. Удивляют и те исследователи, которые совершенно уверены в том, что единственным пристанищем жизни во Вселенной является Земля, и те, которые категорически утверждают, что жизнь вне Земли существует и, более того, что она очень распространена, соседствует чуть ли не с каждой звездой.

Удивительна не крайность каждой из этих точек зрения. Наоборот, было бы неправильным заранее исключать любую из них. Удивляет допускаемая при этом категоричность суждения. Подобная категоричность могла быть уместна во времена античного мира или средневековья, когда при решении трудных вопросов науку заменяла натурфилософия или даже схоластика. Но в наше время, время научных доказательств, нужно признать, что уверенного ответа на вопрос о многочисленности обитаемых миров наука еще дать не смогла. Быть может, именно потому, что наука приближается к разрешению этого мучающего каждого любознательного человека вопроса, недопустимы попытки выносить категорические заключения на основании рассуждений, очень напоминающих времена господства натурфилософии.

Для разрешения вопроса о многочисленности обитаемых миров нужно либо изобрести наблюдательные средства, позволяющие произвести непосредственную проверку существования жизни в различных местах Вселенной, либо суметь сначала ответить на следующие вопросы: 1) Насколько часто встречаются во Вселенной условия, допускающие возникновение и развитие форм жизни, наблюдаемых на Земле? 2) Влечет ли за собой создание таких условий обязательное возникновение и развитие жизни? Сколько для этого требуется времени? 3) Могут ли существовать формы жизни, отличные от наблюдаемых на Земле, требующие иных условий, и насколько часто во Вселенной встречаются эти условия? Сколько требуется времени для возникновения таких форм жизни?

Для того, чтобы судить о существовании других миров, населенных разумными существами, нужно еще ответить на вопрос: 4) Всегда ли эволюция жизни приводит к появлению разумных существ и как велик период требуемого для этого времени?

Попытки ответить на первый вопрос делались неоднократно. Например, известный американский исследователь шаровых звездных скоплений и галактик Х. Шепли в книге «Звезды и люди» (переведенной на русский язык), произвел расчет следующим образом. Он постулировал, что: 1) жизнь может развиваться только на планетах, 2) устойчивые планетные системы могут иметь только одиночные (не двойные и не кратные) звезды, 3) только небольшая доля одиночных звезд эволюциони-

ровала так, что при этом образовались планетные системы, 4) жизнь может развиваться только на планетах с орбитами, близкими к круговым, чтобы на поверхности планет была более или менее постоянная температура, 5) жизнь может развиваться только на планете с надлежащим расстоянием от звезды, чтобы температура на поверхности планеты была допустимой, 6) для жизни необходима вода, а потому обитаемая планета должна быть достаточно массивной, чтобы долгое время удерживать свою атмосферу и гидросферу (океаны и моря), 7) атмосфера и гидросфера не должны содержать ядовитых для жизни веществ.

Рассматривая вероятность выполнения каждого из перечисленных условий, Шепли в конце концов приходит к следующей приблизительной оценке: у одной из миллиона звезд есть планета с условиями, благоприятными для развития жизни. Следовательно, в Галактике должно быть около ста тысяч обитаемых планет.

Основное затруднение при выполнении подобных расчетов состоит в том, что о вероятности соблюдения каждого из семи условий Шепли можно судить очень приблизительно, на основании весьма смутных соображений. Поэтому в зависимости от оптимизма или пессимизма выполняющего расчет автора можно тем же методом прийти и к выводу, что каждая вторая звезда имеет около себя условия, благоприятные для развития жизни, и к выводу, что в Галактике имеется только одна годная для обитания планета — наша Земля.

Наиболее важную роль в этом подсчете играет оценка доли звезд, около которых имеются планетные системы. Если бы мы точно знали, как образуются планеты, то не трудно было бы оценить, какая часть звезд образовала около себя планетную систему. Однако, несмотря на большое число космогонических гипотез, выдвинутых для объяснения происхождения планет, в настоящее время положение таково, что на одной из них твердо основываться нельзя. Между тем, если, например, брать за основу гипотезу Канта — Лапласа, то планетные системы должны быть весьма распространены, а если следовать гипотезе Джинса, то чрезвычайно редки.

Более перспективны попытки выяснить, имеются ли около звезд планеты, при помощи наблюдений. Речь не может идти о непосредственном наблюдении самих планет. Если бы, например, около ближайшей к нам звез-

ды α Центавра, которая, как мы уже указывали, физически весьма сходна с Солнцем, имелась бы планета, подобная Юпитеру, находящаяся на том же расстоянии от звезды, то легко подсчитать, что эта планета должна была бы наблюдаться как объект 23-й звездной величины. В настоящее время столь слабые объекты в состоянии фотографировать только 6-метровый и 5-метровый телескопы. Но и при помощи этих телескопов не удалось бы в данном случае сфотографировать планету, так как она могла бы наблюдаться только очень близко от α Центавра — яркой звезды, не далее 4" дуги от нее. Излучение звезды полностью забивало бы слабое излучение планеты.

Поэтому наблюдатели, ищущие планеты около других звезд, пошли иным путем. Они пытаются уловить небольшие смещения в положениях звезд, которые будут происходить, если около звезды обращается планета.

Неточны выражения «Юпитер обращается вокруг Солнца» и «один из компонентов двойной звезды обращается вокруг другого компонента». На самом деле Солнце и Юпитер обращаются вокруг их общего центра инерции. Но так как масса Солнца в 1048 раз больше массы Юпитера, общий центр инерции во столько же раз ближе к центру Солнца, чем к центру Юпитера, и во столько же раз радиус орбиты, по которой Солнце движется около общего центра инерции, меньше радиуса орбиты Юпитера. Подсчет показывает, что центр инерции системы Солнце — Юпитер находится на расстоянии 740 тыс. км от центра Солнца, т. е. располагается вне Солнца вблизи его поверхности (радиус Солнца 695 тыс. км). Таким образом, астроном с какой-нибудь звезды должен наблюдать каждые 5,9 лет, равные полупериоду обращения Юпитера, смещение Солнца на величину $740 \text{ тыс. км} \times 2 = 1,48 \text{ млн. км}$.

Если бы около звезды α Центавра была такая же планета, как Юпитер, и на том же удалении, то при наблюдении с Земли угловое смещение звезды, вызываемое движением планеты, составляло бы 0,008 секунды дуги. Мы видим, что это смещение ничтожно мало. Оно почти неуловимо при современных методах измерений положений звезд, так как в наиболее точных современных наблюдениях ошибки измерений сравнимы с этой величиной угла. Однако если измерение положений звезд производить многократно и в течение многих десятков

лет, то смещение, которое носит периодический характер, можно выявить с большей уверенностью. Кроме того, высокая точность измерений достигается, если наблюдаемая звезда двойная и около одного из компонентов подозревается невидимый спутник. Тогда движение невидимого спутника будет влиять на изменение расстояния между двумя компонентами двойной звезды, а измерять угловое расстояние между двумя сравнительно близкими друг к другу звездами можно значительно точнее, чем определять положение отдельной звезды. Поэтому в настоящее время невидимые спутники обычно «ищут» около компонентов близких к нам двойных звезд.

Несмотря на использование астрономами-наблюдателями всех имеющихся сейчас возможностей повышения точности наблюдений, данные о невидимых спутниках звезд остаются все еще недостаточно надежными. Это, и понятно: ведь α Центавра ближайшая звезда, у других звезд при аналогичных условиях смещение будет меньше, чем 0,008 секунды дуги. Кроме того, если около звезды действительно есть темный спутник — планета, то, скорее всего, он не один, должна быть планетная система. В таком случае смещение звезды будет носить менее регулярный характер, так как лишь главная его часть будет определяться наиболее массивной планетой (точнее, главное смещение будет происходить от планеты, у которой наибольшее произведение массы на радиус орбиты). Влияние других планет будет нарушать регулярность смещения. Например, в Солнечной системе наряду с влиянием Юпитера нужно учитывать влияние Сатурна, Нептуна и, в меньшей мере, других планет. В результате Солнце движется довольно сложным образом около центра инерции всей Солнечной системы, а чем менее регулярно движение, тем труднее его выявить.

Впервые существование невидимого спутника было заподозрено около яркого компонента двойной звезды σ Эридана шведским астрономом Хольмбергом в 1938 г. В наши дни у 11 звезд обнаружены смещения, позволяющие думать, что около них обращаются тела, которые пока наблюдать нельзя. Их список приводится в табл. 29.

Как показывает таблица, массы тел, существование которых заподозрено, значительно превосходят массы планет Солнечной системы. Ведь масса Юпитера равна только 0,00096 массы Солнца.

Возникает вопрос, что это за тела — массивные планеты или маленькие звезды. Имеют ли они холодную поверхность или это раскаленные газовые шары? В отношении четырех из них, темных спутников ζ Рака, μ Дракона, ζ Водолея и ζ Волопаса, массы которых равны 0,9, 0,6,

Т а б л и ц а 29. Данные о невидимых спутниках звезд

Название звезд	Расстояние до звезды, пс	Масса спутника в единицах солнечной массы	Радиус орбиты спутника, а. е.	Период обращения в годах
η Кассиопеи	5,5	0,01	10,4	24
σ Эридана	5,0	0,03	2,0	3,0
ζ Рака	25,6	0,90	5,3	17,5
BD+20°2465	4,8	0,03	17,7	26,5
Wolf 358	7,2	0,05	6,2	3,8
Laland 21185	2,5	0,01	9,0	8,0
ζ Волопаса	6,9	0,1	1,4	2,2
μ Дракона	23,3	0,6	2,8	3,2
70 Змееносца	5,3	0,01	8,0	17,0
61 Лебедя	3,4	0,008	4,25	4,9
ζ Водолея	24	0,29	6,4	25
Cin 2347	8,1	0,02		
BD+68°946	4,8	0,026	5,65	24,5

0,29 и 0,1 массы Солнца соответственно, ответ ясен. Конечно, это звезды, по-видимому, белые карлики, раз масса довольно значительна, а светимость настолько мала, что несмотря на сравнительную близость их не удается наблюдать. К этим трем телам, следовательно, термин «темный спутник» не очень подходит.

У всех остальных невидимых спутников массы меньше, чем у звезд с самой малой известной массой. Звезда с наименьшей известной массой — 0,08 массы Солнца — это слабый компонент двойной звезды Ross 614. Интересно, что сначала существование этого компонента было заподозрено по наблюдаемым смещениям яркого компонента и до 1955 г. слабый компонент фигурировал в числе предполагаемых темных спутников звезд. Но в 1955 г. спутник Ross 614 был обнаружен на снимке, сделанном при помощи 5-метрового телескопа, и перешел, таким образом, в разряд наблюдаемых компонентов двойных звезд. По-видимому, и невидимый спутник Wolf 358 с массой 0,05 солнечной массы является звездой.

Серьезные надежды на обнаружение планет подают звезды η Кассиопеи, 70 Змееносца и 61 Лебеда. Массы их предполагаемых спутников примерно в 10 раз меньше, чем у звезды с наименьшей известной массой и примерно в 10 раз больше, чем у планеты с известной наибольшей массой (Юпитера).

Особенный интерес представляет невидимый спутник 61 Лебеда, имеющий наименьшую массу — 0,008 массы Солнца. Его существование было заподозрено астрономом Пулковской обсерватории А. Н. Дейчем, который в 1951 г., исследовав снимки, сделанные в период 1895—1940 гг., определил характеристики орбиты невидимого спутника и оценил его массу. В 1956 г. американский астроном Стрэнд также пришел к выводу о существовании невидимого спутника 61 Лебеда. Наконец, в 1957 г. А. Н. Дейч, используя дополнительные наблюдения, сделанные в Пулковской обсерватории и в обсерватории Спрул, подтвердил и уточнил полученные результаты.

До сих пор мы упоминали только о двойных звездах, у которых заподозрено существование темных спутников малых масс. Но есть и одиночная звезда — возможный обладатель планетной системы. Это звезда Барнарда, одна из ближайших к нам (ее расстояние 1,8 пс) и самая быстро перемещающаяся на небе звезда (ее собственное движение составляет 10,27 секунд дуги в год). Это звезда-карлик, светимость ее в 3000 раз меньше светимости Солнца, а масса составляет 0,15 солнечной массы. Американский астроном ван де Камп собрал имеющиеся наблюдения этой звезды с 1916 по 1978 год, в том числе выполненные им самим, обработал около 4000 тысяч снимков, определяющих ее положение среди других звезд, и обнаружил наличие неправильностей в ее собственном движении, вызываемых невидимыми спутниками. Нужно отметить, что именно благодаря своему очень большому собственному движению, а также благодаря весьма малой массе звезда Барнарда является наиболее благоприятным объектом среди одиночных звезд для обнаружения неправильностей в движении и, следовательно, выявления невидимых спутников. Анализируя результаты обработки данных, ван де Камп пришел к выводу, что неправильности движения звезды Барнарда вызываются двумя спутниками. Радиусы их орбит соответственно 2,7 и 3,8 астрономических единиц, периоды обращений около звезды 11,7 и 26 лет, а массы 0,0058 и 0,0030 сол-

печной массы. Следовательно, согласно ван де Кампу, массы спутников звезды Барнарда меньше массы Юпитера и составляют соответственно 0,8 и 0,4 его массы. Это должны быть подлинные планеты.

Работа ван де Кампа еще нуждается в дополнительной проверке и подтверждениях, и мы не будем слишком решительно на нее опираться. Но в сочетании с другими исследованиями невидимых спутников звезд ее результаты кажутся правдоподобными. А особое значение этой работе придает то обстоятельство, что звезда Барнарда — одиночная.

Во всех остальных случаях невидимые спутники заподозрены у двойных звезд. Выше мы объяснили это преимуществом, имеющимся при наблюдении двойных звезд: расстояния между компонентами двойных звезд измеряются точнее, чем положения одиночных звезд. Необходимо теперь задать вопрос: где (до обнаружения темных спутников) следовало скорее ожидать существования планет, около одиночной звезды или около компонента двойной звезды? Ответ должен быть в пользу одиночных звезд, так как в системе, содержащей две звезды, планетные орбиты должны быть неустойчивы. На планету, обращающуюся вокруг одного компонента двойной звезды, сильное влияние оказывает другой компонент; в результате планета может быть выброшена из системы в межзвездное пространство. Только в том случае, если радиус ее орбиты мал, ее движение будет устойчивым. В двойных звездах не может быть планетных систем, подобных нашей Солнечной системе. Поэтому особое значение имеет поиск невидимых спутников у одиночных звезд. На первых порах нужно дать хотя бы оценку числа таких одиночных звезд, которые могут иметь планетную систему, подобную Солнечной системе.

Для выяснения этого вопроса американские астрономы Абт и Леви отобрали среди звезд, наблюдаемых на северном небе невооруженным глазом, все звезды, близкие по своим физическим характеристикам к Солнцу, т. е. имеющие спектральный класс, близкий к G2, а абсолютную величину, близкую к $+4^m,9$. Таких звезд оказалось 123, и все они удалены от Солнца не более, чем на 20 пс. Из этих 123 звезд 23 являются компонентами визуальных двойных систем с хорошо определенными орбитами. Еще 25 являются компонентами широких пар, т. е. тоже фактически двойных систем, однако таких, у

которых радиусы орбит и, следовательно, периоды обращений весьма велики, за время наблюдений они успели пройти слишком малый путь по орбите, чтобы ее элементы могли быть надежно определены.

Среди рассмотренных звезд 21 также уже были известны как компоненты спектроскопических двойных.

Для остальных звезд, которые не были известны как компоненты двойных систем, Абт и Леви провели специальное исследование. При помощи 2,1-метрового телескопа обсерватории Китт Пик они получили для каждой звезды по 20 спектров, снятые в различные моменты времени. Так как звезды, видимые невооруженным глазом, яркие, линии в их спектрах получаются отчетливыми, даже небольшие периодические смещения их можно обнаружить и измерить. Выяснилось, что еще 25 из числа рассмотренных звезд являются спектроскопическими двойными. Смещения линий в их спектрах незначительны и ранее замечены не были, по-видимому, потому, что либо плоскости их орбит составляют малые углы с картинной плоскостью, либо масса слабого компонента мала.

Всего оказалось 88 звезд рассмотренного типа, являющихся компонентами систем. Это число меньше, чем сумма упомянутых чисел $23 + 25 + 21 + 25$ потому, что в некоторых случаях звезда была компонентом спектроскопической двойной и одновременно спектроскопическая двойная являлась компонентом визуальной или широкой пары.

Из остающихся 45 звезд солнечного типа несколько могут быть все-таки компонентами спектроскопических двойных, нераспознанных вследствие совпадения их плоскости орбиты с картинной плоскостью или вследствие очень малой массы слабого компонента.

В итоге можно утверждать, что примерно треть всех звезд солнечного типа являются одиночными звездами. Скорее все они, или по крайней мере большинство из них, имеют планетные системы. Опыт науки показывает, что в неживой природе уникальные явления не встречаются. У большинства планет Солнечной системы имеются системы спутников. Предположение об уникальности колец Сатурна оказалось неверным. Космические аппараты «Вояджер» установили, что Юпитер также имеет систему колец. Кольца есть и у Урана. Не уникальна и вулканическая деятельность на Земле; в более широких масштабах она наблюдается на спутниках Юпитера.

Планетные системы около одиночных звезд в Галактике должны быть многочисленны. Не малым должно быть и число таких планет, условия на которых благоприятны для возникновения жизни. Означает ли это, что можно утверждать существование многочисленных обитаемых миров?

Всегда ли при наличии благоприятных условий возникает жизнь?

Этот вопрос также играет важнейшую роль. Действительно, влечет ли создание благоприятных условий как обязательное следствие возникновение и развитие жизни? Пока мы знаем лишь, что на Земле это произошло. Благоприятные условия вызвали развитие жизни за срок меньший, чем прошло от формирования Земли и Солнца до наших дней. Так как законы природы универсальны, то можно утверждать, что всюду, где создаются благоприятные условия, жизнь должна возникнуть. Но этот ответ не является полным, пока не определено, как скоро это происходит, как скоро появляется жизнь после того как созданы благоприятные условия.

Возникновение жизни означает появление на данной планете хотя бы одного тела — организма, который должен отвечать весьма сложным требованиям. Поэтому само тело должно быть достаточно сложным, представлять собой надлежащим образом составившуюся комбинацию больших молекул. В неживой природе такая первая, надлежащим образом составившаяся комбинация может образоваться, конечно, лишь случайно. Это нужно понимать так, что среди различного рода комбинаций из сложных молекул одни (их огромное множество) будут далеки от требований, предъявляемых к живому организму, другие (их чрезвычайно мало в сравнении с первыми) будут обладать лишь частью нужных требований, а этого тоже недостаточно. Но в какой-то момент составится комбинация сложных молекул, отвечающая всем требованиям, предъявляемым к живому организму. Это и будет момент возникновения жизни.

Чем сложнее та комбинация молекул, которая может дать начало жизни, тем меньше вероятность составления такой комбинации, тем больше в среднем пройдет времени, прежде чем составится такая комбинация, появится жизнь. При этом среднее время, которое должно пройти

до появления жизни, в очень сильной степени зависит от сложности комбинации молекул и от числа молекул.

Чтобы проиллюстрировать это, рассмотрим крайне упрощенный пример. Допустим, что каждая случайным образом входящая в комбинацию молекула в пяти случаях из шести входит в нее не так, как это нужно было бы для жизнеспособности тела, и лишь один раз из шести так, как это нужно для жизнеспособности. И тело жизнеспособно, если все составившие его молекулы вошли в него так, как нужно. Тогда, если для жизнеспособности нужен организм из n молекул, вероятность, что составившееся тело будет жизнеспособно, равна $1/6^n$.

Мы видим, что вероятность очень быстро уменьшается с увеличением нужного числа молекул n . Эта вероятность равна вероятности выпадения одних только шестерок в серии из n бросаний игральной кости. Вероятность выпадения трех шестерок подряд не очень мала — она равна $1/6^3 = 1/216$. Поэтому даже один человек, выполняющий в течение дня серии из трех бросаний игральной кости, имеет большие шансы получить хотя бы одну серию, состоящую из трех шестерок. Но при помощи того же выражения для вероятности легко подсчитать, что если все человечество (4 млрд. человек) возьмет в руки игральные кости и будет непрерывно выполнять серии из двадцати бросаний, то первая серия, состоящая из двадцати шестерок, должна в среднем ожидаться через год. Если человечество будет непрерывно выполнять серии из 33 бросаний игральной кости, то первая серия, состоящая из 33 шестерок, должна в среднем ожидаться через 6 млрд. лет, а при сериях в 35 бросаний первая серия из 35 шестерок в среднем появится через 200 млрд. лет. Конечно, такая серия может появиться и раньше, не исключена полностью даже возможность, что читатель, прочтя эту страницу и взяв игральную кость, в первой же серии из 35 бросаний получит только одни шестерки. Но вероятность такого события неопределимо мала.

Приведенный пример показывает, что время, необходимое для возникновения жизни, может очень сильно зависеть от того, насколько сложна комбинация молекул, нужная, чтобы выжить в данных условиях, т. е. это время может очень сильно зависеть от самих условий.

Нужно иметь в виду не только возможность возникновения жизни в принципе, но и возможность ее возникновения в космогонически приемлемый срок.

Каким же требованиям должна отвечать составившаяся комбинация сложных молекул, чтобы дать начало жизни?

Организм должен быть устойчивым достаточно длительное время. Он не должен распадаться ни самопроизвольно, ни под действием внешних воздействий. Для того чтобы не распадаться под действием внешних воздействий, он должен обладать способностью приспосабливаться к изменению условий. Это означает, что он должен обладать способностью получать информацию от внешней среды и надлежащим образом реагировать на эту информацию.

Конечно, чем меньше меняются внешние условия, тем менее сложен должен быть соответствующий механизм у первого живого организма, тем менее сложен должен быть сам организм, тем быстрее можно ожидать составления нужной случайной комбинации молекул. Поэтому на Земле жизнь имела наибольшую вероятность зародиться там, где условия (прежде всего температурные) были наиболее постоянными, где-то в тропическом поясе и в морях и океанах, а не на суше. Возможно, что на планетах, движущихся по заметно вытянутым орбитам или обращающихся около переменных звезд, где, следовательно, температурные условия сильно меняются, требования к механизму приспособляемости слишком велики, требуют слишком сложной комбинации молекул для того, чтобы можно было ожидать составления такой комбинации в космогонически приемлемые сроки.

Если составившаяся комбинация молекул будет изолирована от внешней среды, то в ней как и во всякой системе, в результате взаимодействий молекул установится стационарное (аналогично тому, как мы это рассматривали в звездных системах) состояние. Но стационарное состояние характеризуется выравниванием температур, плотностей, уничтожением структурности, той самой структурности, которая обеспечивала, например, способность получать информацию об изменении внешней среды и приспосабливаться к нему. Чтобы этого не было, для сохранения нужной структурности живой организм должен взаимодействовать со средой путем обмена веществ, поглощая из среды вещество и выделяя вещество из себя. Таким образом, комбинация из молекул, дающая начало жизни, должна иметь механизм, совершающий обмен веществ со средой.

Первый живой организм должен обладать очень тонким механизмом, вызывающим отделение от организма частей, каждая из которых обладает и способностью приспособляться к изменению условий и способностью к обмену веществ со средой, что приводит к росту этой части, и способностью, когда достигнут определенный размер, в свою очередь выделять из себя части, обладающие теми же свойствами. Без этого механизма размножения, который должен составиться уже в первом живом организме, жизнь не может развиваться.

Как мы видим, комбинация молекул, которая могла бы дать начало жизни, должна отвечать весьма сложным требованиям. Поэтому следует считать, что вероятность составления такой случайной комбинации, конечно, очень мала. Но насколько она мала, судить трудно. Ведь и сложных молекул на планетах может образовываться огромное множество, и, соединяясь между собой, они должны образовывать множество различных комбинаций. Нас интересует вероятность того, что появится хотя бы одна комбинация, результатом которой будет жизнеспособное тело.

Так как вероятность формирования крупного жизнеспособного организма гораздо меньше, чем мелкого организма, жизнь должна возникать в виде самых мелких из тех тел, которые могут вместить в себе необходимые для поддержания и продолжения жизни механизмы. Лишь затем, в ходе эволюции, могут появиться более крупные организмы.

У нас сейчас нет возможности хоть как-нибудь подсчитать вероятность составления из сложных молекул жизнеспособного организма и, следовательно, оценить среднее время, которое нужно для возникновения жизни в различных по степени благоприятности условиях. Может быть, в период возникновения жизни на Земле вероятность формирования из сложных молекул жизнеспособного организма была не очень мала и независимо друг от друга в разных местах планеты появлялась жизнь. Но могло быть и так, что эта вероятность была очень мала. Тогда, возможно, после того как из неорганической материи составилось одно живое тело, другие больше не составлялись. В этом случае все ныне живущие на Земле существа являются потомками одного первого живого организма.

Если вероятность формирования живого организма из сложных молекул не очень мала и при самых благо-

приятных условиях среднее время для появления хотя бы одного жизнеспособного организма составляет лишь миллионы лет или меньше этого, то явление жизни во Вселенной должно быть сравнительно распространенным. В этом случае все зависит от того, как часто встречаются благоприятные условия и как быстро уменьшается вероятность составления из молекул жизнеспособного организма, если условия менее благоприятны.

Но может быть и так, что при любых условиях, как бы они ни были благоприятны, вероятность составления из молекул жизнеспособного организма настолько мала, что среднее время, требуемое для возникновения жизни, огромно в сравнении с возрастом звезд и галактик; например, если оно так велико, как среднее время, необходимое человечеству, чтобы при бросании кости выбросить подряд 50 шестерок (приблизительно 10^{25} лет). Тогда нужно было бы считать, что Земля скорее всего единственное место во Вселенной, где имеется жизнь.

Такую возможность тоже необходимо рассматривать. Совершенно неправ был бы тот, кто заранее отбросил бы ее, считая ее ненаучной, нематериалистичной. Неверно было бы, например, само существование жизни на Земле рассматривать как доказательство того, что среднее время возникновения жизни в благоприятных условиях не может быть очень большим в сравнении с возрастом звезд и галактик. Среднее время может быть очень большим, но в каком-нибудь месте жизнь может возникнуть случайным образом, за промежуток времени гораздо меньший, чем среднее время. Правда, вероятность такого события невелика. Но мы уже в гл. VI говорили о том, что после того как событие случилось (жизнь на Земле есть), неправильно, рассмотрев его вероятность, на основании малого ее значения заключать, что предположения, сделанные для подсчета вероятности, неверны.

Конечно, существование жизни на Земле объективно увеличивает надежду на то, что при благоприятных условиях среднее время требуемое для возникновения жизни, не очень велико. Но не исключена все-таки возможность, что оно невообразимо огромно.

Важнейшее значение для разрешения вопроса имело бы обнаружение жизни хотя бы на одном, не считая Земли, теле Солнечной системы. Если бы это случилось, то можно было бы утверждать, что обитаемые миры во Вселенной многочисленны. Но космические полеты к дру-

тим планетам и Луне достоверно показали: единственным пристанищем жизни в Солнечной системе является Земля. Это, конечно, можно было предвидеть и раньше. Вероятность случайного образования живого организма в условиях очень высокой температуры нижних планет и очень низкой температуры верхних планет, а также лишенной атмосферы и литосферы Луны, настолько ничтожна, что немыслимо ожидать реализации такого события — появления жизни — за космогонически приемлемый срок.

Распространена ли во Вселенной разумная жизнь?

Постановка этого вопроса должна быть аналогична той, которая была применена в предыдущем параграфе. Если где-то во Вселенной возникла и стала развиваться жизнь, как много в среднем, в зависимости от условий, потребуется времени, чтобы появились разумные существа и было создано цивилизованное общество? Конечно, и здесь еще невозможно дать ответ. Попробуем хотя бы несколько разобраться в различных сторонах этого вопроса и в возможностях, которые открываются для того, чтобы в будущем на него ответить.

Тот факт, что на Земле образовалась разумная жизнь и возникла цивилизация, не может служить доказательством обязательности появления разумных существ в результате эволюции жизни. Как и в вопросе о неизбежности возникновения жизни, здесь главный пункт — оценка среднего времени, необходимого для появления разумных существ после того, как жизнь уже возникла. Если это среднее время мало в сравнении с возрастом звезд и, вероятно, имеющихся около них планетных систем, то можно считать, что миров, населенных разумными существами практически столько, сколько имеется миров с развившейся жизнью. Но если это среднее время велико в сравнении с космогоническими сроками, то лишь очень малая часть обитаемых миров населена и разумными существами.

Среднее время для появления разумных существ в результате эволюции жизни, конечно, должно зависеть прежде всего от физических условий на планете. В каждом отдельном месте разумные существа могут появиться намного раньше или намного позже, чем за среднее время. Но большие отклонения от среднего времени должны

встречаться редко. Пример Земли в этом отношении не может служить ориентиром, так как сам вопрос о множественности цивилизаций во Вселенной мог быть поставлен только в результате того, что на Земле появилась разумная жизнь.

И все-таки попробуем учесть опыт Земли. Наша планета сформировалась приблизительно 4—5 млрд. лет назад. Первые признаки существования живых организмов относятся к периоду Верхнего Архея, приблизительно 1,2—1,3 млрд. лет назад. Значит, для возникновения жизни потребовалось 3—4 млрд. лет. А разумное существо в результате эволюции жизни появилось в начале четвертичного периода Кайнозойской эры, лишь около миллиона лет назад. Следовательно, потребовалось свыше миллиарда лет, чтобы был пройден путь от первого живого организма до мыслящего существа. Этот период достаточно значителен даже при измерении космогоническими мерками.

Если проследить за эволюцией жизни на Земле, то можно наметить большое число эволюционных линий, разветвлявшихся и обрывавшихся, приводивших к расцвету или вымиранию какого-нибудь класса, отряда или семейства организмов. Эти эволюционные линии привели мир живых организмов в наши дни к огромному количеству различных видов. Но только одна линия привела к разумному существу — человеку. Невольно напрашивается вопрос — не сыграло ли роль при создании человека случайное, благоприятное стечение обстоятельств? Это могло быть особое стечение географических, климатических условий и обстоятельств взаимоотношений между различными видами животных, потребовавших от наших предков элементов труда и элементов социальной организованности, чтобы выжить, к чему они оказались готовы.

Можно также спросить, что было бы, если бы вдруг все населяющие Землю люди исчезли, а растительный мир и весь остальной животный мир сохранились? Сколько времени потребовала бы теперь природа для создания новых разумных существ?

Мы ставим эти вопросы не для того, чтобы на них сейчас ответить, а чтобы показать, что мнение, будто эволюция жизни должна неизбежно, в какой-то заранее отмеренный срок, приводить к появлению разумных существ, очень упрощенно и скорее всего ошибочно. Про-

блема эта гораздо сложнее. Она настолько сложна, что человечеству придется решать ее эмпирически, изучая окружающие нас миры в поисках жизни и разумных существ.

Идея предпринять практические шаги, чтобы узнать что-либо об инопланетных разумных обществах и дать им знать о существовании цивилизации на Земле, не нова. Еще в прошлом веке француз Шарль Крос в течение почти всей своей жизни предпринимал энергичные попытки убедить свое правительство в необходимости ассигновать средства для постройки гигантского зеркала, при помощи которого можно было бы передавать отраженные от Солнца сигналы предполагаемым обитателям Марса и Венеры. Знаменитый немецкий математик и астроном Карл Гаусс предлагал создать при помощи вырубки леса в Сибири гигантский прямоугольный треугольник, сторонами которого служили бы лесные полосы шириной в 10 миль. Внутреннюю область треугольника он предлагал для контраста сделать светлой, посеяв в ней пшеницу. Гаусс считал, что вооруженные телескопами марсиане смогут разглядеть такой треугольник и воспримут его как обращение к ним жителей Земли. Австрийский астроном фон Литтров предлагал вырыть в Сахаре широкие рвы в форме гигантских окружностей, квадратов и треугольников, залить их водой, а сверху керосином, и зажигать по ночам, чтобы дать знать марсианам о нашем существовании.

Поскольку в Солнечной системе обитаема только Земля, поиски внеземной жизни нужно производить на гораздо больших расстояниях, чем расстояния в Солнечной системе, нужно искать ее признаки на планетах около других звезд. В настоящее время единственная возможность такого поиска состоит в попытках уловить какие-нибудь сигналы, возможно, посылаемые в пространство.

Однако нужно иметь в виду, что понятие «разумные существа» еще не означает такие существа, которые осознали потребность посылать мощные сигналы, адресованные другим обитаемым мирам, и способные такие сигналы производить и направлять.

История человечества показывает, что после появления разумных существ закономерен процесс создания цивилизацией. Они возникали и развивались в разное время на разных материках нашей планеты. Число их было

велико. О некоторых процветавших некогда цивилизациях стало известно только в последнее время после проведенных археологических работ. У всего этого множества существовавших в прошлом цивилизаций есть одна общая черта. Они приходили в упадок или погибали под ударами внешних сил, не достигая стадии технической цивилизации. Единственная на нашей планете цивилизация, достигшая стадии технической, это цивилизация нашего времени.

Чем отличается техническая цивилизация от нетехнической? Автор этой книги считает, что цивилизация становится технической тогда, когда она овладела методами превращения одних видов энергии в другие. В древнейших цивилизациях Китая, Египта, Ассирии, Греции, Рима и многих других были весьма развиты искусства и науки, использовались механизмы простых и сложных конструкций. Но все эти механизмы — рычаги, блоки, полистпасты, катапульты, их различные сочетания, механизмы водяных мельниц и другие устройства переводили механическую энергию снова в механическую.

Цивилизация нашего времени перешла в стадию технической в 1769 г., когда Джеймс Уатт построил первую паровую машину, превращавшую тепловую энергию в механическую. Теперь человечество широко использует, производит взаимные превращения тепловой, механической, электрической, химической и внутриатомной энергий. Благодаря этому в огромной степени возросли производительные силы. Цивилизация стала глобальной, она распространилась на всю планету. Она стала способной осваивать космическое пространство. Вопрос об обитаемости других миров ее уже интересует практически.

Наиболее перспективным в наше время видом связи с возможными цивилизациями, развившимися на планетах около других звезд, является радио. Расчеты показывают, что две расположенные на планетах около звезд цивилизации, достигшие нашего уровня развития техники, в состоянии вступить в радиосвязь друг с другом на расстоянии до 50 пс. Они должны при этом использовать диапазон волн от 3 до 30 см, так как другие диапазоны либо не пропускаются понижованными слоями атмосфер планет, либо в них велик уровень помех, вызываемых излучениями звезды, вокруг которой обращается планета, атмосферой самой планеты, а также Галактикой и Метагалактикой.

В 1960 г. Дрейк и его сотрудники в американской Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин Банк (штат Западная Вирджиния) при помощи радиотелескопа с диаметром зеркала 27 м начали систематическое радиопрослушивание направлений на две звезды — ϵ Эридана и τ Кита. Программа этих наблюдений получила название ОЗМА. Прием производился на длине волны 21 см.

Эта волна, как мы указывали в гл. II, имеет исключительное значение в астрономии. Она является единственной яркой эмиссионной линией в радиодиапазоне, излучается нейтральным водородом и дает возможность исследовать распределение и движение этого самого обильного во Вселенной газа. Как впервые указали Коккони и Моррисон, условие посылки и приема сигнала именно в этой длине волны должно быть всеобщей догадкой радиоастрономов всех миров. Без такой догадки, без такого условия, связь налаживать будет гораздо труднее, принимающему придется совершать поиск по большому диапазону частот. А ведь для того, чтобы убедиться в том, что принимаемые сигналы искусственные, нужно совершать их длительный прием на нужной частоте.

Итак, надеюсь, что возможные собеседники из Вселенной не уступают нам в догадливости, Дрейк и его сотрудники вели тщательный прием на длине волны 21 см. Звезды ϵ Эридана и τ Кита были выбраны потому, что это самые близкие из звезд, удовлетворяющих следующим условиям:

1. Направление на звезды составляет значительный угол с плоскостью Галактики. Это важно потому, что направления, лежащие близко к плоскости Галактики, пронизывают большую толщу нейтрального водорода, который заполняет всю область около плоскости Галактики. Нейтральный водород изучает в длине волны 21 см и если на луче зрения много атомов водорода, то их изучение в этой длине волны забьет возможные искусственные радиосигналы. Положение осложняется тем, что из-за движений различных водородных масс к нам и от нас частота принимаемого излучения от этих масс вследствие эффекта Доплера не является строго одной и той же, принимаемая линия излучения очень сильно расширена и отстроится от нее, находясь поблизости длины волны 21 см, нельзя. Если же направление на звезду (на предполагаемую планету около звезды) составляет значитель-

ный угол с плоскостью Галактики, то луч зрения пронизывает небольшой слой водорода, приходящее от него излучение не очень интенсивное, и на его фоне можно надеяться различить искусственные сигналы.

2. Исследуемые звезды должны быть одиночными, так как условия на планете, находящейся в двойной или кратной системе, менее благоприятны для жизни из-за нерегулярности движения планеты в такой системе.

3. Звезды должны быть спектрального класса F или более позднего, так как имеются основания считать, что у звезд ранних спектральных классов менее вероятны планетные системы. Этому последнему условию, впрочем, удовлетворяет большинство ближайших звезд.

К сожалению длительное и тщательное прослушивание ε Эрида и τ Кита не дало положительных результатов. Никаких сигналов, которые можно бы признать искусственными, получить не удалось.

Это неудивительно. Жизнь, а тем более разумная жизнь, конечно, явление не столь частое, чтобы была серьезная надежда обнаружить ее на первых двух подвергшихся наблюдению звездах. Негативный результат программы ОЗМА показал ошибочность чрезмерного оптимизма в вопросе о множественности обитаемых миров. Корни этого оптимизма понятны. Они вызваны огромными успехами в завоевании космоса. Но нужно понимать, что перенесение законного, теперь вполне обоснованного оптимизма в отношении возможностей дальнейших завоеваний космоса на вопрос о существовании иных обитаемых миров является чисто эмоциональным. Логического элемента в нем нет. Эмоциональная же сторона оказалась настолько сильной, что на страницах научно-популярных журналов не так давно можно было прочесть о «наблюдательных доказательствах» существования разумной жизни чуть ли не на всех планетах Солнечной системы, вплоть до регистрации взрывов атомных бомб на Венере и Юпитере. Впрочем, и в отношении завоеваний космоса оптимизм перешел допустимые пределы. Примером может служить пресловутая сфера Дайсона — предложение построить вокруг Солнца из вещества Юпитера гигантскую полую сферу с радиусом, примерно равным радиусу земной орбиты. Цель сферы — послужить местом жизни для чрезмерно возросшего населения Земли. Очевидна энергетическая неосуществимость этого проекта. Кроме того, как показал недавно при помощи

простых расчетов В. Д. Давыдов, чтобы сфера Дайсона не разрушилась, ее вещество должно быть способным выдержать нагрузку в 20 млн. тонн на квадратный сантиметр, что немыслимо.

Комментируя негативный результат программы ОЗМА, астрономы производят переоценку понятия благоприятных условий для развития жизни и цивилизаций. Так, американский астроном Мотц приходит к выводу, что жизнь можно ожидать лишь близ звезд, массы которых и, следовательно, светимости близки к массе и светимости Солнца. В частности, на возможных планетных системах около подвергшихся прослушиванию звезд ϵ Эридана и τ Кита, не может быть разумной жизни по той причине, что у этих звезд светимость меньше Солнца — у τ Кита в два раза, у ϵ Эридана в 2,5 раза. Поэтому планета, на которой температура близка к температуре поверхности Земли, должна быть у этих звезд в 1,5—1,6 раза ближе к звездам, чем Земля к Солнцу, т. е. несколько ближе, чем Венера к Солнцу. Но, как известно, благодаря близости к Солнцу Меркурий и Венера вращаются вокруг оси очень медленно. Их синодические (т. е. по отношению к Солнцу) периоды вращения равны у Меркурия 176, а у Венеры 117 земным суткам. А это вызывает очень большую разность температур на двух сторонах планеты — одно полушарие чрезвычайно накалино, другое очень охлаждено, и оба поэтому неблагоприятны для развития жизни. Получается, что только у звезд со светимостью не меньшей, чем у Солнца, планета может и достаточно нагреваться излучением Солнца и, кроме того, благодаря вращению нагреваться сравнительно равномерно, что благоприятствует развитию жизни. Мотц считает, что в сфере с радиусом 4 пс, доступной 27-метровому телескопу обсерватории Грин Бэнк, нет ни одной звезды, близ которой можно было бы ожидать наличие жизни. Однако, по его мнению, в сфере с радиусом 200 пс можно ожидать несколько сотен тысяч звезд с благоприятными условиями для развития жизни вблизи них. Поэтому Мотц считает, что при помощи более крупного радиотелескопа, который в настоящее время строится в Грин Бэнк, можно надеяться добиться успеха.

Как мы уже говорили, делаемые в настоящее время оценки вероятного числа цивилизаций не основываются на сколько-нибудь надежной базе, в значительной мере произвольны, и автор не считает возможным склоняться

к какой-нибудь из них. Но в любом случае справедливо утверждение, что число ожидаемых цивилизаций пропорционально числу охватываемых сферой звезд, если, разумеется, звездный состав при этом остается примерно одинаковым. Поэтому попытки уловить искусственные радиосигналы из других миров необходимо, конечно, продолжать.

Правда, нужно оговориться, что увеличивая вдвое, например, число прослушиваемых звезд, мы не будем вдвое же увеличивать число миров, от которых можно надеяться получить сигналы. Это объясняется тем, что сигналы можно зарегистрировать лишь в том случае, если радиоволны с далекой планеты посылаются направленно и именно в нашу сторону. Лишь в этом случае сигнал может иметь достаточную интенсивность, чтобы быть принятым радиотелескопом. Значит, необходимо не только, чтобы мы решили принимать радиоволны с данной звезды, но и чтобы существа, посылающие сигнал, считали, что его нужно посылать именно в сторону Солнца. Чем дальше звезда, тем меньше вероятность того, что обитатели ее планеты решат именно Солнце сделать адресатом своих радиосигналов.

Будем считать, что вероятность посылки сигналов в направлении Солнца от данной звезды обратно пропорциональна квадрату расстояния от Солнца до звезды, а звездную плотность в охватываемых сферах будем считать постоянной. По мере включения в прослушивание все более далеких звезд число цивилизаций, с которыми можно надеяться связаться, будет расти. Однако при сделанных нами предположениях, которые можно считать допустимыми, это число будет расти не пропорционально числу прослушиваемых звезд, а лишь пропорционально кубическому корню из этого числа. Это очень печальное обстоятельство, резко уменьшающее надежды на успех. Тем не менее, несомненно, работу по радиопрослушиванию звезд необходимо организовать с возможно большим размахом, так как в случае удачи мы окажемся перед лицом величайшего открытия. В самом деле, подумайте, читатель, какое это будет замечательное событие, если мы уже определенно узнаем, что вот из этой точки неба, с планеты, находящейся около вот этой звезды, нам сигнализируют какие-то разумные существа, не созданные воображением ученых, оценивающих лишь возможности возникновения разумной жизни, а существующие со всей

определенностью и уже вмешивающиеся в нашу жизнь. Без преувеличения можно сказать, что прием искусственных сигналов из другого мира явится важнейшим событием за все время познания человеком мира.

Это событие может иметь и огромное практическое значение. Существа, сигналы которых будут приняты, безусловно в техническом отношении окажутся намного впереди нас. Ведь период освоения земной цивилизацией радиосвязи — около полувека, и он ничтожно мал в сравнении с космогоническими сроками, с периодом эволюции жизни. Поэтому невероятно, чтобы существа, сигналы которых будут приняты, были точно на той же стадии технического прогресса, что и мы. Позади они быть не могут, так как уже плют в нашу сторону радиосигналы, а вот впереди могут оказаться сколь угодно далеко.

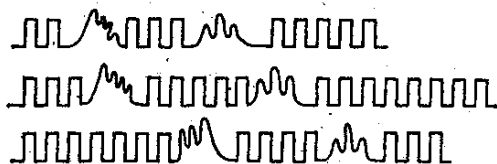


Рис. 122. Код, обучающий знакам сложения, вычитания, равенства.

Поэтому, как заметил американский астроном Су Шу-хуань, первая беседа будет, по-видимому, беседой гениев со слабоумными. Но мы можем утешиться тем, что это будет не беседа. Беседовать на расстоянии, например, 10 пс трудно, так как между моментами, когда задан вопрос и поступит ответ, должно будет пройти около 70 лет, радиосигнал не сможет раньше обернуться. Будет происходить не беседа, а слушание лекций, лекций технически более развитых существ. Сначала нужно будет обучиться пониманию лекций. Читающие лекции должны будут многократно проводить обучение их условным логическим сигналам. Как это может быть сделано, показал недавно Ф. Моррисон, предложивший примеры начальных кодов обучения. Коды могут строиться, очевидно, только при помощи импульсов различной мощности, которые должны записываться принимающим устройством на ленту. Вот, например, три первые кода, как они могут выглядеть на ленте (рис. 122).

Приняв такую запись импульсов, нетрудно догадаться, что речь идет о равенствах $2 + 3 = 5$, $3 + 5 = 8$ и

$7 - 4 = 3$. Следовательно, условное обозначение импульсами математических знаков «+», «-», «=», приведенное на рисунке, станет ясным. Далее можно передать такие сигналы, как на рис. 123. Принимающий, уже накопивший небольшой опыт, поймет, что здесь записано $6 : 3 = 2$ и $1/2 = 1 : 2$, т. е. усвоит обозначение знаков деления и обратной величины.

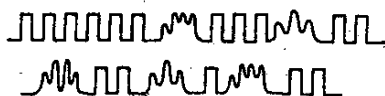


Рис. 123. Код, обучающий знакам деления и обратной величины.

Теперь уже можно передать следующий код (рис. 124). В этом коде все знаки, кроме первого, уже известны. Известная часть кода означает следующее:

$$\pi : 4 = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \frac{1}{9} - \frac{1}{11}.$$

В правой части равенства стоят первые шесть членов хорошо известного в математике знакпеременного гармонического ряда. Сумма такого бесконечного ряда равна $\pi : 4$, где π есть известное число — отношение длины окружности к диаметру. Таким образом, первый в коде на рис. 124, бывший еще неизвестным знак означает число π .

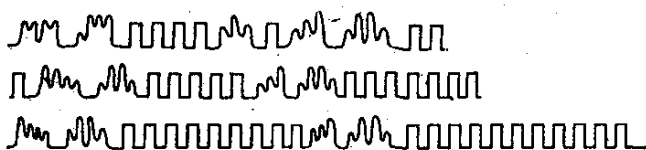


Рис. 124. Код, обучающий знаку π — отношению длины окружности к ее диаметру.

Так, постепенно, можно обучить всем математическим знакам. После этого, используя математическое написание известных законов физики, можно перейти к обучению знакам физических понятий и величин.

Обучение должно быть тщательно разработано, и тогда можно добиться возможности передачи импульсами любой столь угодно сложной мысли.

Может быть, лекторы далекой планеты изложат нам решение важнейших, до сих пор недоступных нам проблем, например, техническое решение проблемы использования в мирных целях энергии, выделяемой водородом при превращении его в гелий — секрет управляемого термоядерного синтеза.

Выскажем еще одну надежду, в высшей степени фантастическую, но нельзя сказать, чтобы абсолютно невозможную. Допустим, что около звезды, находящейся на расстоянии 26,1 пс, имеется очень развитая цивилизация, располагающая приборами, способными подробно рассматривать все происходящее на Земле и посылать в пространство телевизионные изображения всего рассматриваемого. Допустим, что разумные существа этой развитой цивилизации, убедившись в прогрессе нашей цивилизации и предвидя освоение нами средств радио, посылают изображения всего наблюдаемого на Земле снова в сторону Земли. Тогда мы могли бы на экране телевизора видеть подлинные события, происходившие 169 лет назад. Электромагнитные волны расстояние в 26,1 пс в оба конца проходят за 169 лет. Можно было бы стать очевидцем всех событий нашествия Наполеона на Россию. Все споры историков о великих событиях тех лет были бы разрешены. А цивилизации, находящиеся на расстояниях 400—800 пс, могли бы сделать нас свидетелями эпохи египетских фараонов.

Систематическое прослушивание большого числа звезд нельзя, конечно, провести за сравнительно короткий срок средствами одной обсерватории. Эта задача не под силу даже одному государству. Необходимо организовать подробно разработанную кооперативную программу прослушивания всех отвечающих основным требованиям звезд сначала на расстояниях до 20 пс, а затем и более далеких, всеми радиообсерваториями земного шара.

У астрономов уже имеется большой опыт выполнения кооперативных работ. Первая из них — работа большого масштаба — была предпринята после предложенного в 1906 г. голландским астрономом Каптейном грандиозного плана исследования положений и физических характеристик звезд, включая слабые звезды, в 252 избранных площадках, распределенных по всему небу. Нужно было в этих площадках определить положения звезд, их видимые величины, цвета, спектры, собственные движения, лучевые скорости и другие характеристики. Звезды излуча-

ются только в избранных площадках, а не по всему небу, чтобы сократить объем работы. Так как площадки распределены по всему небу, то полученный материал должен характеризовать звезды всего неба. Однако даже после такого сокращения объем работы был очень велик и Международный астрономический союз распределил ее по соглашению между различными обсерваториями земного шара.

За 70 лет уже выполнена огромная и очень важная работа. В ней активно участвуют советские обсерватории. Пулковская обсерватория уже опубликовала каталог собственных движений звезд в избранных площадках, Абастуманская обсерватория издала каталог показателей цвета звезд. Опубликовали свои труды по определению видимых величин звезд в избранных площадках американская обсерватория Маунт Вилсон, по определению спектров звезд немецкая обсерватория в Бергедорфе и др. Совокупность всех этих данных о большом числе звезд позволяет успешно изучать строение Галактики и свойства ее звездного состава.

Другая кооперативная работа, организованная в последние годы и успешно проведенная совместно астрономическими и геофизическими обсерваториями всего мира — это известные «Международный геофизический год» и «Международный год спокойного Солнца».

Необходимо, чтобы кооперативная работа различных стран и обсерваторий мира начала разворачиваться и по поиску внеземных цивилизаций. Первые шаги уже сделаны. В Советском Союзе уже проведено «прослушивание» звезд τ Кита, ϵ Эридана, 47 и 380 Большой Медведицы, β Гончих Псов, ρ Волос Вероники, η Геркулеса, λ Большой Медведицы, ϕ Возничего, ι Персея, η Волопаса. «Прослушивалась» также туманность Андромеды.

В Соединенных Штатах исследованы: звезда Барнарда, Вольф 359, Лейтен 726-8, Лаланд 21185, Росс 248, ϵ Эридана, 61 Лебеда, τ Кита, 70 Змееносца. Кроме того, начато «прослушивание» звезд из списка, содержащего еще 200 названий.

Пока сигналов, которые можно было бы приписать разумным существам на других мирах, зарегистрировать не удалось. Тем не менее поиски продолжаются. Есть мнение, что вероятность получить положительный результат станет больше $1/2$ только после того как будут внимательно прослушаны 10 тысяч звезд.

В сентябре 1971 г. в Бюраканской астрофизической Обсерватории состоялась международная конференция по проблеме «Связь с внесемными цивилизациями», в которой приняли участие специалисты СССР, США, Англии, Венгрии, Канады, Чехословакии. На конференции были подробно обсуждены все стороны проблемы внесемных цивилизаций и была принята резолюция, которая с небольшими сокращениями ниже приводится.

1. Выдающиеся открытия последних лет в области астрономии, биологии, кибернетики и радиофизики превратили некоторую часть проблем внесемных цивилизаций и их обнаружения из чисто умозрительных в экспериментальные и наблюдательные. Впервые в истории человечества появились возможности вести глубокие и подробные экспериментальные исследования по этой важной фундаментальной проблеме.

2. Эта проблема может оказаться исключительно важной для дальнейшего развития всего человечества. Если когда-нибудь внесемные цивилизации будут открыты, это будет иметь огромное влияние на научный и технический потенциал человечества, а также может оказать положительное влияние на будущее человечества. Успешное установление связи с внесемной цивилизацией будет иметь такое практическое и философское значение для всего человечества, что попытки установления такой связи заслуживают существенных усилий. Последствия открытия могут способствовать значительному расширению человеческого познания.

3. Технологический и научный потенциал нашей планеты представляется достаточным для начала конкретных исследований в направлении поисков внесемных цивилизаций. Эти исследования в настоящее время могут эффективно проводиться силами научных организаций отдельных стран. Однако уже на данном этапе представляется целесообразным также совместное обсуждение и координация конкретных программ работ и обмен научной информацией.

4. На конференции были детально обсуждены различные проекты поисков внесемных цивилизаций. Реализация наиболее сложных из них потребует значительного времени и усилий, а также затраты средств, соизмеримых с затратами на космические и ядерные исследования. Однако полезные поиски могут быть начаты в более скромном масштабе.

Татеев Артемьевич Азехян

ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, МЕТАГАЛАКТИКА

Редактор *Г. С. Куликов*

Техн. редактор *Л. В. Лихачева*

Корректор *М. Л. Медведская*

ИБ № 11925

Сдано в набор 10.02.81. - Подписано к печати 20.07.81. Т-20100. Формат $84 \times 108^{1/32}$. Бумага тип. № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Услови. печ. л. 21,84. Уч.-изд. л. 22,39. Тираж 100 000 экз. Заказ № 476. Цена 80 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция

Физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

4-я типография изд-ва «Наука»,
Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

80 коп.