

GALAXIES: Structure and Evolution

R. J. TAYLER

University of Sussex

Р. ДЖ. ТЕЙЛЕР

ГАЛАКТИКИ

Строение и эволюция

Перевод с английского
канд. физ.-мат. наук

А. В. ЗАСОВА

под редакцией

д-ра физ.-мат. наук

А. Г. ДОРОШКЕВИЧА

Wykeham Publications (London) LTD
(A member of the Taylor & Francis Group)
London and Basingstoke 1978

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1981

Тейлер Р. Дж.

T 30 Галактики: Строение и эволюция/Пер. с англ. А. В. Засова; под редакцией и с предисл. А. Г. Дорошкевича. — М.: Мир, 1981. 224 с. с ил.

Книга известного английского астрофизика увлекательно и доступно рассказывает о биографиях галактик: что удалось узнать ученым об их далеком прошлом, каковы их современные свойства и каково их будущее.

Предназначена для астрономов и физиков, как студентов, так и специалистов. Популярность, ясность и четкость изложения делают ее доступной широкому кругу любителей астрономии.

T 20605-096 96-81, ч. 1 1705060000
041(01)-81

ББК 22.63

Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии и геофизике

© 1978 R. Tayler
© Перевод на русский язык, с авторскими дополнениями, «Мир», 1981

Предисловие редактора перевода

Профессор Р. Дж. Тейлер, директор астрономического центра Университета графства Суссекс (Англия) хорошо известен советским читателям по переведенным ранее прекрасным научно-популярным книгам «Строение и эволюция звезд» (М.: Мир, 1973) и «Происхождение химических элементов» (М.: Мир, 1975). Его третья научно-популярная книга, посвященная вопросам строения и эволюции галактик, отлично дополняет две предыдущие и в сочетании с ними позволяет получить представление о значительной части современной астрономии.

Изложить в популярной форме современные взгляды на строение и эволюцию галактик — задача очень непростая. Это связано с быстрым развитием галактической и особенно внегалактической астрономии — каждый год появляется много новых важных и интересных данных, заставляющих менять, казалось бы, уже установившиеся представления и схемы. Это связано также с необходимостью охвата большого сложного материала, поскольку выбранная автором тема заслуживает серии книг, подобных данной, — по существу каждая глава может быть развернута в самостоятельную книгу. В таких условиях автору пришлось очень жестко отбирать материал. Книга дает общий обзор вопросов строения и эволюции галактик и позволяет получить ясное представление о месте, занимаемом этой проблемой в астрономии, о связи ее с космологией и с задачами изучения отдельных структурных элементов галактик: звезд, межзвездного газа и магнитных полей. Автор постоянно подчеркивает взаимосвязь между свойствами этих составляющих и свойствами галактики в целом. В таком последовательном подходе — главное достоинство книги.

Вопросы космологии, например объяснение красного смещения эффектом Доплера, вызванным расширением Вселенной, описание строения и эволюции Вселенной с помощью космологических моделей, ранние стадии эволюции Вселенной и сингулярное состояние, затрагиваются лишь в той мере, в какой это необходимо для анализа проблемы происхождения и эволюции галактик. Читатель, интересующийся этими вопросами, может познакомиться с ними подробнее, прочитав популярную книгу И. Д. Новикова «Эволюция Вселенной» (М.: Наука, 1979) или монографию Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова «Строение и эволюция Вселенной» (М.: Наука, 1975).

За время, прошедшее с момента выхода в свет английского издания, выполнено много интересных наблюдений. Наиболее важные из них приводятся в добавлении к гл. 9. Эти данные, вероятно, вызовут довольно серьезный пересмотр взглядов на проблему образования галактик, на строение их корон и на свойства скрытой массы.

Особенно перспективной в последнее время кажется отмеченная в добавлении к гл. 9 гипотеза, согласно которой некоторые звезды (точнее, газо-звездные комплексы типа карликовых галактик) возникли

до образования нормальных галактик. Последующее слияние таких первичных комплексов привело к рождению нормальных галактик. Эта гипотеза хорошо согласуется с представлениями современной космологии, причем в ее рамках получает естественное объяснение наблюдаемое высокое содержание тяжелых элементов в горячем газе скоплений галактик. Только на основе таких представлений сегодня удастся объяснить (и смоделировать на ЭВМ) образование сильно сплюснутых эллиптических галактик с медленным вращением. Эти взгляды перспективны, но их нельзя назвать общепринятыми. В настоящее время широко распространена изложенная в гл. 8 традиционная точка зрения на процессы образования и эволюции галактик. Окончательное решение этой проблемы — дело будущего развития науки.

Упомянутое в добавлении к гл. 9 измерение массы покоя нейтрино наряду с важными космологическими следствиями приводит к новым взглядам на короны галактик. Получает красивое решение проблема скрытой массы. Из анализа образования галактик следует, что они должны обладать массивными нейтринными коронами и основная их масса должна быть заключена в этих коронах. Однако вклад нейтрино в массу галактик в области, занятой звездами, вероятно, невелик и не изменит современные представления о строении этой части галактик. Кроме того, перед астрономами встают интересные задачи наблюдений нейтринного фона.

И наконец, нельзя не упомянуть об очень интересной работе по поиску скоплений галактик в окрестностях близких квазаров. В ряде случаев такие скопления удалось обнаружить, причем красное смещение галактик в них близко к красному смещению квазаров. Эти наблюдения подтверждают точку зрения автора о космологической природе красного смещения квазаров.

Перевод настоящей книги готовился к изданию в тесном сотрудничестве с автором. Профессор Р. Дж. Тейлер любезно прислал предисловие к русскому изданию и добавление к гл. 9, в котором отражены успехи наблюдательной астрономии за время, прошедшее после выхода в свет английского издания. С его помощью исправлены опечатки, замеченные в английском издании. Редактор и издательство приносят автору искреннюю благодарность за участие в подготовке русского перевода книги.

Книга адресована широкому кругу читателей. Для понимания основного содержания необходим запас знаний, примерно соответствующий программе средней школы. Лишь в отдельных местах (главным образом в гл. 4) необходимо знакомство с основами теории дифференциальных уравнений.

В библиографии, составленной автором, указаны книги для дальнейшего чтения как по обсуждаемым, так и по смежным вопросам, причем значительная часть упоминаемых в ней книг переведена на

русский язык. В качестве дополнения укажем несколько книг советских авторов:

Воронцов-Вельяминов Б. А. Внегалактическая астрономия. — М.: Наука, 1972.

Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной. — М.: Наука, 1977.

Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Физика межзвездной среды. — М.: Наука, 1980.

Происхождение и эволюция галактик и звезд/Под ред. С. Б. Пикельнера. — М.: Наука, 1976.

Физика космоса/Под ред. С. Б. Пикельнера. — М.: Советская энциклопедия, 1976.

Октябрь, 1980 г.

А. Г. Дорошкевич

Предисловие к русскому изданию

Мне доставляет истинное удовольствие представить эту книгу вниманию советского читателя. Так же как и в двух моих книгах, вышедших ранее (Строение и эволюция звезд и Происхождение химических элементов), я старался сконцентрировать внимание на основных положениях, а не на отдельных деталях, представления о которых все еще очень зыбки. Вопросы строения и эволюции галактик занимают центральное место в астрономии уже хотя бы потому, что в наблюдаемой части Вселенной насчитывается примерно столько же галактик, сколько звезд в типичной крупной галактике. Благодаря разработке новых инструментов становится доступно изучению все большее число галактик, и можно надеяться, что в ближайшие десять лет будет получена несравненно более надежная информация об их массах и тенденции к образованию скоплений — проблемах, относящихся к числу самых важных и менее всего изученных из затронутых в этой книге. В русском переводе исправлены опечатки, замеченные в английском издании, а в конце гл. 9 помещено дополнение, в котором отражены достижения последних трех лет.

Май 1980 г.

Р. Дж. Тейлер

Предисловие

В последние годы интересы астрономов явно переместились от звезд к галактикам. Это объясняется, с одной стороны, тем, что свойства звезд в общих чертах уже поняты, а с другой — тем, что успехи в создании телескопов и вспомогательного оборудования к ним позволили изучать все большее число слабых галактик. Проблема строения и эволюции галактик поистине является центральной в современной астрономии. В типичной галактике насчитывается примерно столько же звезд, сколько галактик в обозримой части Вселенной, и при изучении галактик нам приходится обращаться как к вопросам строения и эволюции звезд, так и к космологическим теориям.

На страницах книги в самых общих чертах рассказано о том, что известно о строении галактик в современную эпоху и об их прошлом. Ряд замечаний касается путей эволюции галактик в будущем. В большинстве случаев подробно рассматривается наша Галактика. Изложение по возможности носит строгий характер. Ниже мы увидим, что, хотя основные положения, по-видимому, можно считать хорошо известными, есть еще немало значительных неопределенностей в деталях. Например, лишь недавно выяснилось, что ни размеры, ни массы галактик нельзя считать хорошо известными. Поэтому в книге редко приводятся численные значения, характеризующие свойства галактик, причем всегда указывается степень их возможной неопределенности.

В книге подобного объема, посвященной столь сложной теме, невозможно воздать должное каждому достижению в данной области и упомянуть всех лиц, которые любезно предоставили автору материал. Список книг, знакомство с которыми особенно полезно, приведен в рекомендациях для дальнейшего чтения. Интерес автора к проблемам, связанным с галактиками, в значительной степени был стимулирован беседами с Д. Линден-Беллом, Б. Пейджем и М. Рисом.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить Д. Мейера за помощь в подготовке рисунков и П. Никсон за тщательную перепечатку рукописи. Автор также благодарен своему коллеге А. Эвересту за многочисленные советы, которые способствовали большей ясности изложения.

Эту книгу автор посвящает профессору Яну Оорту в знак глубочайшего уважения и признательности за тот фундаментальный вклад, который он внес в изучение строения галактик в результате более чем полувековой научной деятельности.

Льюис, февраль 1978

Р. Дж. Тейлер

A, B	постоянные Оорта, описывающие вращение Галактики
A	площадь сечения трубки, образуемой силовыми линиями магнитного поля
B	магнитная индукция
B_{\perp}	поперечный компонент магнитной индукции
$B_{\nu}(T)$	функция Планка
d	расстояние звезды от локальной системы отсчета (центроида скоростей); минимальное расстояние между двумя звездами
e	эксцентриситет эллипсоида в модели Галактики
$E, S0, S, SB, Ir$	классификация галактик
E_{cr}	плотность энергии космических лучей
E_N	запас ядерной энергии в звезде
f	функция распределения по массам
$f(M)$	начальная функция масс
F	функция распределения частиц
g_{ϕ}, g_z	компоненты гравитационного поля Галактики
H	постоянная Хаббла
$I, I_1 - I_5$	интегралы движения звезды
j	плотность электрического тока
l	галактическая долгота; средняя длина свободного пробега; видимый блеск
L	светимость галактики; характерная длина изменения магнитного поля
L_z	светимость звезды
m	масса частицы
M	масса (например, Галактики)
M_H	масса нейтрального водорода в галактике
M_p, M_{sph}	масса ядра; масса эллипсоида в модели Галактики
M_s	масса звезды
M_V	абсолютная звездная величина
n	пространственная плотность звезд; концентрация частиц
OBAFGKMRNS	спектральные классы звезд
P	выход тяжелых элементов
P, P_{ϕ}	период; период эпитического движения
P_{gas}, P_{cr}, P_{mag}	давление газа, космических лучей, магнитного поля
P_{rad}	мощность излучения радиоисточника
q_0	параметр замедления
r	радиальная координата в сферической системе координат
r, R	радиус
r_s	радиус звезды
$R(t), R_0$	масштабный фактор для Вселенной; его современное значение
R_0	расстояние от Солнца до центра Галактики
R_{Sch}	радиус Шварцшильда
S	масса образовавшихся звезд
t	время
t_H	«хаббловское» время
t_{ms}	продолжительность жизни звезды на главной последовательности
T	температура; полная кинетическая энергия

T_e	эффективная температура звезды
T_s	температура поверхности звезды
u, v, w	компоненты скорости звезды относительно Солнца
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	средние значения компонентов скоростей звезд
$u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}$	компоненты скорости движения Солнца
v	скорость
v_{circ}	скорость вращения Галактики
v_{gas}	скорость газа
v_{esc}	скорость убегания
v_R, v_T	лучевая и тангенциальная скорости звезды
v_{ϕ}, v_{ϕ}, v_z	компоненты скорости в цилиндрической системе координат
$v_{\phi 0}$	скорость локальной системы отсчета
x, y, z	декартовы координаты
z	красное смещение
Z, Z_1	содержание тяжелых элементов (по массе) и его современное значение
α	большая полуось эллипсоида в модели Галактики; доля массы, заключенной в угасших звездах
ϵ, ϵ_{tot}	энергия электрона космических лучей; полная энергия системы электронов
η	электрическое сопротивление
κ	эпитическая частота
λ	доля массы вещества, приходящаяся на образовавшиеся тяжелые элементы и выброшенная звездой; длина волны
Λ	полутолщина диска Галактики
μ	собственное движение звезды
μ, μ_1	доля массы галактики, приходящаяся на межзвездный газ, и ее современное значение
ξ, η	отклонение орбиты звезды от круговой
$\tilde{\omega}, \phi, z$	цилиндрические полярные координаты
ρ	плотность
ρ_0	критическая плотность вещества, при которой Вселенная становится замкнутой
ρ_{gal}	средняя плотность вещества в галактике
$\rho_{gas}, \rho_{cr}, \rho_s$	плотность газа, космических лучей, звезд
σ	масса газа, приходящаяся на единицу площади диска галактики
$\Sigma(t)$	масса образовавшихся звезд
τ_c	среднее время между столкновениями
τ_D	время затухания магнитного поля
Φ	гравитационный потенциал
ω	угловая скорость
ω, ω_0	угловая скорость вращения Галактики; ее значение в окрестности Солнца
ω_s	частота спиральной волны плотности
Ω	полная гравитационная потенциальная энергия
Ω_0	отношение плотности Вселенной к критической плотности

Необходимость введения большого числа символов и желание использовать общепринятые обозначения привели к тому, что некоторые символы обозначают более чем одну величину. Из текста будет ясно, какая из них имеется в виду.

ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Фундаментальные физические постоянные

a	постоянная плотности излучения	$7,55 \cdot 10^{-16}$ Дж/(м ³ ·К ⁴)
c	скорость света	$3,00 \cdot 10^8$ м/с
e	заряд электрона	$1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
G	гравитационная постоянная	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
h	постоянная Планка	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
k	постоянная Больцмана	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
m_e	масса электрона	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг
m_H	масса атома водорода	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
μ_0	магнитная проницаемость вакуума	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м

Астрономические величины

L_\odot	светимость Солнца	$3,90 \cdot 10^{26}$ Вт
M_\odot	масса Солнца	$1,99 \cdot 10^{30}$ кг

Приближенные значения некоторых астрономических величин

A	постоянные Оорта	15 км/(с·кпс)
B		— 10 км/(с·кпс)
H	постоянная Хаббла	50 км/(с·Мпс)
R_0	расстояние до центра Галактики	10 кпс
t_H	хаббловское время	$1,9 \cdot 10^{10}$ лет
$v_{\phi 0}$	круговая скорость вращения Галактики в окрестности Солнца	250 км/с

Внесистемные единицы

Световой год (единица расстояния)	$9,5 \cdot 10^{15}$ м
Парсек (единица расстояния)	$3,09 \cdot 10^{16}$ м
Год	$3,16 \cdot 10^7$ с

На графиках, приведенных в настоящей книге, там, где это возможно, по осям отложены безразмерные величины, например $v/(км/с)$, а надписи на осях сделаны с учетом рекомендаций Королевского общества, изложенных в брошюре Quantities, Units and Symbols, 2nd. ed. Royal Society, 1975*.

* В русском переводе обозначения на осях сделаны традиционным образом: измеряемая величина, единица измерения. — Прим. ред.

Глава 1

Введение

ОТКРЫТИЕ ГАЛАКТИК

В средневековой картине мира звезды считались точечными источниками света, прикрепленными к сфере, находящейся далеко за пределами Солнечной системы. Однако объем сферы считался значительно меньше, чем объем пространства, который, как мы теперь знаем, действительно заполняют звезды. Разумеется, делались попытки измерить расстояние до «сферы неподвижных звезд». Они основывались на ожидаемом изменении направления на звезду при наблюдениях из различных точек поверхности Земли (рис. 1.1). Хотя такой метод пригоден для Солнца, Луны и других членов Солнечной системы, он оказался бесполезным для звезд, что свидетельствовало об очень больших расстояниях до них. После научной революции XVI — XVII вв., кульминацией которой было объяснение Ньютоном движения планет с помощью закона всемирного тяготения, стало очевидно, что звезды, скорее всего, являются далекими солнцами, или, что то же самое, Солнце — это просто одна из многих звезд, и что «неподвижные звезды» должны перемещаться в пространстве и подчиняться тому же закону всемирного тяготения. В результате возобновился интерес к определению не только положений звезд, но и их движений.

Первоначально считалось, что существует всего лишь одна система звезд, заполняющая всю Вселенную, и эта точка зрения продержалась вплоть до 20-х годов нашего века. Но еще до этого было установлено, что звезды распределены в пространстве неравномерно в отличие от равномерного (в первом приближении) распределения по небу звезд, видимых невооруженным глазом. В начале нашего века было обнаружено, что система звезд, которую мы теперь называем нашей Галактикой, сильно сплюснута, и большинство звезд сосредоточено вблизи плоскости, отмеченной на небе слабой светящейся полосой, называемой Млечным



Рис. 1.1. Попытка измерить расстояние до звезды. Если бы звезды находились достаточно близко к Земле, то можно было бы измерить угол α между направлениями на звезду S из двух точек P и P' на поверхности Земли.

При известных значениях α и PP' можно вычислить расстояние SP .

Путем. В то же время было известно, что существует большое число туманных светящихся объектов, разбросанных по всему небу, которые не могли быть отдельными звездами, и им было дано название *туманности*.

Впоследствии было показано, что некоторые из этих объектов, в полном соответствии со своим названием, действительно являются туманностями, или облаками газа, расположенными в той же области пространства, что и звезды. Туманности другого типа, так называемые *спиральные туманности*, как оказалось, состоят из слабых звезд. В начале нашего столетия шел горячий спор о том, расположены ли спиральные туманности во внешних областях нашей Галактики, или же они представляют собой самостоятельные звездные системы, возможно даже, подобные нашей Галактике. Если составляющие их звезды похожи на близкие к нам звезды, то, очевидно, эти туманности являются далекими независимыми звездными системами, поскольку их звезды выглядят очень слабыми. Правильность такого заключения была окончательно доказана в начале 20-х годов, и эти туманности стали называть *галактиками**.

В настоящее время известно, что во Вселенной существуют миллиарды галактик, причем эта оценка может быть сильно занижена из-за трудности наблюдений небольших слабых галактик. Наша Галактика относится к числу крупных, но не самых больших галактик. Число звезд в ней превышает 10^{11} , в то время как гигантские галактики состоят, по-видимому, из 10^{12} или даже 10^{13} звезд. Конечно, звезды в них никто не считал, хотя при помощи современных телескопов и специального оборудования для автоматического подсчета звезд можно сосчитать многие миллионы звезд нашей Галактики. Проводились очень подробные исследования ограниченных областей нашей Галактики, после чего количественные оценки пересчитывались для всей Галактики в целом с учетом ее пространственной неоднородности. Наряду со звездами галактики содержат вещество в форме *межзвездного газа*, но все же основная масса галактик, по крайней мере в современную эпоху, заключена в звездах.** Поэтому мы можем в первом приближении рассматривать галактики просто как звездные системы. Как звезды, так и галактики существуют благодаря силам гравитации. Один из наиболее важных вопросов в астрономии — это вопрос, почему *вещество во Вселенной собрано в объекты галактической массы, которые в свою очередь состоят из более мелких единиц — объектов звездной массы?* Хотя мы не можем ответить на этот вопрос на страницах данной книги, мы попытаемся пред-

* Название нашей Галактики мы всегда будем писать с заглавной буквы. Слово «галактика» происходит от греческого названия Млечного Пути.

** Речь идет о массе видимого вещества. — Прим. ред.

ставить свидетельства, которые должны быть положены в основу ответа.

В предыдущей книге этой серии «Строение и эволюция звезд»* было показано, что многое из того, что мы знаем о звездах, получено благодаря тому, что мы находимся вблизи одной из звезд — Солнца. Точно так же мы можем надеяться многое узнать о галактиках, изучая нашу Галактику. Правда, есть одно очень важное различие: мы находимся вблизи Солнца, но при этом мы располагаемся внутри Галактики. Как оказалось, очень трудно исследовать структуру объекта, находясь внутри его. К примеру, в течение долгого времени считалось, что Солнце расположено очень близко к центру Галактики, поскольку яркие звезды распределены приблизительно симметрично по отношению к Солнцу. Впоследствии выяснилось (об этом подробнее будет сказано ниже), что межзвездное вещество в Галактике поглощает свет звезд и ведет себя наподобие межзвездного тумана, а это приводит к совершенно неправильному представлению о расстояниях внутри Галактики.

ЧЕМ ГАЛАКТИКИ ОТЛИЧАЮТСЯ ОТ ЗВЕЗД

Хотя и звезды, и галактики являются объектами, которые существуют благодаря связывающей их силе гравитационного притяжения, они отличаются друг от друга во многих важных аспектах как с качественной, так и с количественной стороны. Возьмем к примеру простой наблюдаемый факт: большинство звезд имеют сферическую форму или лишь незначительно отличаются от сферы, тогда как среди галактик встречаются объекты самых разнообразных форм — от практически сферических до сильно сплюснутых, причем последние нередко обладают эллипсоидальной формой или же далеко не столь симметричны по структуре. Как показывают наблюдения, многие сильно сплюснутые галактики быстро вращаются. Большое разнообразие форм галактик говорит о том, что их классификация должна быть значительно более сложной, чем классификация звезд. Свойства звезд различных спектральных классов будут упоминаться в книге по мере надобности; о классификации галактик речь пойдет в гл. 3.

Другое очень важное различие между звездами и галактиками заключается в том, что до сих пор нет определенных указаний на существование галактик, сильно различающихся по возрасту. Все они могли образоваться 10^{10} — $2 \cdot 10^{10}$ лет назад, причем реальное различие возрастов галактик значительно меньше любого из этих двух значений. Совершенно иная ситуация имеет место для звезд Галактики: нам

* На эту книгу мы в дальнейшем будем часто ссылаться и называть ее просто «Звезды». Другую книгу этой серии, «Происхождение химических элементов», мы сокращенно будем называть «Химические элементы». Хотя все три книги дополняют друг друга, они написаны таким образом, что каждую из них можно читать независимо.

известно, что некоторые звезды являются ровесниками Галактики, а возраст других не превышает нескольких миллионов лет, и рождение звезд, несомненно, продолжается в Галактике и в настоящее время. Это обстоятельство позволяет изучать эволюцию звезд, не наблюдая тех изменений, которые происходят со временем с отдельной звездой, а исследуя характеристики звезд сходной массы, но различного возраста, которые находятся в нашей области Галактики. Поскольку окружающие нас галактики имеют приблизительно одинаковый возраст, наша единственная надежда непосредственно исследовать их эволюцию связана с наблюдениями самых далеких галактик во Вселенной и сопоставлением их характеристик с характеристиками соседних галактик. Чтобы достичь нас, свету от далеких галактик требуется колоссальное время, поэтому мы видим их такими, какими они были в далеком прошлом, и если средние характеристики галактик меняются с их возрастом, то есть надежда получить некоторую информацию об этом изменении. Но информация, имеющаяся в настоящее время, недостаточно определена. Одна из причин заключается в том, что далекие галактики выглядят очень слабыми и трудны для изучения. Другая причина связана с тем, что, как будет подробнее рассмотрено в конце этой главы, при построении шкалы расстояний во Вселенной обычно исходят из предположения, что свойства галактик не претерпевают с возрастом существенных изменений. Пока ясно лишь то, что характерное время заметного эволюционного изменения галактик, по-видимому, сравнимо с предполагаемым возрастом Вселенной.

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Существуют два независимых аргумента в пользу того, что наша Галактика (как и другие галактики) в начале своей эволюции имела значительно более высокую светимость, чем теперь. Если Галактика образовалась в результате конденсации межгалактического газа, что считается наиболее вероятным, то ее полная энергия первоначально была значительно больше, чем в настоящее время. Ведь сжимающееся облако обладает энергией, достаточной для того, чтобы вновь расширяться до первоначального размера, если считать, что не происходит диссипации энергии; а для того чтобы облако превратилось в сравнительно компактный объект размерами, значительно меньшими первоначальных, оно должно потерять существенную часть своей энергии. Потери энергии должны были происходить на стадии конденсации, продолжительность которой очень мала по сравнению с полной продолжительностью существования Галактики. Проблема образования галактик будет рассмотрена в гл. 8. Второй аргумент относится прежде всего к нашей Галактике, но почти наверняка справедлив и для других галактик. Он касается содержания химических элементов и подробно рассмотрен в книге «Химические элементы», а в настоящей книге будет затронут в гл. 7. Если первоначально

Вселенная состояла из чистого водорода или из смеси водорода и гелия, что представляется весьма разумным, а все более тяжелые элементы образовались за время существования Галактики в результате ядерных реакций в звездах или более массивных объектах, то наблюдаемые вариации химического состава звезд в зависимости от их возраста позволяют сделать следующий вывод: на ранней стадии эволюции Галактики в масштабах всей нашей звездной системы должен был произойти всплеск интенсивного образования тяжелых элементов, с которым связано увеличение светимости Галактики.

КАК УЗНАЛИ СТРОЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

Рассмотрим несколько подробнее, как была выявлена структура Вселенной. Как мы уже отмечали, открытие Ньютоном закона всемирного тяготения и его использование для расчетов движения тел Солнечной системы привело к осознанию того, что звезды должны находиться на различных расстояниях от нас и непрерывно двигаться. Эти выводы стимулировали попытки определения расстояний до звезд и изучения их движений. Это произошло незадолго до того, как Галлей обнаружил движение некоторых звезд по небу, заметное на фоне более далеких (предположительно) звезд (рис. 1.2). Эффект перемещения звезд, получивший название *собственного движения*, был открыт путем сопоставления положений звезд на небе по измерениям в XVII в. с положениями, измеренными греками за много веков до этого. Обнаружение собственных движений будет все более легкой задачей по мере накопления наблюдений за очень длительный период. Некоторое преимущество имеют последовательные наблюдения, выполненные на одном и том же телескопе, так как при этом можно непосредственно сравнивать между собой фотографические пластинки с изображениями звезд. Именно ценностью подобных наблюдений объясняется, почему некоторые очень старые телескопы продолжают использоваться долгое время: если бы не эти наблюдения, они были бы демонтированы. Впрочем, очень точная современная измери-

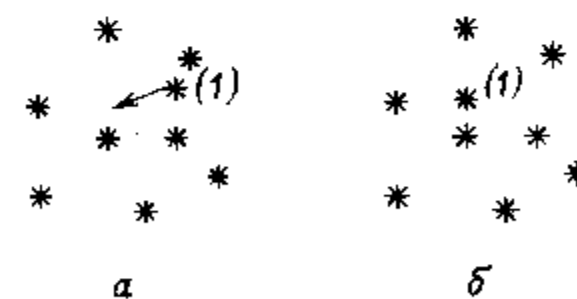


Рис. 1.2. Собственное движение. а — звезда (1) движется в направлении, указанном стрелкой, б — в результате этого движения через некоторое время ее положение относительно более далеких звезд изменилось. Это угловое перемещение звезды называется ее собственным движением.

тельная техника облегчает сопоставление результатов, полученных на различных телескопах.

Значительно больше времени потребовалось для измерения расстояния до звезд. И Ньютон, и Гершель оценивали расстояния до звезд, считая, что они такие же яркие, как и Солнце, поэтому их видимый блеск служит мерой расстояния до них. Поскольку Солнце является довольно типичной звездой, такие оценки для многих звезд оказываются вполне приемлемыми, хотя они, конечно, крайне неточны для звезд очень высокой или очень низкой светимости. Полученные оценки были достаточно хороши, чтобы продемонстрировать, что расстояния до звезд чрезвычайно велики по сравнению с размерами Солнечной системы. Однако первые непосредственные определения расстояний до звезд были сделаны лишь в 1838—1839 гг., когда три астронома оценили расстояния до трех различных звезд*, используя метод *тригонометрического параллакса* (рис. 1.3). Параллаксом называется угол, под которым со звезды виден радиус орбиты Земли вокруг Солнца. Для всех звезд, открытых до сих пор, этот угол меньше $1''$.

Если расстояние до звезды и ее собственное движение известны, то из ее угловой скорости перемещения по небесной сфере можно получить *тангенциальную скорость*, обычно измеряемую в километрах в секунду. Наконец, развитие спектроскопии во второй половине XIX в. дало возможность измерять скорость по лучу зрения — *лучевую скорость* — по эффекту Доплера (рис. 1.4).

К началу нашего века стало известно, что типичные расстояния между звездами в окрестностях Солнца составляют несколько световых лет**, а их скорости относительно Солнца измеряются десятками, а в некоторых случаях сотнями километров в секунду.

Тогда уже было известно, что Солнце является одним из членов большой динамически связанной звездной системы, причем считалось, что оно находится близко к центру этой системы. Такое заключение делалось на основе следующего аргумента: как мы уже отмечали, звезды, видимые невооруженным глазом, расположены в пространстве приблизительно симметрично относительно Солнца. Кроме того, существует Млечный Путь — опоясывающая небо полоса из более слабых и более далеких звезд. Эти факты привели к картине строения Галактики, показанной на рис. 1.5: центральное

* Этими тремя звездами были: β Лебедя, α Лиры (Вега) и α Центавра. Расстояния до них были измерены Ф. В. Бесселем, В. Я. Струве и Т. Хендерсоном соответственно.

** В этой книге мы будем использовать одну из двух единиц расстояния: *световой год* (расстояние, которое свет проходит за один год, равно $\approx 9 \cdot 10^{15}$ м) и *парсек* (расстояние, которому соответствует параллакс в $1''$, равно $\approx 3 \cdot 10^{16}$ м). Для измерения расстояний в Галактике удобной единицей является 10^3 пс (кис), а для измерения межгалактических расстояний — 10^6 пс (Мпс).

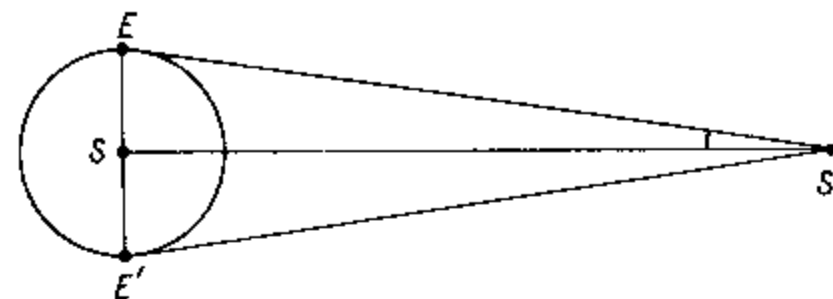


Рис. 1.3. Параллакс звезды. Если направления на звезду S' из точек E и E' орбиты Земли вокруг Солнца не совпадают, то угол $ES'S'$ называется звездным параллаксом. Если расстояние ES известно, то можно определить ES' .

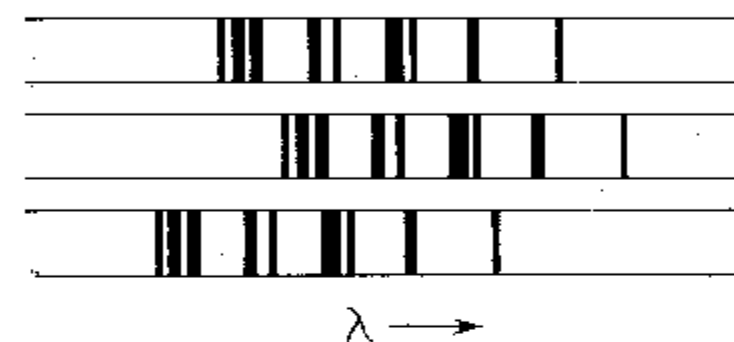


Рис. 1.4. Доплеровское смещение линий в спектрах звезд. Три спектра соответственно относятся к звезде, покоящейся относительно Солнца, удаляющейся от Солнца и приближающейся к Солнцу.

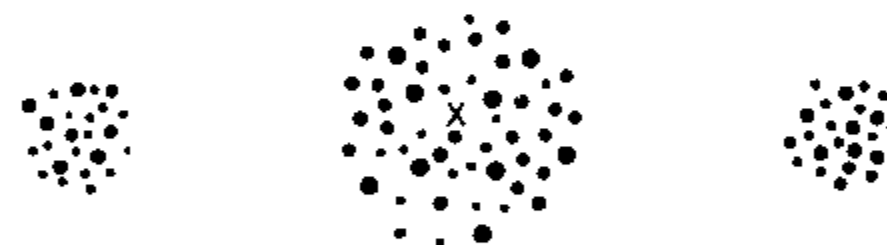


Рис. 1.5. Схема строения Галактики по Эддингтону (1912 г.). Положение Солнца отмечено крестиком.

почти сферически симметричное скопление звезд окружено поясом более далеких звезд, который имеет форму тора, наподобие камеры автомобильного колеса. Подобная картина Галактики (или Вселенной, как тогда предполагалось) была предложена Эддингтоном в его книге «Движения звезд и строение Вселенной» (1912 г.). Всего 10 лет спустя получил признание совершенно иной взгляд на строение Галактики. На рис. 1.6 показан вид Галактики «с ребра», Солнце в ней расположено очень далеко от центрального утолщения. Как могло произойти, что за столь короткое время взгляды изменились радикальным образом?

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Одна из причин, приведших к изменению представлений о строении Галактики, связана с шаровыми звездными скоплениями. Их распределение в Галактике показано на рис. 1.6. Это компактные группы звезд, содержащие, по-видимому, 10^5 – 10^6 членов. Американский астроном Шепли обратил внимание на то, что скопления не разбросаны беспорядочно по всему небу и являются, по-видимому, частью Галактики. Он предположил, что шаровые скопления образуют приблизительно сферически симметричную систему, центр которой совпадает с центром нашей Галактики. Далее он показал, что наблюдения можно объяснить, только если считать, что Солнце расположено на большом расстоянии от центра Галактики (приблизительно 15 кпс), сопоставимом с радиусом всей системы шаровых скоплений, как это показано на рис. 1.6.

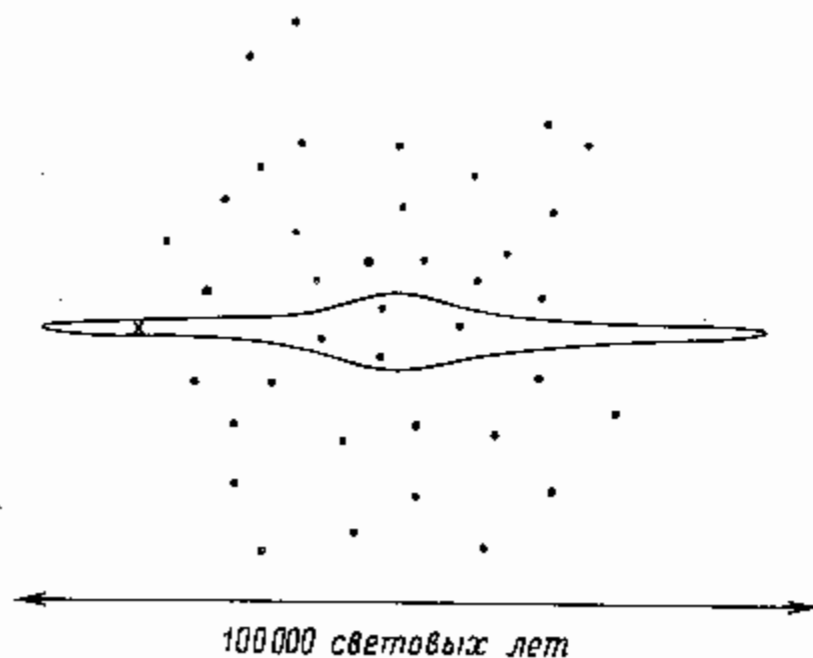


Рис. 1.6. Схематический вид Галактики при наблюдении «извне». Показан тонкий галактический диск и центральное утолщение. Положение Солнца отмечено крестиком, точки — шаровые скопления.

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ГАЗ И ПЫЛЬ

Хотя это предположение Шепли и объясняет наблюдаемое распределение шаровых скоплений, необходимо разобраться в том, почему из наблюдений звезд не следует сразу же столь эксцентричное положение Солнца. В частности, почему небо не выглядит несравненно более ярким в направлении галактического центра по сравнению с другими направлениями? Ответ на этот вопрос вскоре был найден. Одновременно было подтверждено существование значительного количества *межзвездного газа и пыли*, о присутствии которых догадывались намного

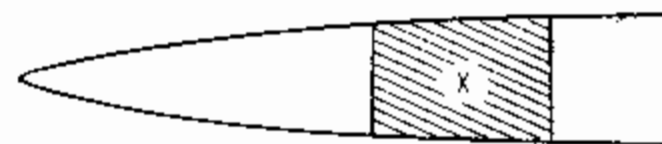


Рис. 1.7. Эффект межзвездного поглощения света. Вследствие межзвездного поглощения света хорошо видны лишь те звезды диска, которые находятся в небольшой заштрихованной области в окрестности Солнца.

раньше. О том, как были открыты межзвездные газ и пыль, будет рассказано в гл. 2; здесь достаточно отметить, что межзвездное вещество поглощает и рассеивает свет звезд. Межзвездная пыль образует пелену, сильно затрудняющую наблюдения далеких звезд, поэтому звезды, которые мы наблюдаем невооруженным глазом или в небольшой телескоп, преимущественно расположены вблизи Солнца (рис. 1.7). Газ и пыль сосредоточены в тонком диске Галактики, в котором содержится также большинство ее звезд. Поскольку, как видно из рис. 1.6, многие шаровые скопления расположены далеко за пределами диска, пыль не слишком сильно мешает изучению системы этих скоплений, но все же небольшое поглощение света существует и в направлении на шаровые скопления. Отчасти по этой причине наилучшая современная оценка расстояния до центра Галактики (10 кпс) несколько меньше полученной Шепли.

ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

Одновременно с изучением общего строения Галактики шла дискуссия о том, представляет ли Галактика всю Вселенную или существуют и другие галактики. Как уже говорилось, спор шел вокруг объектов, называемых туманностями. Давно было известно, что во Вселенной, помимо звезд, наблюдаются туманные пятна. Туманности изучались таким известным астрономом, как Уильям Гершель, а в конце XVIII в. французским астрономом Мессье был составлен каталог туманностей. Значительно более полным каталогом туманностей явился «Новый общий каталог», составленный Дрейером почти сто лет спустя. Даже в настоящее время многие галактики обозначаются теми номерами, которые присвоены им в этих каталогах. Так, туманность Андромеды по каталогу Мессье имеет обозначение M31, а один из ее спутников обозначается по «Новому общему каталогу» NGC 205.

В конце концов было показано, что туманные объекты можно разделить в основном на четыре класса: звездные скопления (такие, как шаровые), истинные туманности (облака газа), планетарные туманности (газовая оболочка, окружающая звезду, которая ее выбросила), а также группа объектов, которые, как мы теперь знаем, являются галактиками. Наиболее характерными примерами объектов,

принадлежащих к этой группе, являются *спиральные туманности*, названные так за их спиральную структуру. Ее впервые обнаружил лорд Росс. Однако задолго до того, как стало известно, что они имеют спиральную структуру, английский ученый Томас Райт и немецкий философ Иммануил Кант высказали предположение, что некоторые туманности могут быть *островными Вселенными*.

Есть две причины, которые в течение долгого времени мешали установить, что спиральные туманности — это независимые галактики. Первая — туманности так далеки, что до появления очень больших оптических телескопов невозможно было показать, что они являются звездными системами. Ситуация изменилась с вводом в строй в 1919 г. 2,5-метрового телескопа обсерватории Маунт-Вилсон. Вторая причина касалась положения туманностей в пространстве. В отличие от ярких звезд туманности не распределены по небу однородно: они почти отсутствуют вблизи плоскости нашей Галактики, образуя так называемую зону избегания (рис. 1.8). В полосе Млечного Пути или вблизи нее наблюдается всего лишь несколько туманностей. По этой причине казалось, что совокупность спиральных туманностей связана со структурой нашей Галактики, и это считалось очень веским аргументом в пользу того, что туманности должны быть частью Галактики или по крайней мере ее ближайшими спутниками. Несостоятельность этих аргументов стала очевидной с открытием поглощения света межзвездным веществом, показавшим, что галактики не могут быть видны в зоне избегания, даже если они и есть в этом направлении на небе. Приблизительно в это же время удалось с помощью фотографий, полученных с 2,5-метровым телескопом, показать, что ближайшие спиральные галактики состоят из звезд. Полагая, что эти звезды подобны звездам нашей Галактики, можно заключить, что ближайшие галактики удалены от нас в среднем на несколько миллионов световых лет и, следовательно, находятся далеко за пределами нашей Галактики. Итак, можно было считать установленным, что Вселенная заполнена галактиками.



Рис. 1.8. Зона избегания. Вследствие межзвездного поглощения света веществом, расположенным вблизи галактической плоскости, в направлениях между двумя штриховыми линиями мы можем наблюдать лишь небольшое число галактик.

РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

По-видимому, наиболее убедительный аргумент в пользу того, что галактики являются самостоятельными образованиями, был получен в середине 20-х годов главным образом благодаря работе Хаббла и его коллег. Мы уже упоминали, что лучевые скорости звезд в Галактике могут быть измерены по доплеровскому смещению спектральных линий. Хаббл измерил доплеровские смещения в спектрах многих галактик. У близких галактик наблюдаются как красное, так и фиолетовое смещение, что свидетельствует о наличии хаотических движений в системе галактик, аналогичных хаотическим движениям звезд в окрестностях Солнца. Однако спектральные линии всех более далеких галактик оказались смещенными в красную сторону. Если красное смещение интерпретировать как следствие эффекта Доплера, то это означает, что относительная скорость всех далеких галактик направлена от нас. Эти наблюдения привели к идее о *расширении Вселенной*. Изучение вопросов, связанных с расширяющейся Вселенной, является предметом *космологии*, которую мы не будем детально излагать в настоящей книге. Однако, как будет показано в гл. 3 и 8, невозможно объяснять наблюдения далеких галактик или обсуждать строение и эволюцию галактик, совсем не затрагивая космологических проблем. Очень краткий анализ наблюдений и теорий, относящихся к космологии, был также дан в гл. 6 книги «Химические элементы». Время от времени выдвигались и другие предположения о природе красного смещения. К ним принадлежит гипотеза о *старении квантов*, согласно которой свет теряет энергию и подвергается красному смещению просто потому, что он преодолевает огромные расстояния. Ни это предположение, ни какое-либо другое не является столь же хорошо обоснованным, как представление о доплеровской природе красного смещения, поэтому мы примем без дальнейшего обсуждения, что Вселенная действительно расширяется. На этом предположении в значительной степени основано содержание гл. 8.

Общей картины Вселенной, которая была построена в 20-е годы, в основных чертах придерживаются и сегодня. За это время внутри галактик было открыто много новых типов объектов, прежде всего благодаря методам наблюдений, используемым в новых областях астрономии, таких, как *радиоастрономия*, *инфракрасная*, *ультрафиолетовая* и *рентгеновская астрономия*. Действительно, опыт нашего столетия показывает, что всякий раз, когда появлялись новые технические возможности, удавалось открыть целые классы новых удивительных объектов. Большинство галактик по соседству с нами имеют довольно правильную форму, однако недавно было открыто много так называемых *пекулярных галактик*, в числе которых — галактики, по-видимому, испытывающие взрыв. Кроме того, были открыты *квазары*; они обладают красными смещениями, превышающими красное смещение любых других известных объектов, и их природа все еще не ясна. Свойства пекулярных галактик и квазаров будут кратко описаны в гл. 3.

ПОСТОЯННАЯ ХАББЛА

В течение последних 50 лет сохранялась тенденция к постоянному увеличению оцениваемых расстояний до наиболее далеких объектов во Вселенной. Чем это объяснить? Эти расстояния оцениваются одним параметром — *постоянной Хаббла*. Хаббл показал, что скорость удаления далеких галактик, по-видимому, связана с расстоянием до них соотношением

$$v = Hr, \quad (1.1)$$

где H — постоянная Хаббла. Если v измерять в километрах в секунду, а r — в мегапарсеках, то H будет иметь размерность км/(с·Мпс), следовательно, H^{-1} имеет размерность времени. Эта величина (t_H) характеризует в некотором смысле *возраст Вселенной*. В гл. 8 мы рассмотрим это соотношение более подробно. Первая оценка H , полученная Хабблом, была равна

$$H = 550 \text{ км/(с·Мпс)}, \quad (1.2)$$

а оценка, наиболее часто употребляемая в настоящее время*, составляет

$$H \approx 50 \text{ км/(с·Мпс)}. \quad (1.3)$$

Соответствующие значения хаббловского возраста равны

$$t_H \approx 1,8 \cdot 10^9 \text{ лет}, \quad (1.4)$$

$$t_H \approx 1,9 \cdot 10^{10} \text{ лет}. \quad (1.5)$$

ШКАЛА РАССТОЯНИЙ ВО ВСЕЛЕННОЙ.
КОСМИЧЕСКИЕ ЭТАЛОННЫЕ ИСТОЧНИКИ

В настоящей книге мы будем считать, что знаем расстояния до галактик с приемлемой точностью. Поэтому желательно пояснить, как оцениваются расстояния во Вселенной и как могли возникнуть столь большие расхождения в принимаемых значениях постоянной Хаббла. Нет никакой возможности объяснить на нескольких страницах, как строится шкала космических расстояний. Самое большее, что можно сделать, — перечислить отдельные этапы этой процедуры. Прежде всего следует отметить, что мы не можем проникнуть слишком далеко, основываясь на прямых измерениях расстояний методом тригонометрических параллаксов. Ближайшие звезды имеют параллакс меньше 1".

* В настоящее время все еще имеются серьезные разногласия относительно значения постоянной Хаббла. Некоторые исследователи придерживаются значения 100 км/(с·Мпс), в то время как по оценкам других оно составляет всего лишь 40 км/(с·Мпс). В дальнейшем в этой книге, приводя значения расстояний или других величин, зависящих от выбора H , мы будем принимать $H = 50 \text{ км/(с·Мпс)}$ или специально указывать, как зависит данная величина от H .

Кажется маловероятным, что такое угловое смещение одной звезды на фоне более далеких может быть измерено с высокой точностью. В действительности же мы способны измерять и значительно меньшие параллаксы, но самые маленькие параллаксы, которые доступны сравнительно надежным измерениям, составляют 1/50". Это означает, что мы можем оценить расстояния до звезд, находящихся от нас в пределах 50 пс. Когда было установлено, что расстояние до центра нашей Галактики составляет около 10 кпс, стало ясно, что мы не уйдем далеко, основываясь на методах прямых измерений расстояний. Расстояния, превышающие 50 пс, приходится определять косвенными методами с использованием каких-либо космических эталонов. Космическим эталоном мы назовем такой объект, одна или несколько характеристик которого хорошо известны. Если нам удастся найти такие объекты на больших расстояниях, то для оценки расстояния нужно сопоставить их видимый блеск или размер (если блеск или размер относятся к числу хорошо известных свойств) с имеющимися данными об истинном блеске (светимости) или размере. Тогда главной задачей будет выявление и калибровка таких космических эталонов. Изменения оценок расстояний до галактик связаны главным образом с ошибками в отождествлении космических эталонов.

ЦЕФЕИДЫ

Первым шагом в установлении космической шкалы расстояний является определение расстояний в нашей Галактике и до ближайших галактик. Для этого используются два основных метода: метод *цефеид* и метод *совмещения главных последовательностей звездных скоплений*. Цефеиды относятся к классу звезд, блеск которых испытывает периодические изменения (рис. 1.9). Хотя кривая блеска

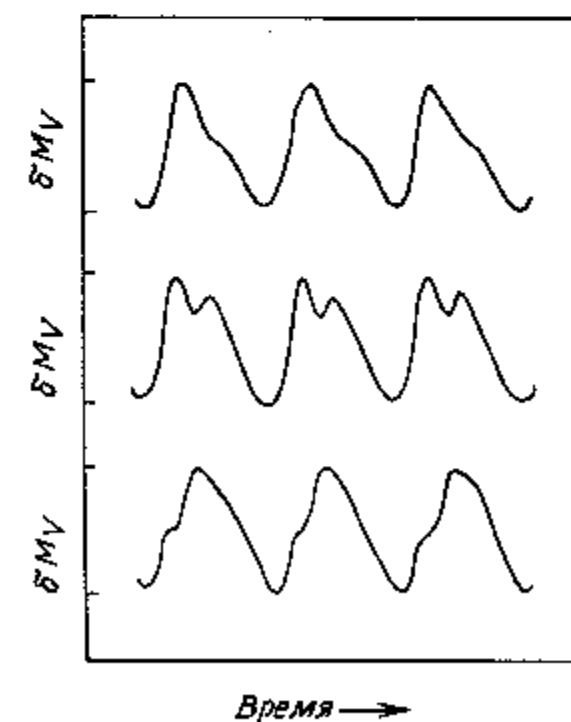


Рис. 1.9. Кривые блеска цефеид. Характерная форма кривой блеска зависит от периода пульсаций. Верхняя кривая относится к цефеидам с самым коротким периодом. Величина M_V пропорциональна логарифму светимости L , взятому со знаком минус.

переменной звезды не является абсолютно гладкой, она хорошо определяется для любой звезды, и существует общая закономерность, связывающая форму кривой блеска и период его изменения. Но еще более важно то, что изучение цефеид в спутнике нашей Галактики Малом Магеллановом Облаке выявило очень тесную зависимость между периодом и светимостью (полной мощностью излучения) цефеид. Эту зависимость для цефеид в Малом Магеллановом Облаке было нетрудно найти, потому что, хотя расстояния до них не известны, разность их значительно меньше расстояния до любой из них, и можно считать, что они находятся на одинаковом расстоянии. Тогда наблюдаемое соотношение между периодом и видимым блеском можно рассматривать как зависимость между периодом и светимостью.

Теперь необходимо прокалибровать эту зависимость, а для этого требуются цефеиды с известной светимостью. Мы узнаем их светимость, если определим расстояние хотя бы до небольшого числа цефеид в нашей Галактике. К сожалению, нет цефеид настолько близких к нам, чтобы можно было бы измерить расстояние до них методом тригонометрических параллаксов. В течение долгого времени это представляло большую проблему. Расстояния до ближайших галактик можно было измерить в единицах расстояния до Малого Магелланова Облака, но чему оно равно — оставалось неизвестным. Затем было обнаружено, что небольшое число цефеид принадлежит к звездным скоплениям нашей Галактики, называемым *галактическими* или *рассеянными*. Эти звездные скопления находятся в диске Галактики и содержат меньше звезд, чем шаровые скопления, о которых мы уже упоминали. Однако, как и шаровые скопления, они являются тесными группами звезд, образующих гравитационно связанные системы. Если бы удалось оценить расстояния до рассеянных скоплений, то можно было бы узнать светимости нескольких цефеид. Поскольку их периоды нам известны, зависимость период — светимость была бы прокалибрована. Чтобы оценить расстояние до рассеянных (или шаровых) скоплений, мы должны воспользоваться некоторыми наблюдаемыми характеристиками ближайших звезд, расстояния до которых нам действительно известны.

МЕТОД СОВМЕЩЕНИЯ ГЛАВНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СКОПЛЕНИЙ

Если нанести на график светимости звезд, расстояния до которых известны, в зависимости от температур их поверхности, то мы получим диаграмму, схематически показанную на рис. 1.10. Она называется диаграммой Герцшпрунга — Рассела. Около 90% близких звезд располагаются на этой диаграмме в области, называемой *главной последовательностью*. Считается, что эти звезды, как и Солнце, в настоящее время светят за счет энергии, которая выделяется в результате ядерных реакций превращения водорода в гелий. Подробнее об этом говорится в книге «Звезды». Рассмотрим теперь звезды скопления

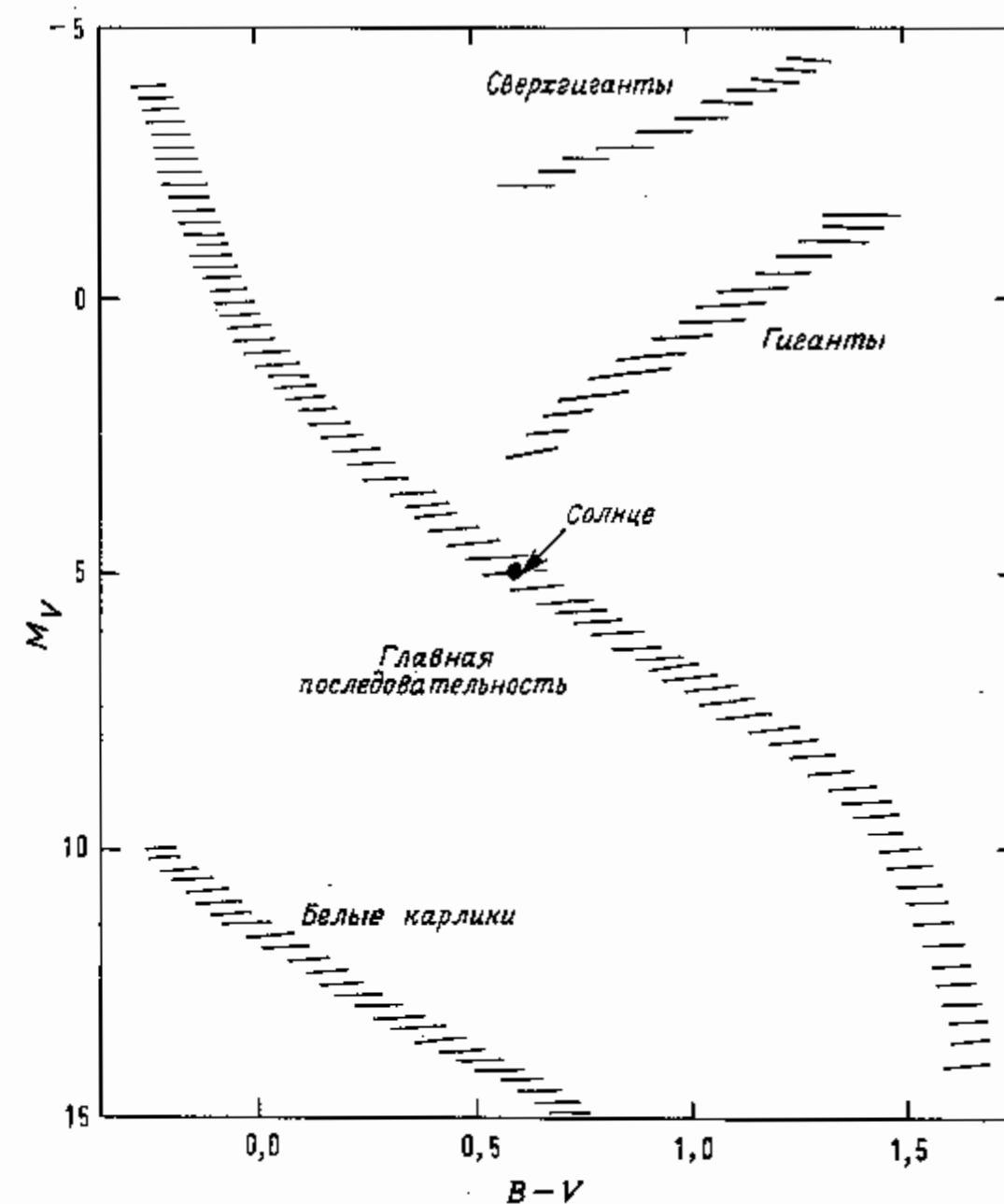


Рис. 1.10. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела для близких звезд. Абсолютная визуальная звездная величина M_V нанесена как функция показателя цвета $B-V$. Большинство звезд относится к четырем хорошо выраженным группам. (M_V пропорционально $-\lg L_s$, а $B-V$ зависит от поверхностной температуры звезды.)

(например, рассеянного). Если мы нанесем на график их видимый блеск в зависимости от температуры поверхности, то получим диаграмму, схематически представленную на рис. 1.11. Для наших целей важна лишь одна особенность этой диаграммы: на ней мы снова имеем группу звезд, образующих последовательность, подобную главной последовательности, хотя ее верхняя часть отсутствует. Если мы примем, что звезды главной последовательности скопления имеют такую же светимость, как и близкие к нам звезды главной последовательности с такой же температурой поверхности, то будет нетрудно оценить расстояние до скопления. Эта процедура называется *совмещением*

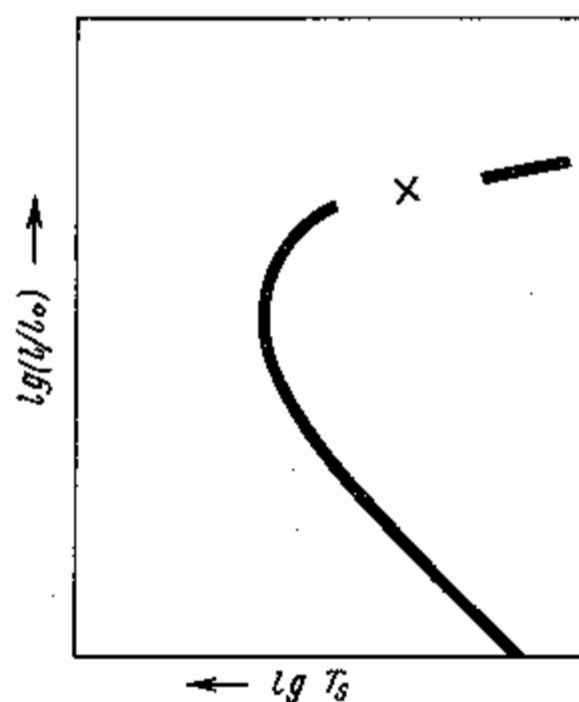


Рис. 1.11. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела для рассеянного звездного скопления. Логарифм видимого блеска нанесен как функция логарифма поверхностной температуры. Крестиком отмечен «разрыв Герцшпрунга», в котором наблюдается очень мало звезд.

главных последовательностей. Считается, что она приводит к довольно надежным оценкам расстояний как до рассеянных, так и до шаровых скоплений Галактики. Таким путем можно оценить расстояние приблизительно до 15 цефеид, поэтому зависимость период — светимость может быть прокалибрована.

СЛЕДУЮЩИЕ ШАГИ В ПОСТРОЕНИИ ШКАЛЫ РАССТОЯНИЙ

Зная зависимость период — светимость цефеид, мы можем теперь с ее помощью оценить расстояние до тех галактик, в которых наблюдаются цефеиды. Это позволяет нам продвинуться примерно до 4 Мпс. Для еще больших расстояний нам нужны другие космические эталоны.

Выберем сначала объекты, находящиеся в галактиках, светимость которых выше, чем у цефеид. К числу этих объектов относятся: а) ярчайшие звезды галактик, б) шаровые скопления, в) области HII, г) новые звезды.

Из этого списка ярчайшие звезды не требуют пояснения, а с шаровыми скоплениями мы уже знакомы. *Области HII* — это светящиеся межзвездные облака ионизованного газа (главным образом водорода). В видимой области спектра они выглядят ярче самых ярких звезд, и поэтому их можно наблюдать в более далеких галактиках. Они выглядят как протяженные объекты, а не как точечные источники, и поэтому мы можем измерить их видимые размеры. *Новые* — это звезды, блеск которых внезапно во много раз увеличивается, а затем постепенно уменьшается. Их максимальный блеск можно найти по исследованиям нашей и соседних галактик. Оказалось, что ярчайшие новые могут служить вполне приемлемыми космическими эталонами.

Если бы все галактики имели одинаковую форму и размеры, то было бы разумно предположить, что светимости ярчайших звезд, размеры областей HII, размеры и светимости шаровых скоплений и максимальная светимость новых звезд в них одинаковы. Однако исследования галактик, расстояния до которых определены методом цефеид, с очевидностью показали, что свойства галактик очень разнообразны. Подробное обсуждение классификации галактик мы отложим до гл. 3, здесь лишь отметим, что существуют два основных типа галактик — *спиральные* и *эллиптические*. Фотографии близких спиральной и эллиптической галактик приведены на рис. 1.12 и 1.13. В свою очередь спиральные галактики классифицируются в соответствии со степенью закрученности их спиральных ветвей, а эллиптические — по степени отклонения их формы от сферической. При использовании упомянутых выше космических эталонов необходимо сравнивать галактики одного и того же типа. Результаты были бы

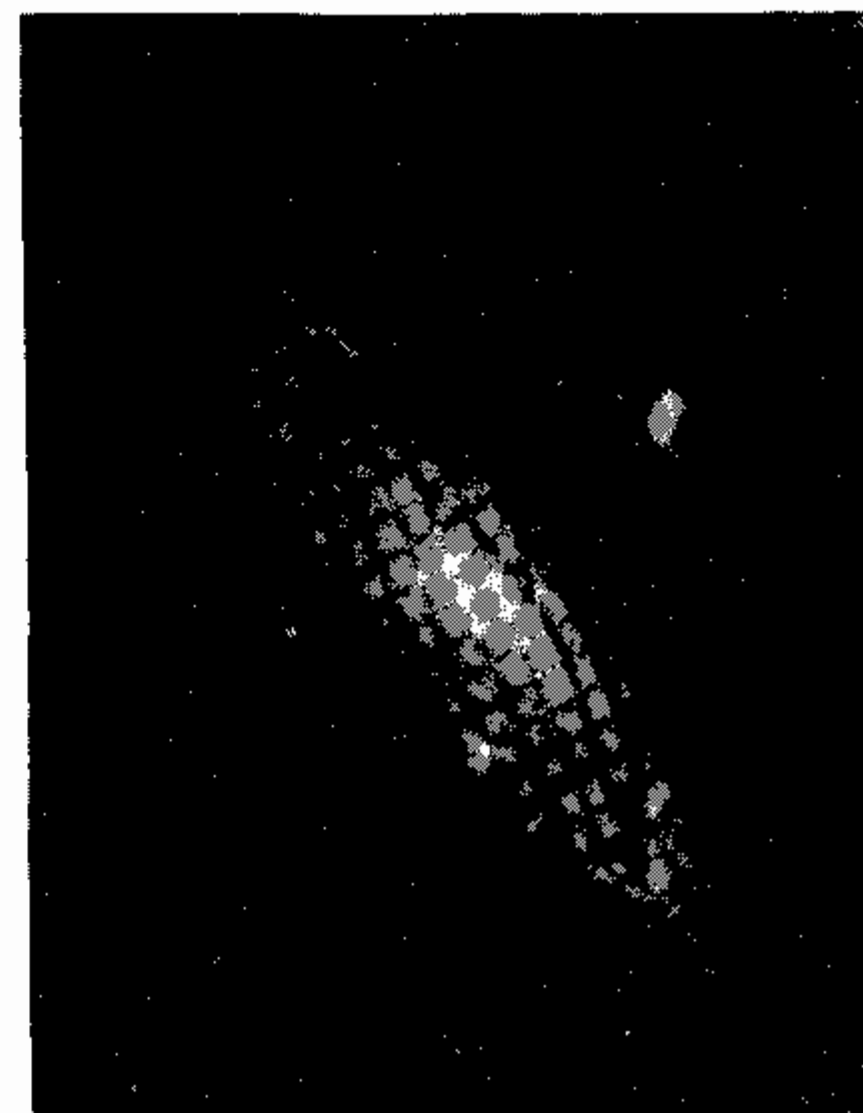


Рис. 1.12. Спиральная галактика. Большая спиральная галактика M31 в созвездии Андромеды (туманность Андромеды). Видны также две эллиптические галактики-спутники. (Фотография обсерваторий им. Хейла.)

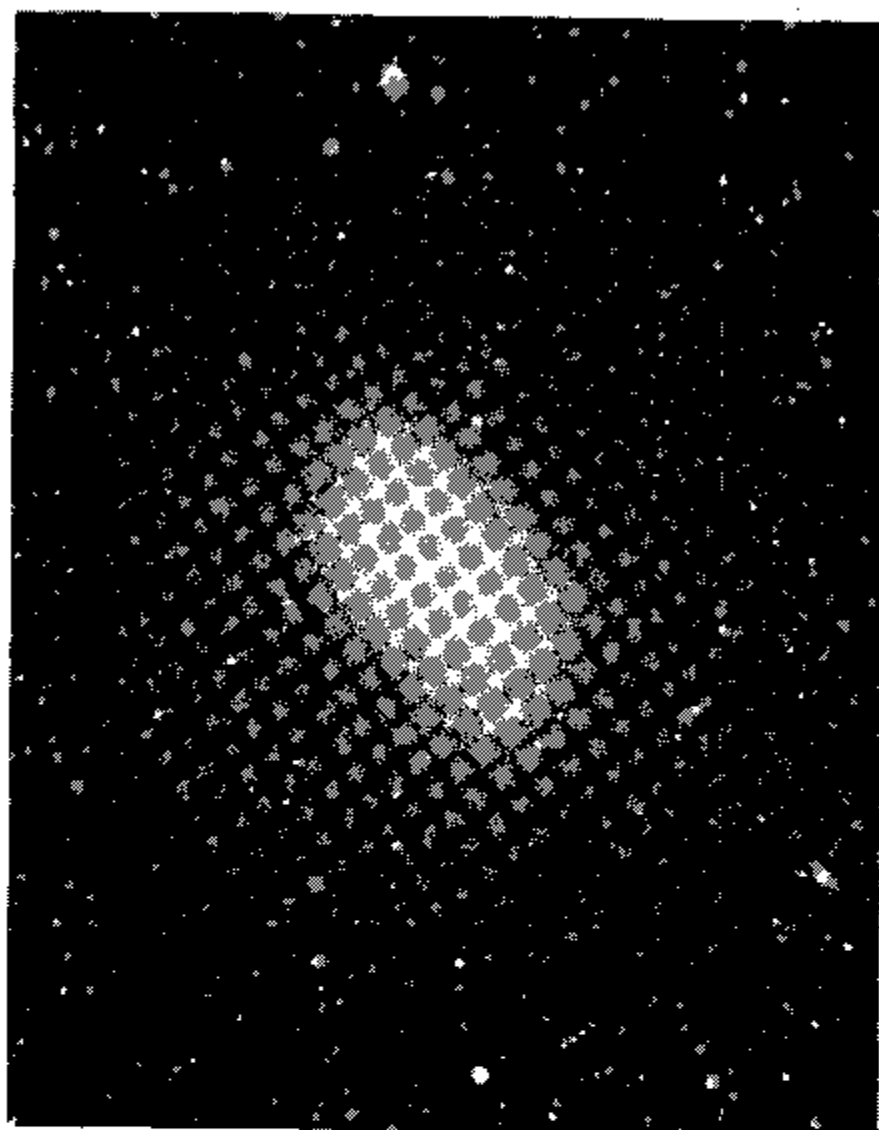


Рис. 1.13. Близкая карликовая эллиптическая галактика NGC 147 в созвездии Андромеды, разрешенная на звезды. (Фотография обсерваторий им. Хейла.)

очень ненадежными, если бы нам пришлось сравнивать объекты, входящие в состав небольшой спиральной галактики, с объектами гигантской эллиптической галактики. Космические эталоны, которые используются чаще всего, — это ярчайшие звезды (для повышения надежности иногда берется средний блеск трех самых ярких голубых звезд, который также зависит от типа галактики, или ярчайших красных звезд), а также области HII. Считается, что области HII позволяют довольно точно оценивать расстояние вплоть до 25 Мпс. Одна из причин, по которой первоначально сделанные Хабблом оценки расстояний во Вселенной оказались неверными, заключалась в том, что он ошибочно принимал области HII в некоторых галактиках за звезды. Поэтому он считал, что светимость этих объектов такая же, как у звезд, а не как у ярких областей HII, у которых она выше. Следовательно, Хаббл недооценивал расстояния до галактик.

Для определения расстояний еще больших, чем те, для которых в качестве космических эталонов применимы области HII или шаровые скопления, мы вынуждены обратиться к интегральным свойствам галактик. Можно разделить галактики на ряд типов (мы уже упоминали, что классификация галактик будет рассмотрена в гл. 3). Можно предположить далее, что галактики одного типа имеют одинаковый размер и (или) светимость, или, иными словами, что средние свойства галактик каждого типа не меняются с расстоянием от нас. Поскольку классификация галактик основывается на наблюдении деталей их структуры, формы, наличия и типа спиральных ветвей и т. д., а эти детали различимы вплоть до очень больших расстояний, то в принципе такой метод позволяет нам проникнуть значительно дальше в глубины Вселенной. Кроме того, мы можем воспользоваться тем обстоятельством, что многие галактики, как оказалось, являются членами скоплений галактик, и попытаться использовать статистические свойства скоплений, чтобы найти космические эталоны, пригодные для окончательного построения шкалы космических расстояний.

ЭВОЛЮЦИЯ СВОЙСТВ ГАЛАКТИК

На этом самом последнем этапе построения шкалы космических расстояний возникает более серьезная неопределенность, чем те, которые встречались на предыдущих этапах. Для сравнительно небольших расстояний у нас не возникает сомнений в возможности использования космических эталонов, если мы можем их обнаружить. Что же касается галактик и их скоплений, то мы наблюдаем их такими, какими они были в далеком прошлом, возможно даже вскоре после своего образования. Имеются ли у нас основания считать, что в далеком прошлом свойства галактик и их скоплений были такими же, как и в настоящее время? Наши представления об эволюции звезд, а следовательно, и об эволюции галактик (они обсуждались в книгах «Звезды» и «Химические элементы») указывают на то, что в современную эпоху их свойства незначительно меняются за промежуток времени 10^9 лет или несколько больше. Поэтому мы можем надеяться, что до расстояния порядка 300 Мпс космические эталоны являются надежными. Для больших расстояний мы не уверены в том, можно ли считать, что свойства галактик не меняются со временем. Как мы уже отмечали на стр. 16, не исключено, что, когда галактики были моложе, они были значительно ярче, и это обстоятельство приводит к неопределенности в построении шкалы космических расстояний. При определении больших расстояний приходится учитывать не только изменение свойств отдельных галактик, но и то, что уже нельзя связывать видимый блеск и светимость, пользуясь законом, согласно которому блеск падает обратно пропорционально квадрату расстояния. Это обусловлено несколькими причинами. Вследствие эффекта красного смещения в спектрах далеких галактик при сравнении галактик, находя-

щихся на различных расстояниях, мы не можем непосредственно сопоставлять приходящее от них излучение в одном и том же спектральном интервале. К тому же, если считать, что Вселенная расширяется и что ее крупномасштабные свойства описываются общей теорией относительности Эйнштейна, то простые евклидовы представления о расстоянии неприменимы. Тогда мы приходим к выводу, что проблема шкал космических расстояний почти безнадежно переплетена с космологическими проблемами. Об этом пойдет речь в гл. 8.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ КНИГИ

Те неопределенности, о которых шла речь выше, не связаны с содержанием большей части этой книги. Нас будут интересовать наша Галактика и другие галактики различных типов, но того же возраста, что и Галактика. Мы всегда будем считать расстояния до галактик известными, за исключением тех случаев, когда предмет обсуждения имеет некоторое отношение к определению расстояний. Следующие две главы будут посвящены наблюдаемым свойствам галактик. В гл. 2 речь пойдет о нашей Галактике, а в гл. 3 — о других галактиках. Подобное разделение в значительной степени оправдано, поскольку методы изучения нашей и других галактик различаются. Хотя мы намереваемся посвятить обе главы наблюдениям, мы увидим, что очень редко можно ограничиться одними наблюдениями. В большинстве случаев, чтобы была возможна их правильная интерпретация, наблюдения должны рассматриваться вместе с определенными теоретическими идеями. Поэтому материал книги не образует единой логической последовательности. Большинство рассматриваемых аспектов тесно связаны друг с другом. Мы уже отмечали это, когда говорили о том, что нельзя дать исчерпывающий анализ проблемы определения шкалы космических расстояний, не затрагивая при этом свойств нашей и других галактик.

Далее следуют пять глав, в которых в большей степени затрагиваются вопросы теории. Гл. 4 по содержанию несколько отличается от остальных глав книги, хотя ряд ее выводов используется в последующем изложении. В этой главе галактика рассматривается в первую очередь как скопление звезд. Их можно считать своего рода молекулами газа, поэтому к галактике могут быть применимы статистические методы, хорошо известные в кинетической теории газов. В гл. 5 мы расскажем о том, как «взвешивают» галактики. Массы галактик в определенном смысле являются наблюдаемыми параметрами, так что этот материал можно было бы поместить в гл. 2 и 3. Однако при оценке массы из наблюдений очень велика роль теории, поэтому целесообразно посвятить этой теме отдельную главу. В гл. 6 обсуждаются не звездные составляющие галактик (газ, пыль, космические лучи и магнитные поля). В гл. 7, посвященной химической эволюции галактик, межзвездный газ рассматривается в ином аспекте. В ней

обсуждается вопрос о том, каким образом химический состав межзвездной среды, а следовательно, и молодых звезд меняется в процессе эволюции галактики. Причиной этого изменения является то, что при ядерных реакциях, происходящих в звездах, из легких химических элементов образуются тяжелые, и часть вещества, подвергшегося такой переработке, выбрасывается звездой в межзвездную среду. С несколько иных позиций этот процесс рассматривался в книге «Химические элементы», однако с тех пор, как она была написана, были получены новые важные результаты в этой области. В гл. 8 мы подходим к разделу, содержащему наименее надежные результаты. Речь пойдет об образовании и ранней стадии эволюции галактик и связанных с этим космологических проблемах. Наконец, в гл. 9 сделана попытка подвести итог тому, что можно считать хорошо установленным, а что еще предстоит установить.

Вопрос о строении и эволюции галактик относится к числу тех, которые в настоящее время очень интенсивно исследуются как в теоретическом, так и наблюдательном аспекте. Хотя в этой области исследований наблюдается быстрый прогресс, многие новые открытия заставляют пересмотреть выводы, которые казались надежно установленными. В конце книги я попытался выделить основные идеи, избегая называть надежно установленным то, что в действительности сейчас таковым не является. Цель книги будет достигнута, если она сможет убедить читателей, что тема, которой она посвящена, очень интересна и поэтому стоит попытаться ближе познакомиться с научными исследованиями в данной области. В настоящее время нам кажется, что должны пройти десятилетия, а не годы, прежде чем можно будет написать достаточно завершенную книгу о галактиках.

Наблюдения Галактики

ВВЕДЕНИЕ

В этой главе содержится описание свойств нашей Галактики. Она посвящена главным образом результатам наблюдений, хотя, как мы уже отмечали выше, наблюдения в большинстве случаев требуют теоретической интерпретации. Галактика — это прежде всего звездная система, поэтому мы начнем с перечисления ряда свойств звезд различных типов. Как мы увидим ниже, существует большая неопределенность в оценке полной массы Галактики и ее отдельных составляющих, однако мы вряд ли сильно ошибемся, если будем считать, что около 95% ее массы заключено в звездах (в том числе в угасших остатках звезд) и около 5% приходится на *межзвездный газ и пыль**. Кроме того, Галактика пронизывается потоками *космических лучей* — заряженных частиц колоссальной энергии. Они вносят незначительный вклад в полную массу Галактики, хотя, как будет показано в гл. 6, их полную энергию необходимо учитывать при исследовании структуры межзвездной среды. Наконец, газ в Галактике пронизан *магнитным полем*, изучение которого представляет самостоятельный интерес и имеет большое значение для развития наших представлений о Галактике. Одно из свойств магнитного поля заключается в том, что оно влияет на движение космических лучей, заставляя их проводить в Галактике значительно больше времени, чем в случае, если бы оно не существовало. Теперь мы рассмотрим каждую из составляющих Галактики по очереди, частично отложив детальное обсуждение свойств незвездных составляющих до гл. 6. Сначала обратимся к системе звезд.

СВОЙСТВА ЗВЕЗД

Мы уже рассказывали о том, каким образом можно получить информацию о расстояниях, собственных движениях и лучевых скоростях близких звезд. Как было объяснено, эти величины определяют в основном по звездам, находящимся в непосредственной близости от нас, что связано главным образом с трудностями, возникающими при измерении параллакс. Если мы хотим изучать свойства звезд, расположенных в значительно большей области пространства, то должны в дополнение к методу тригонометрических параллакс использовать другие методы оценки расстояний, например метод цефеид

или метод совмещения главных последовательностей скоплений, рассмотренные в гл. 1. Но цефеиды — это особый, редко встречающийся тип звезд, а метод совмещения главных последовательностей пригоден лишь для определения расстояний до звездных скоплений, а не до отдельных звезд. Прежде чем перейти к другому методу оценки расстояний, остановимся на некоторых характеристиках звезд, которые нам потребуются в дальнейшем и которые детально обсуждались в книге «Звезды».

На рис. 1.10 мы уже показывали, как выглядит диаграмма Герцшпрунга — Рассела для близких звезд. Мы также рассказывали, каким образом сопоставление этих диаграмм для звездных скоплений (рис. 1.11) позволяет определить расстояния до них путем совмещения главных последовательностей. Большинство звезд принадлежит к главной последовательности, поэтому во многих случаях можно получить приемлемую оценку расстояния до отдельных звезд, считая, что их светимость такая же, как у звезды главной последовательности с такой же температурой поверхности. Этот метод абсолютно непригоден для небольшого числа звезд, которые не принадлежат к главной последовательности, например для гигантов, сверхгигантов или белых карликов. К счастью, существуют способы, позволяющие узнать, относится или нет данная звезда к одной из этих категорий, даже если мы не знаем расстояния до нее. Они основаны на детальном изучении света, испускаемого звездой, т. е. ее *спектра*.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ КЛАССЫ

Звезды были разделены на *спектральные классы* в зависимости от того, какие линии в их спектрах наиболее заметны. Когда была предложена такая классификация и введены обозначения классов латинскими буквами A, B, C, ..., порядок следования классов оставался в значительной мере произвольным. Считалось, что звезды различных спектральных классов сильно отличаются друг от друга по химическому составу. Позднее было показано, что в большинстве случаев важнейшим фактором, определяющим, какие линии в спектре наиболее сильны, а следовательно, и спектральный класс звезды, является не химический состав, а температура ее поверхности. Выяснилось, что некоторые первоначально введенные спектральные классы излишни, а остальные можно расположить в такой последовательности, вдоль которой уменьшается поверхностная температура звезды:

O B A F G K M R N S*.

* Речь идет о массе видимого вещества Галактики. — Прим. ред.

* Эту последовательность можно легко запомнить с помощью следующей мнемонической фразы: Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now, Sweetheart.

Таблица 2.1

Основные линии спектра и приближенное значение температуры поверхности звезд различных спектральных классов

O	Линии ионизованных гелия и металлов; слабые линии водорода	$5 \cdot 10^4$ K
B	Линии нейтрального гелия и ионизованных металлов; более сильные линии водорода	$2 \cdot 10^4$ K
A	Бальмеровские линии водорода наиболее заметны; линии однократно ионизованных металлов	10^4 K
F	Линии нейтрального водорода слабее; линии нейтральных и однократно ионизованных металлов	$7,5 \cdot 10^3$ K
G	Наиболее сильные линии принадлежат однократно ионизованному кальцию; линии водорода слабее; линии нейтральных металлов	$6 \cdot 10^3$ K
K	Линии нейтральных металлов; появляются молекулярные полосы	$5 \cdot 10^3$ K
M	Преобладают линии окиси титана; линии нейтральных металлов	$3,5 \cdot 10^3$ K
R, N	Молекулярные полосы CN, CH; линии нейтральных металлов	$3 \cdot 10^3$ K
S	Полосы окиси циркония; линии нейтральных металлов	$3 \cdot 10^3$ K

В табл. 2.1 приведены наиболее важные спектральные особенности звезд каждого класса и соответствующая температура поверхности. Обратите внимание на то, что температурная последовательность заканчивается на классе K, а для звезд более поздних спектральных классов, важной спектральной особенностью которых являются молекулярные полосы, существенную роль играют небольшие различия в химическом составе. Звезды, относящиеся к классам O, B, A, называют звездами ранних спектральных классов, F и G — звездами промежуточных спектральных классов и K, M, R, N, S — звездами поздних спектральных классов. Теперь известно, что звезды отличаются друг от друга по химическому составу в значительно меньшей степени, чем это считалось, когда начиналась разработка спектральной классификации. Однако, как мы увидим ниже в гл. 7, существующие различия все же имеют большое значение.

КРИТЕРИИ СВЕТИМОСТИ

Можно ли отличить звезды-гиганты от звезд главной последовательности по их спектрам? Чтобы ответить на этот вопрос, выясним, в чем заключается основное различие между звездами-гигантами и звездами главной последовательности, имеющими оди-

наковую поверхностную температуру. На рис. 1.10 видно, что звезды-гиганты имеют гораздо более высокую светимость. Если считать, что звезды излучают как абсолютно черное тело, то между их светимостью L_s , радиусом r_s и температурой поверхности T_s должна существовать простая зависимость

$$L_s = \pi a c r_s^2 T_s^4, \quad (2.1)$$

где a — постоянная Стефана — Больцмана, а c — скорость света. Наблюдаемое соотношение между этими параметрами для большинства звезд мало отличается от (2.1)*. Если две звезды имеют одинаковую температуру поверхности и сильно различаются по светимости, то звезда большей светимости должна иметь больший радиус. Следовательно, гиганты и сверхгиганты имеют значительно большие размеры, чем звезды главной последовательности с той же температурой поверхности; именно этим и объясняются их названия. Рассуждая аналогичным образом, можно прийти к выводу, что белые карлики значительно меньше, чем звезды главной последовательности с такой же температурой поверхности.

Спектр звезды отчасти зависит от ее химического состава, однако в значительно большей мере он определяется степенью ионизации и возбуждения атомов тех химических элементов, из которых состоят видимые приповерхностные слои звезды. Степень ионизации определяется главным образом температурой звездной атмосферы, но она зависит и от ее плотности; чем ниже плотность, тем выше степень ионизации (см. приложение 1). Хотя массы звезд-гигантов и звезд главной последовательности оказались приблизительно одинаковыми, по размеру гиганты значительно превосходят их, поэтому плотность гигантов ниже. Как следствие этого, степень ионизации вещества в атмосферах звезд-гигантов и звезд главной последовательности различна при одинаковой температуре поверхности. Линии, заметные в спектрах звезд-гигантов и звезд главной последовательности, несколько отличаются друг от друга. Это обстоятельство позволяет разработать критерии светимости, с помощью которых можно выяснить, является ли звезда гигантом, и в итоге получить значительно более правильное представление о ее расстоянии от Солнца. В конечном счете это дает возможность узнать о распределении звезд в Галактике на расстояниях, значительно больших, чем те, для которых пригоден метод тригонометрических параллаксов.

* Астрономы-теоретики ввели для удобства величину, называемую эффективной температурой T_e и определяемую уравнением

$$L_s = \pi a c r_s^2 T_e^4. \quad (2.1a)$$

Она равна температуре абсолютно черного тела, имеющего такие же радиус и светимость, как и данная звезда.

ЗАВИСИМОСТЬ МАССА – СВЕТИМОСТЬ И ВОЗРАСТ ЗВЕЗД

Теперь мы рассмотрим некоторые характеристики звезд, дающие нам возможность получить информацию об их возрасте. Прежде всего остановимся на зависимости *масса – светимость* для звезд главной последовательности (рис. 2.1). Было установлено, что светимость близких звезд главной последовательности сильно зависит от их массы. Эта зависимость не описывается простым степенным законом, однако для достаточно широкого интервала масс ее можно представить в виде

$$L_s \propto M_s^4. \quad (2.2)$$

Считается, что звезды главной последовательности излучают за счет энергии, выделяющейся в их центральных областях при термоядерных реакциях превращения водорода в гелий. При этих реакциях освобождается энергия, пропорциональная массе вступившего в реакцию водорода, поэтому полный запас ядерной энергии E_N удовлетворяет соотношению

$$E_N \propto M_s. \quad (2.3)$$

Отсюда следует, что продолжительность пребывания звезды на главной последовательности t_{ms} описывается приближенным соотношением

$$t_{ms} \propto M_s^{-3}. \quad (2.4)$$

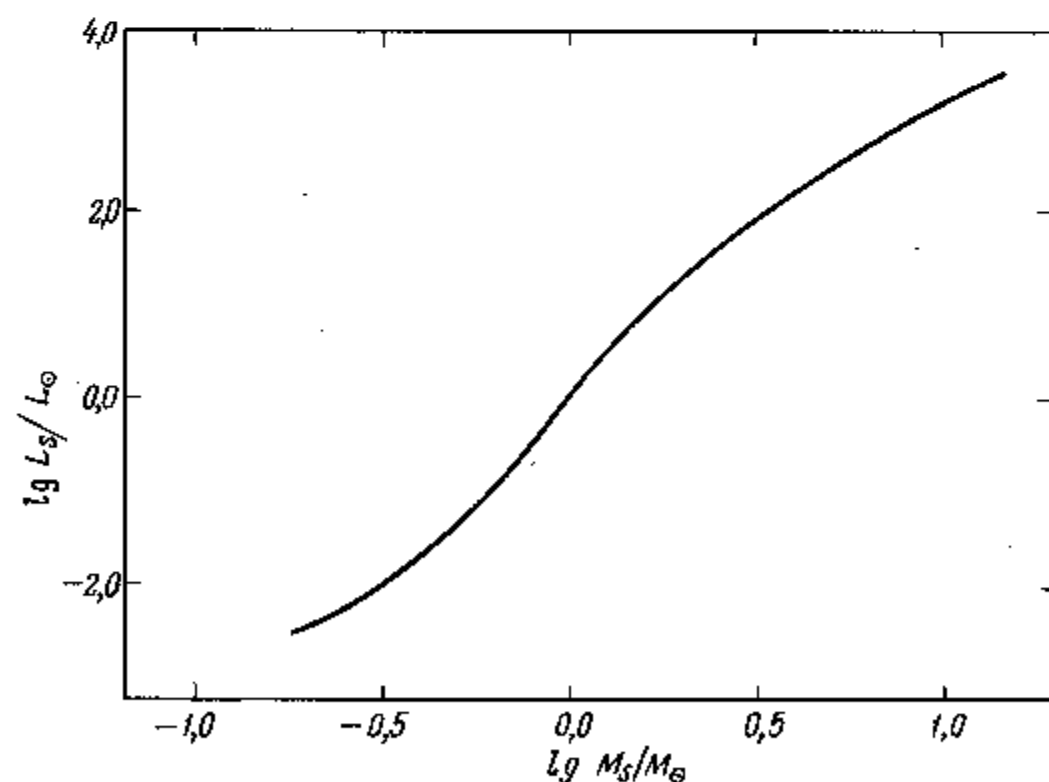


Рис. 2.1. Зависимость масса – светимость для ближайших звезд главной последовательности.

Таблица 2.2

Приближенная продолжительность жизни звезд различных масс на главной последовательности

M_s/M_\odot	Продолжительность жизни, годы	M_s/M_\odot	Продолжительность жизни, годы
15,0	$1,0 \cdot 10^7$	1,5	$1,7 \cdot 10^9$
9,0	$2,2 \cdot 10^7$	1,25	$3,0 \cdot 10^9$
5,0	$6,8 \cdot 10^7$	1,0	$8,2 \cdot 10^9$
3,0	$2,3 \cdot 10^8$	0,75	$2,4 \cdot 10^{10}$
2,25	$5,0 \cdot 10^8$	0,5	$1,2 \cdot 10^{11}$

Это означает, что время жизни звезды на главной последовательности является быстро убывающей функцией ее массы. Оценки времени жизни звезды на главной последовательности, полученные по расчетам звездной эволюции (о них было рассказано в гл. 6 книги «Звезды»), приведены в табл. 2.2.

Время существования звезды на главной последовательности не очень сильно отличается от полной продолжительности ее жизни, потому что суммарное количество энергии, освобождающееся при превращении гелия в более тяжелые химические элементы, значительно меньше энергии, которая выделяется при превращении водорода в гелий. Отсюда следует, например, что массивные звезды, которые образовались в то время, когда Галактика была молодой (10^{10} лет назад или более), давно уже завершили свой жизненный путь. Что касается наблюдаемых звезд главной последовательности, то цифры, приведенные в табл. 2.2, можно рассматривать как верхние пределы их возраста. Очень большое значение для нас имеют оценки верхнего предела возрастов звезд ранних спектральных классов О, В, А. Они свидетельствуют о том, что звезды классов О и В, наблюдаемые в настоящее время, должны были возникнуть совсем недавно в масштабах истории Галактики. Оценки верхнего предела возраста звезд классов G, K и M не несут никакой информации о возрасте отдельных звезд главной последовательности, принадлежащих к этим классам. Подобные звезды, даже если бы они возникли одновременно с Галактикой ($10^{10} - 2 \cdot 10^{10}$ лет назад), все еще находились бы на главной последовательности. Однако мы можем взглянуть на этот факт с иной точки зрения. Поскольку такие звезды еще не проэволюционировали с главной последовательности, число звезд-карликов* классов G, K или M отражает полное число звезд небольшой

* Звезды главной последовательности часто называют карликами, так как они значительно меньше по размеру, чем гиганты.

массы, образовавшихся за всю историю Галактики. Сведения о возрастах звезд понадобятся нам ниже, и в первую очередь при обсуждении эволюции химического состава Галактики (гл. 7).

ПОЛОЖЕНИЕ И ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА

Обратимся к вопросу о положении и движении звезд в окрестностях Солнца. Итак, нам уже известно, что можно достаточно уверенно отличить звезды-гиганты от звезд-карликов и определить расстояние до них. Наблюдения показывают, что большинство звезд, находящихся вблизи Солнца, да и во всей Галактике, сконцентрированы в тонкий диск (рис. 2.2). Положение плоскости Галактики четко обозначено полосой Млечного Пути, а центр Галактики находится в направлении наиболее плотных звездных облаков в созвездии Стрельца. Млечный Путь образует на небе большой круг, значит, Солнце в настоящее время расположено вблизи плоскости симметрии Галактики. Существующие оценки показывают, что его расстояние от этой плоскости не превышает 10 пс. Хотя большинство звезд в окрестностях Солнца заключено в пределах тонкого диска, видимая толщина этого диска зависит от спектрального класса изучаемых звезд (табл. 2.3). Из табл. 2.3 следует, что звезды ранних спектральных классов, определенно являющиеся молодыми, сконцентрированы в более тонкий диск, чем звезды поздних классов, средний возраст которых больше.

Хотя Солнце расположено вблизи плоскости симметрии Галактики, оно, конечно, не находится в состоянии покоя, а движется под

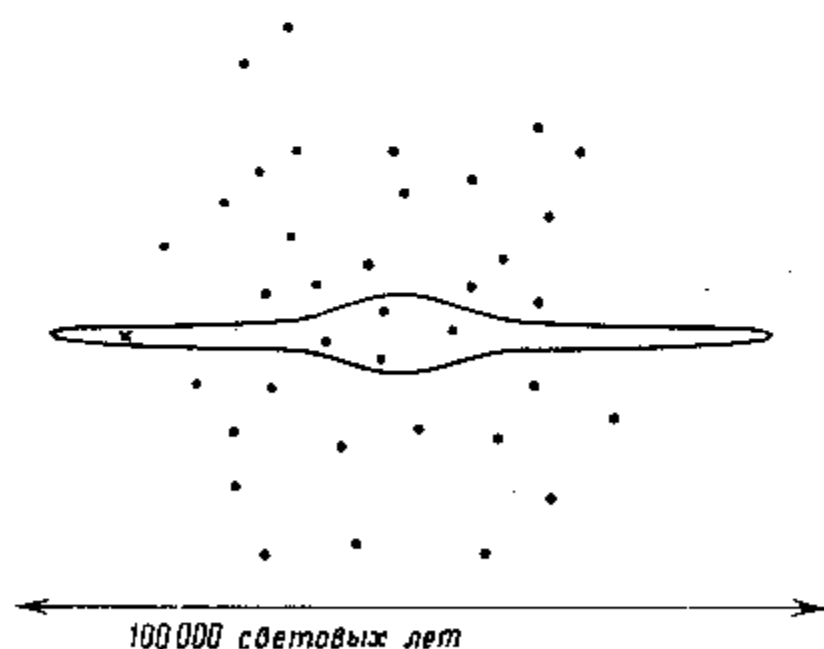


Рис. 2.2. Схематический вид Галактики при наблюдении «извне». Показан тонкий галактический диск и центральное утолщение. Положение Солнца отмечено крестиком, точки — шаровые скопления.

Таблица 2.3

Полутолщина галактического диска для звезд различных спектральных классов и межзвездной среды

Последние две строки относятся к объектам гало

Объект	Полутолщина диска, пс
Звезды класса O	50
Звезды класса B	60
Звезды класса A	115
Звезды класса F	190
Звезды-карлики класса G	340
класса K	350
класса M	350
Звезды-гиганты класса G	400
класса K	270
Межзвездные газ и пыль	100
Звезды с большой пространственной скоростью	3000
Шаровые скопления	4000

действием гравитационного притяжения всех других звезд. Как определить, в каком направлении и с какой скоростью движется Солнце? Прежде всего мы должны хорошо уяснить себе, что звезда, обладающая типичной наблюдаемой скоростью, пересекла бы диск Галактики за время, не превышающее нескольких десятков миллионов лет, т. е. значительно меньшее, чем возраст Галактики. Звезда, удаляющаяся от плоскости симметрии диска, будет притягиваться к этой плоскости всеми остальными звездами, так что за время существования Галактики звезда должна совершить много колебаний поперек диска*. Отсюда следует, что звездная система должна находиться в стационарном состоянии, т. е. должно существовать примерно одинаковое число звезд, удаляющихся от плоскости симметрии Галактики и приближающихся к ней. В этом можно убедиться, если выбрать подходящую систему отсчета (в которой звезды двигались бы в среднем лишь перпендикулярно плоскости симметрии Галактики. — *Перев.*). Поскольку маловероятно, чтобы Солнце в этой системе отсчета находилось в покое, можно ожидать существования асимметрии в распределении скоростей звезд относительно Солнца. Эта асимметрия действительно наблюдается.

* Об этих колебаниях звезд подробнее будет идти речь на стр. 120.

ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА СКОРОСТЕЙ

Введем понятие *локальной системы отсчета* (LSR) — системы отсчета, в которой скорости звезд распределены наиболее симметрично*. Мы можем найти скорость Солнца по отношению к этой локальной системе отсчета. Возьмем как можно более полную выборку звезд в окрестностях Солнца. Пусть в системе отсчета, связанной с Солнцем, в которой само Солнце покоится, компоненты скорости i -й звезды равны (u_i, v_i, w_i) . Тогда средняя скорость локальной системы отсчета относительно Солнца будет иметь компоненты

$$(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) = (\sum u_i/N, \sum v_i/N, \sum w_i/N)** \quad (2.5)$$

где N — полное число рассматривавшихся звезд, а знак \sum означает сумму соответствующих величин для всех этих звезд. Будем считать, что локальная система отсчета движется с этой скоростью относительно Солнца. Тогда *скорость Солнца* относительно нее составит

$$(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = -(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}). \quad (2.6)$$

ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И СЛУЧАЙНЫЕ СКОРОСТИ ЗВЕЗД

Если проделать описанную выше процедуру, то можно прийти к двум важным выводам.

Первый вывод касается распределения случайных скоростей звезд $(u_i - \bar{u}, v_i - \bar{v}, w_i - \bar{w})$. Они не распределены изотропно относительно локальной системы отсчета. До сих пор мы не определили систему координат. Выберем теперь цилиндрическую систему с координатами $\tilde{\omega}, \phi, z$ (рис. 2.3). В этой системе ось z направлена перпендикулярно плоскости симметрии Галактики, а $\tilde{\omega}$ — расстояние от оси симметрии, проходящей через центр Галактики. Если в этой системе координат локальная система отсчета неподвижна, а звезды имеют составляющие скорости $v_{\tilde{\omega}}, v_{\phi}, v_z$ относительно нее, то

$$\langle v_{\phi}^2 \rangle \approx \langle v_z^2 \rangle \approx 0,4 \langle v_{\tilde{\omega}}^2 \rangle. \quad (2.7)$$

Здесь угловые скобки означают усреднение по всем звездам. Ниже мы увидим, что Галактика вращается как единое целое, поэтому локальная система отсчета движется со скоростью $v_{\phi 0}$ в невращающейся системе координат. Удобно перейти к этой системе, и тогда выра-

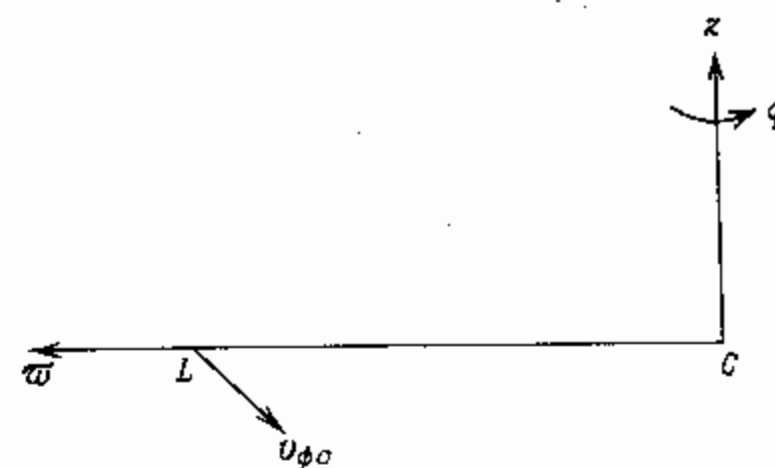


Рис. 2.3. Цилиндрическая система координат $\tilde{\omega}, \phi, z$, используемая при описании строения Галактики. C — центр Галактики, L — локальная система отсчета, $v_{\phi 0}$ — ее скорость относительно C .

жение (2.7) примет вид

$$\langle (v_{\phi} - v_{\phi 0})^2 \rangle \approx \langle v_z^2 \rangle \approx 0,4 \langle v_{\tilde{\omega}}^2 \rangle. \quad (2.8)$$

Как будет показано в гл. 4, вывод о том, что случайные скорости звезд в радиальном направлении больше, чем в двух других, имеет очень большое значение. Наилучшие оценки скоростей движения Солнца относительно локальной системы отсчета равны

$$v_{\tilde{\omega} \odot} = -10,4 \text{ км/с}, v_{\phi \odot} = 14,8 \text{ км/с}, v_{z \odot} = 7,3 \text{ км/с}. \quad (2.9)$$

ЗВЕЗДЫ С БОЛЬШИМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ СКОРОСТЯМИ

Другой вывод, к которому приводит анализ движений звезд, заключается в том, что скорость движения Солнца оказывается несколько различной, если ее определять по звездам ранних и поздних спектральных классов. Еще одно значение для скорости Солнца можно получить, если учитывать только те звезды, скорости которых относительно Солнца особенно велики; такие звезды называют *звездами с большой пространственной скоростью*.

Как мы уже знаем, звезды ранних спектральных классов — это молодые звезды, тогда как звезды поздних спектральных классов могут иметь любой возраст. Следовательно, Солнце движется по-разному относительно звезд различного возраста, а это означает, что мы должны рассматривать Галактику состоящей из нескольких систем звезд. Ниже будет показано, что быстрые звезды, по-видимому, имеют очень большой возраст.

При изучении движения звезд в окрестностях Солнца было обнаружено, что все очень молодые звезды имеют сравнительно небольшие скорости (10–20 км/с) по отношению к локальной системе отсчета и, следовательно, они должны находиться в пределах тонкого диска.

* В специальной литературе по звездной астрономии используется также термин «центроид скоростей околосолнечных звезд». — Прим. ред.

** Здесь считается, что наблюдения всех звезд имеют одинаковый вес. В действительности наблюдения отличаются друг от друга по степени надежности, поэтому наиболее надежные оценки принято использовать с большим весом.

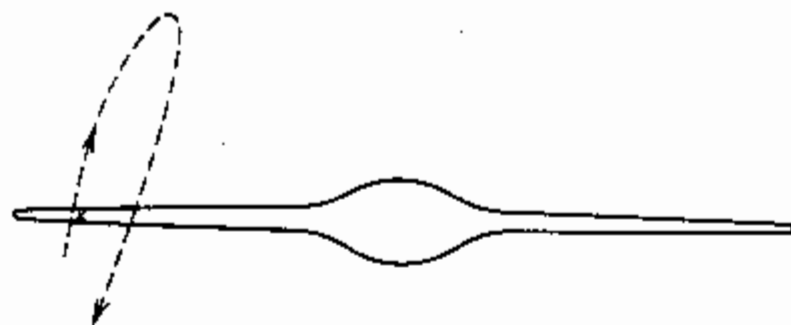


Рис. 2.4. Орбита звезды гало. Звезда должна проходить через диск Галактики. Положение Солнца отмечено крестиком, в выбранной здесь системе отсчета оно покоится.

Но небольшая часть звезд поздних спектральных классов, возраст которых невозможно оценить непосредственно, имеет скорости до нескольких сотен км/с относительно локальной системы отсчета. Обладающая такими скоростями, эти быстрые звезды в состоянии удалиться от плоскости Галактики на много килопарсеков, прежде чем гравитационное поле Галактики «завернет» их обратно. Это означает, что большую часть жизни они проводят в *гало* Галактики — там, где находятся шаровые звездные скопления (рис. 2.2). Это наглядно демонстрирует одно из важнейших свойств Галактики, о котором речь пойдет ниже (в гл. 4). Любая галактика представляет собой динамическую систему, в которой каждая звезда движется в гравитационном поле, создаваемом всеми остальными звездами. Звезды гало, или сферической составляющей, должны периодически проходить через диск (рис. 2.4). Поэтому звезды, которые в настоящее время наблюдаются в окрестностях Солнца, не останутся здесь навсегда. Хотя мы не можем совершить космический полет в гало, чтобы на месте изучить его звездный состав, мы можем составить представление о звездах гало по тем звездам, которые пролетают мимо нас. Таким способом нам, по-видимому, удастся узнать даже больше, чем если бы мы жили на планете, обращающейся вокруг звезды, принадлежащей к сферической составляющей. Ведь тогда мы могли бы наблюдать в своих окрестностях звезды диска лишь в том случае, если бы мы жили во время одного из периодических проходов нашего Солнца через диск Галактики. Но, с другой стороны, если бы мы находились в гало, то это позволило бы нам значительно лучше видеть всю структуру Галактики.

ЗАВИСИМОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗВЕЗД ОТ ИХ ВОЗРАСТА И ПОЛОЖЕНИЯ В ГАЛАКТИКЕ

Мы считаем, что быстрые звезды, как и шаровые звездные скопления, принадлежат к населению гало, т. е. к сферической

Мы считаем, что быстрые звезды, как и шаровые звездные скопления, принадлежат к населению гало, т. е. к сферической составляющей. Известно, что за время жизни шаровое скопление

может потерять часть звезд. Поэтому не исключено, что практически все быстрые звезды когда-то были членами скоплений. Они могли возникнуть в скоплениях, а затем их покинуть. Исследование диаграмм Герцшпрунга — Рассела шаровых скоплений дает возможность оценить их возраст. Как производится такая оценка, описано в гл. 6 книги «Звезды», где говорилось, что типичный возраст шаровых скоплений равен $1,5 \cdot 10^{10}$ лет. Хотя точность этой оценки мала и ошибка может достигать 50% указанного значения, можно утверждать, что шаровые скопления — это наиболее старые образования, которые нам известны в Галактике. Такой же возраст имеют, по-видимому, и быстрые звезды. Звезды шаровых скоплений и быстрые звезды содержат значительно меньше химических элементов тяжелее гелия (по отношению к полной массе звезды), чем большинство звезд диска. Отношение содержания тяжелых элементов в звездах диска к содержанию их на Солнце обычно лежит в пределах от $1/2$ до 2, причем на Солнце на долю элементов тяжелее водорода и гелия приходится около 2% массы. Что же касается некоторых шаровых скоплений и быстрых звезд, то содержание тяжелых элементов по отношению к содержанию их на Солнце составляет $1/200$ или даже меньше.

Подробное обсуждение зависимостей между химическим составом, возрастом и положением звезд в Галактике мы отложим до гл. 7. Здесь мы лишь отметим, что эти характеристики звезд очень важны, и любая теория эволюции Галактики должна дать им объяснение. Следует сделать еще одно замечание, касающееся шаровых скоплений. Хотя мы говорим о них как об объектах гало, они образуют приблизительно сферическую систему, симметричную относительно центра Галактики, и некоторые из них никогда не уходят от галактического центра дальше, чем на несколько килопарсеков. Если сопоставить химический состав шаровых скоплений с максимальным расстоянием от центра, на которое они могут проникнуть в глубь гало, то окажется, что содержание тяжелых элементов в среднем более высокое у тех скоплений, которые находятся ближе к центру Галактики. Сделаем еще одно замечание относительно химического состава звезд. Обычно считают, что в начале своей эволюции Галактика была лишена тяжелых элементов, так что первые образовавшиеся звезды также их не содержали. Хотя нам известны звезды с очень низким содержанием тяжелых элементов, не обнаружено звезд, в которых они вообще бы отсутствовали. Говорит ли это о том, что таких звезд не существует или же что они прячутся далеко от нас в галактическом гало? Здесь мы лишь отметим, что наблюдаемое отсутствие подобных звезд позволяет ограничить их возможное число, ведь звезды гало должны регулярно проходить через диск. Ряд замечаний по этому поводу будет сделан в гл. 5 и 7.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

Выше мы говорили о том, что Галактика вращается, и поэтому локальная система отсчета движется относительно ее центра. Теперь мы рассмотрим, каков характер этого вращения. Вращение Галактики было открыто в середине 20-х годов нашего века. Вскоре стало очевидно, что без учета вращения нельзя объяснить большую степень сплюснутости галактического диска. Конечно, всегда можно выбрать такую систему координат, в которой локальная система отсчета не вращается относительно центра Галактики, поэтому следует уточнить, что мы имеем в виду, когда говорим о вращении Галактики. Вращается ли Галактика относительно центра масс всего вещества наблюдаемой части Вселенной? На этот вопрос нельзя дать точного ответа, однако мы можем рассматривать движение локальной системы отсчета относительно группы близких к нам галактик. На полученных при этом выводах мы остановимся ниже. Есть еще один простой аргумент в пользу того, что Галактика должна вращаться. Как будет показано ниже, угловая скорость Галактики зависит от расстояния до ее центра, поэтому нельзя выбрать такую жесткую систему отсчета, в которой вся Галактика не вращалась бы. Рассмотрим два способа, с помощью которых можно оценить скорость вращения локальной системы отсчета. Каждый из них не очень надежен, но тем не менее указывает на вращение локальной системы отсчета относительно центра Галактики со скоростью около 250 км/с. Эта величина, обозначенная $v_{\phi 0}$ в уравнении (2.8), значительно превышает скорость Солнца и большинства близких звезд относительно локальной системы отсчета. Методы, о которых пойдет речь, очень просты по замыслу, если не по исполнению, и основаны на наблюдении шаровых скоплений и галактик Местной группы.

Система шаровых скоплений сплюснута незначительно. Мы уже отмечали, что сплюснутость диска связывают с большой скоростью его вращения (подробнее об этом речь будет идти ниже). Следовательно, система шаровых скоплений либо не вращается, либо вращается медленно. Предположим сначала, что она не вращается. Тогда фактически наблюдаемое вращение системы шаровых скоплений относительно локальной системы отсчета мы можем объяснить тем, что последняя сама вращается относительно центра Галактики и движется через невращающуюся систему шаровых скоплений. Два наблюдателя независимо друг от друга использовали наблюдения шаровых скоплений для оценки $v_{\phi 0}$. Они получили

$$v_{\phi 0} = 200 \pm 25 \text{ км/с}, \quad v_{\phi 0} = 167 \pm 30 \text{ км/с}. \quad (2.10)$$

Последний, более поздний результат, по-видимому, предпочтительнее, хотя оба результата согласуются друг с другом в пределах ошибок.

Как мы увидим в следующей главе, наша Галактика — один из членов системы галактик, которую мы называем *Местной группой*.

Самый массивный член этой группы — большая галактика в созвездии Андромеды (М 31), а наша Галактика на втором месте. Предположим теперь, что Местная группа не вращается, и оценим скорость вращения локальной системы отсчета по кажущейся скорости вращения ее членов. В этом случае два наблюдателя получили практически тождественные оценки $v_{\phi 0}$:

$$v_{\phi 0} = 300 \pm 25 \text{ км/с}, \quad v_{\phi 0} = 292 \pm 32 \text{ км/с}. \quad (2.11)$$

Результаты, найденные по шаровым скоплениям и по галактикам Местной группы, не согласуются между собой. Однако они свидетельствуют о том, что скорость локальной системы отсчета лежит между 200 и 300 км/с и что скорости вращения как системы шаровых скоплений, так и Местной группы не слишком велики. Интересно и важно то, что полученные результаты согласуются с предположением, что вектор скорости вращения составляет прямой угол с направлением на центр Галактики и лежит в плоскости Галактики. Именно этого и следует ожидать в случае вращения. Ниже мы увидим, что скорость вращения, оцененная другими методами, составляет, по-видимому, около 250 км/с.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ В ОКРЕСТНОСТЯХ СОЛНЦА

Описанные наблюдения указывают на вращение Галактики, однако информация о вращении, которую они непосредственно дают, относится лишь к окрестностям Солнца. Если мы ограничимся наблюдениями звезд, то ничего больше узнать не сможем, поскольку, как уже говорилось в гл. 1, межзвездная пыль затрудняет изучение свойств звезд на больших расстояниях от нас. К счастью, вращение Галактики можно исследовать по наблюдениям межзвездного газа (на этом мы остановимся в конце главы). Но прежде покажем, как можно узнать об изменении скорости вращения с расстоянием от центра Галактики по наблюдениям сравнительно близких звезд.

Случайные скорости движения большинства звезд диска относительно локальной системы отсчета очень малы по сравнению с ее скоростью относительно центра Галактики. Поэтому разумно принять в качестве первого приближения, что звезды имеют чисто вращательное движение относительно центра Галактики, пренебрегая при этом как случайными скоростями звезд в плоскости Галактики, так и их движением в направлении, перпендикулярном диску. В конце гл. 4 мы рассмотрим, насколько велики отличия движений звезд от чисто круговых. Будем поэтому считать, что угловая скорость звезд на расстоянии $\tilde{\omega}$ от центра Галактики равна $\omega(\tilde{\omega})$, расстояние локальной системы отсчета (L) от галактического центра (C) составляет R_0 , а ее угловая скорость равна ω_0 (рис. 2.5). Соответствующую

линейную скорость вращения обозначим через $v_{\text{circ}}(\tilde{\omega})$, а скорость в точке L — через $v_{\text{circ}}(R_0) \equiv v_{\phi 0}$.

Рассмотрим движение звезды S , галактическая долгота которой равна l (рис. 2.5). Будем считать, что эта звезда находится достаточно близко к Солнцу*, расположенному в точке L ; для наглядности расстояние до звезды сильно преувеличено. Для наблюдателя в точке L звезда S имеет лучевую скорость v_R и тангенциальную скорость v_T , или собственное движение μ . Как говорилось в гл. 1, мы можем непосредственно измерять величину μ , а не v_T . Нетрудно выразить величины v_R и v_T через ω , ω_0 , l и d — расстояние между точками S и L . Тогда мы получим

$$v_R = \omega(\tilde{\omega})\tilde{\omega} \cos \alpha - \omega_0 R_0 \sin l, \quad (2.12)$$

$$v_T = \omega(\tilde{\omega})\tilde{\omega} \sin \alpha - \omega_0 R_0 \cos l. \quad (2.13)$$

Теперь можно исключить из уравнений величину α . Из рис. 2.6 следует

$$CP = R_0 \sin l = \tilde{\omega} \cos \alpha, \quad (2.14)$$

$$LP = R_0 \cos l = d + \tilde{\omega} \sin \alpha. \quad (2.15)$$

Подставив соотношения (2.14) и (2.15) в (2.12) и (2.13), получим

$$v_R = (\omega - \omega_0) R_0 \sin l, \quad (2.16)$$

$$v_T = (\omega - \omega_0) R_0 \cos l - \omega d. \quad (2.17)$$

ПОСТОЯННЫЕ ООРТА

Приведенные формулы справедливы при любом расстоянии SL между Солнцем и звездой. Если это расстояние мало, то мы можем разложить ω в ряд Тейлора с центром в точке ω_0 . Тогда получим

$$\omega - \omega_0 \approx (d\omega/d\tilde{\omega})_{R_0} (\tilde{\omega} - R_0), \quad (2.18)$$

$$R_0 \approx \tilde{\omega} + d \cos l. \quad (2.19)$$

Подставив (2.18) и (2.19) в (2.16) и (2.17), будем иметь

$$v_R = -\frac{1}{2} R_0 (d\omega/d\tilde{\omega})_{R_0} d \sin 2l, \quad (2.20)$$

* Локальная система отсчета определяется по движению звезд, наблюдающемуся из точки, в которой находится Солнце, поэтому ее положение совпадает с положением Солнца в данный момент. Вследствие различия скоростей они совпадают лишь в один момент, однако для любого последующего момента времени мы можем ввести другую локальную систему отсчета, совпадающую с Солнцем. Здесь мы рассматриваем Галактику в некоторый момент времени.

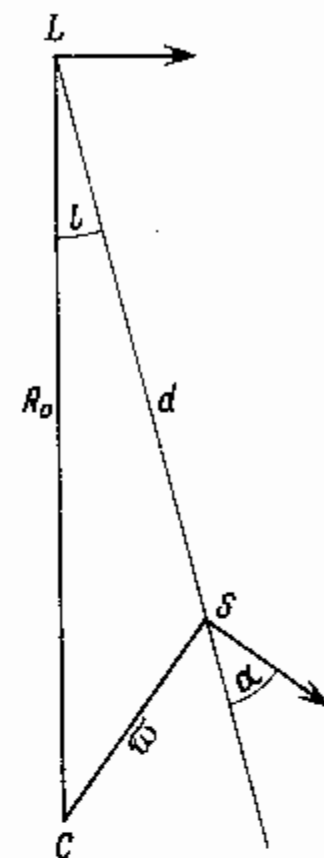


Рис. 2.5. Положение локальной системы отсчета L и звезды S по отношению к центру Галактики C . Стрелки показывают направление круговых движений L и S .

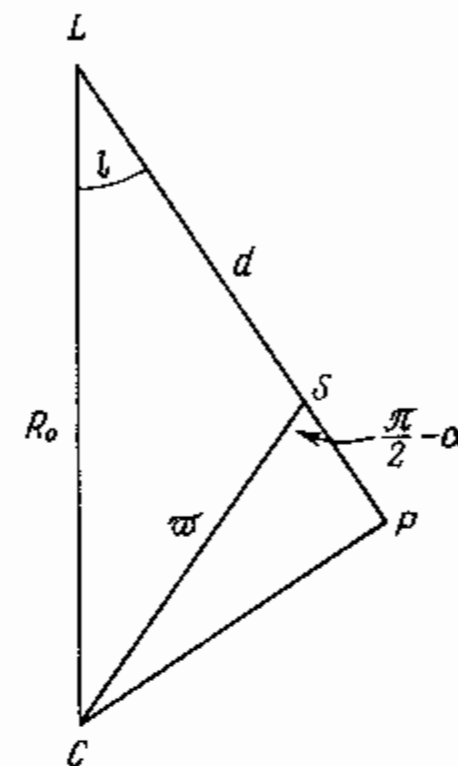


Рис. 2.6.

$$\begin{aligned} v_T &= -R_0 (d\omega/d\tilde{\omega})_{R_0} d \cos^2 l - \omega d = \\ &= -\frac{1}{2} R_0 (d\omega/d\tilde{\omega})_{R_0} d \cos 2l - \left[\omega + \frac{1}{2} R_0 (d\omega/d\tilde{\omega})_{R_0} \right] d. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Уравнения (2.20) и (2.21) обычно записываются в следующем виде:

$$v_R = A d \sin 2l, \quad (2.22)$$

$$v_T = A d \cos 2l + B d, \quad (2.23)$$

где A и B — постоянные вращения Галактики, называемые *постоянными Оорта*. Обычно их выражают через местную скорость вращения и ее производную:

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{v_{\phi 0}}{R_0} - \left(\frac{dv_{\text{circ}}}{d\tilde{\omega}} \right)_{R_0} \right], \quad (2.24)$$

$$B = -\frac{1}{2} \left[\frac{v_{\phi 0}}{R_0} + \left(\frac{dv_{\text{circ}}}{d\tilde{\omega}} \right)_{R_0} \right]. \quad (2.25)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ООРТА

В постоянные Оорта A и B входят скорость $v_{\phi 0}$ локальной системы отсчета, первая производная круговой скорости и расстояние до центра Галактики R_0 . Если бы мы могли оценить величины A и B , то нам бы осталось определить лишь одну из перечисленных величин, чтобы знать все три. Как найти значения постоянных A и B ? Рассмотрим сначала звезды с известными расстояниями и лучевыми скоростями. Из уравнения (2.22) следует

$$v_R/d = A \sin 2l. \quad (2.26)$$

Следовательно, если построить график, по одной оси которого откладывать v_R/d , а по другой — l , то мы получим синусоиду, амплитуда которой будет равна A . Однако для реальной Галактики, в которой звезды не движутся точно по круговым орбитам, возникают три трудности. Первая связана с тем, что мы измеряем лучевые скорости по отношению к Солнцу, а не к локальной системе отсчета. Пусть мы наблюдаем звезды в плоскости симметрии Галактики. Обозначим компоненты проекции вектора скорости Солнца на эту плоскость через $v_{\odot \odot}$ и $v_{\phi \odot}$ (рис. 2.7), тогда уравнения (2.16) и (2.17) для этого случая легко приводятся к следующему виду:

$$v_{R\odot} = Ad \sin 2l + v_{\odot \odot} \cos l - v_{\phi \odot} \sin l, \quad (2.27)$$

$$v_{T\odot} = Ad \cos 2l + Bd - v_{\odot \odot} \sin l - v_{\phi \odot} \cos l. \quad (2.28)$$

Поскольку величины $v_{\odot \odot}$ и $v_{\phi \odot}$ известны, можно найти лучевые скорости звезд в системе координат, связанной с локальной системой отсчета, и использовать полученные значения для решения уравнения (2.26).

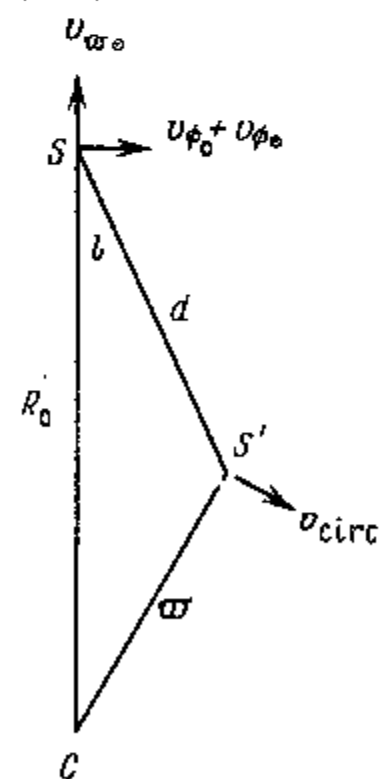


Рис. 2.7. Движение Солнца.

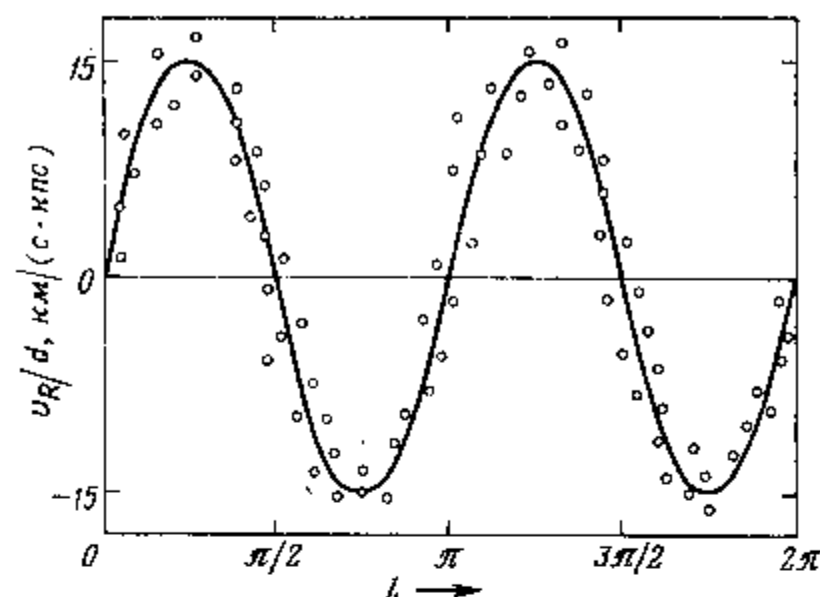


Рис. 2.8. Определение постоянной Оорта A по наблюдениям лучевых скоростей. Схематически показаны вид зависимости величины v_R/d от l и синусоида, по которой может быть найдено значение A . (Отметим, что кружки не представляют действительные наблюдения.)

Обратимся к двум другим причинам, не позволяющим получить из наблюдений гладкую кривую, предсказываемую формулой (2.26). Одна из них заключается в том, что движения наблюдаемых звезд также отклоняются от чисто кругового, а вторая связана с неуверенным определением расстояния даже до тех звезд, до которых оно считается известным. В первом приближении обе эти причины должны привести не к систематическим ошибкам, а к случайному разбросу точек кривой, отражающей движение Солнца. Поэтому через точки, которые соответствуют средним значениям наблюдаемых величин, можно провести достаточно гладкую синусоиду (рис. 2.8) и оценить постоянную A , которая оказывается равной

$$A \approx 15 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс})^*. \quad (2.29)$$

Если теперь мы будем рассматривать звезды с известным собственным движением, которое равно v_T/d , то в рамках нашей простой модели мы получим

$$v_T/d = A \cos 2l + B. \quad (2.30)$$

В книгах, посвященных строению Галактики, часто утверждается, будто уравнение (2.30) позволяет определять величины A и B по наблюдениям собственных движений звезд, даже если расстояния до них неизвестны. Очевидно, такое утверждение не совсем верно, если

¹ Здесь используется внесистемная размерность величины A . Хотя эта величина представляет собой частоту, общепринято записывать ее размерность в приведенной форме.

вспомнить, что собственные движения измеряются по отношению к Солнцу. Если все члены уравнения (2.28) разделить на d , то станет ясно, что поправки к собственному движению зависят от d . Существующие оценки собственных движений слишком ненадежны, чтобы можно было оценить по ним A и B с высокой точностью. Оценка A по собственным движениям приводит к значению $20 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс})$. Было получено несколько отличающихся друг от друга оценок постоянной B . Их среднее значение:

$$B \approx -10 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс}). \quad (2.31)$$

Можно надеяться, что в будущем более многочисленные и надежные определения собственных движений приведут к более точным значениям постоянных Оорта.

В гл. 1 уже шла речь об одном из методов определения величины R_0 . Этот метод основан на предположении о том, что центр Галактики является также центром системы шаровых скоплений; он дает

$$R_0 \approx 10 \text{ кпс}. \quad (2.32)$$

Такой способ определения R_0 уступает по надежности тому, о котором будет рассказано ниже в этой главе. Тем не менее комбинация формул (2.29), (2.31) и (2.32) приводит к значению

$$v_{\phi 0} \approx 250 \text{ км}/\text{с}, \quad (2.33)$$

согласующемуся с полученными ранее оценками.

Другой способ оценки R_0 заключается в следующем. Лучевая скорость звезд, находящихся, как и Солнце, на расстоянии R_0 от центра Галактики, относительно локальной системы отсчета равна нулю (если не принимать во внимание случайные скорости звезд). Легко видеть (рис. 2.5), что для таких звезд

$$d = 2R_0 \cos l. \quad (2.34)$$

Отсюда следует, что при известных значениях d и l можно найти R_0 . Наблюдения звезд с лучевой скоростью, равной нулю, также приводят к оценке $R \approx 10 \text{ кпс}$. Дополнительную информацию о вращении Галактики дают наблюдения межзвездного газа. К ней мы перейдем после того, как приведем общие представления о межзвездной среде.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

О существовании межзвездной среды свидетельствуют многочисленные наблюдения, причем некоторые из них выполнены очень давно. Это, например, наблюдения темных пятен на фоне плотных звездных облаков (рис. 2.9), по-видимому, связанных с поглощающим свет веществом, находящимся между нами и звездами. Впервые существо-

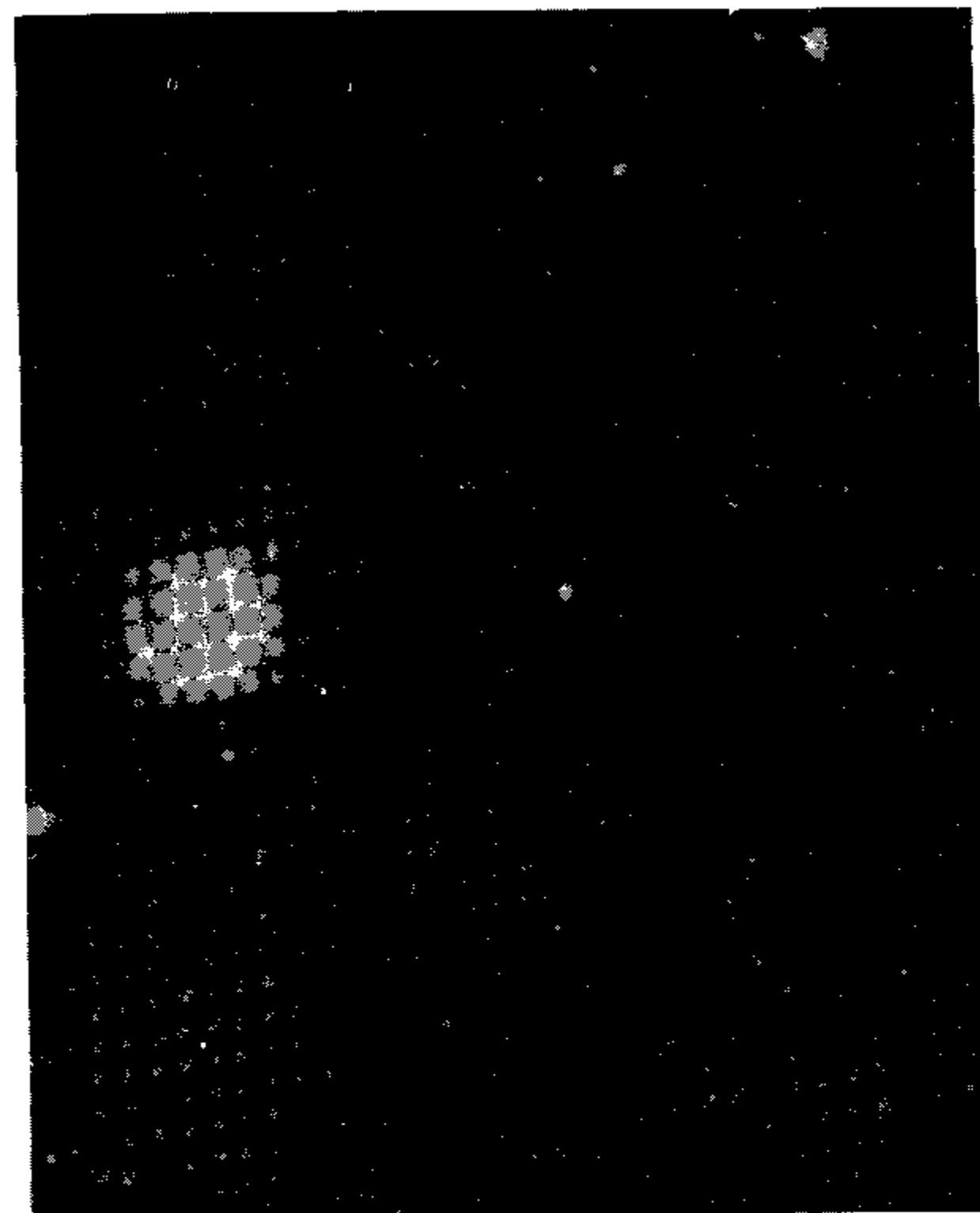


Рис. 2.9. Темное поглощающее газопылевое облако южного полушария, так называемый «Угольный мешок». Яркое пятно слева — сильно передержанное изображение звезды α Южного Креста, самой яркой звезды этого созвездия. (Фотография получена на 1,2-метровом телескопе Шмидта, воспроизведена с разрешения Эдинбургской королевской обсерватории.)

вание межзвездной среды было убедительно продемонстрировано в 20-х годах. Было установлено, что в спектрах многих звезд, наблюдаемых в определенных направлениях на небе, имеются линии поглощения с одной и той же длиной волны, в то время как линии,

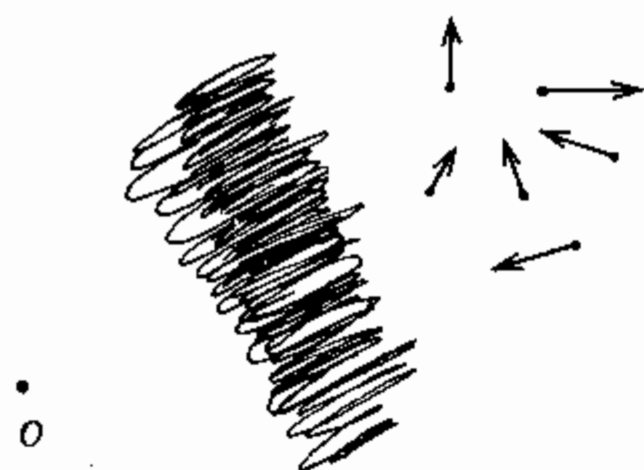


Рис. 2.10. Межзвездные линии поглощения. Если из точки O через плотное облако газа наблюдать звезды, обладающие хаотическими движениями, показанными стрелками на рисунке, то линии поглощения, возникшие в облаке, в спектрах всех звезд будут иметь одну и ту же длину волны, тогда как линии, принадлежащие звездам, будут смещены на различную величину вследствие эффекта Доплера, связанного с движением звезд.

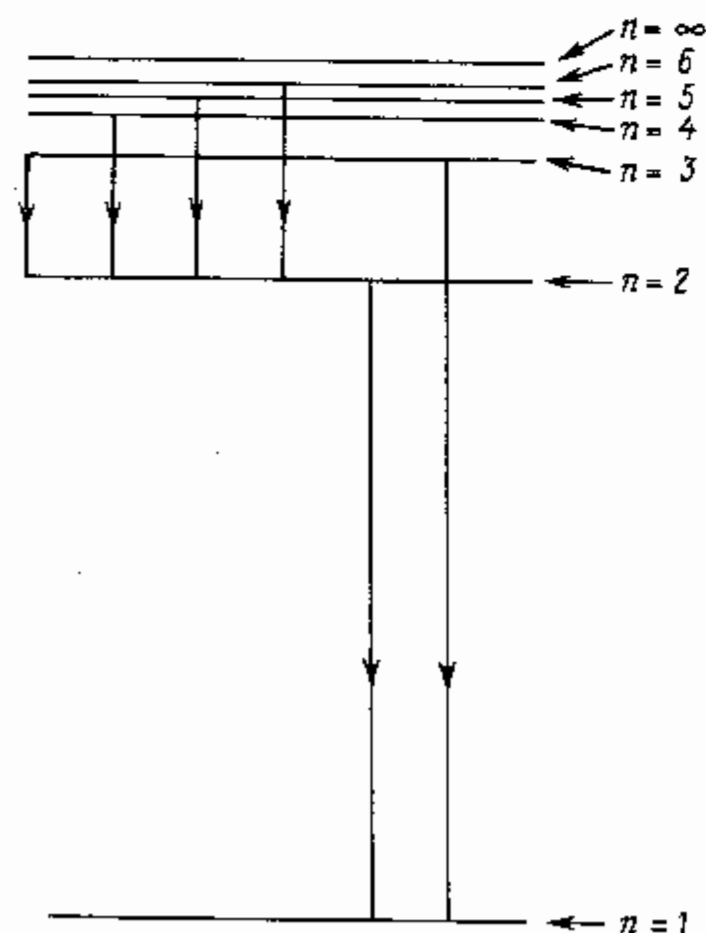


Рис. 2.11. Электронные энергетические уровни атома водорода. Показаны переходы на самый нижний уровень ($n=1$), образующие серию Лаймана, и переходы серии Бальмера ($n=2$).

принадлежащие самим звездам, смещены в той или иной степени в красную или фиолетовую сторону в зависимости от лучевой скорости звезды. Этот наблюдаемый факт можно было понять лишь, считая, что между звездами и наблюдателем находится поглощающее вещество, вызывающее образование линий (рис. 2.10). Линии межзвездной среды можно было отождествить с такими элементами, как кальций и натрий в нейтральном (нейонизованном) состоянии. Впоследствии выяснилось, что, как мы уже отмечали, основным химическим элементом, входящим в состав большинства звезд, является водород. Естественно было бы ожидать, что межзвездная среда имеет такой же химический состав, особенно если принять во внимание, что звезды, как мы предполагаем, образовывались и образуются из межзвездного газа. Действительно, существуют облака газа, окружающие горячие звезды и нагретые до высокой температуры, которые излучают в спектральных линиях водорода. Однако в течение долгого времени оставалось неясным, как можно обнаружить водород, связанный с поглощающими свет облаками, даже если это — основной составляющий их элемент. Причина довольно проста: облака должны быть холодными, в противном случае кальций и натрий не были бы в нейтральном состоянии, а холодный водород не имеет линий поглощения в видимой области спектра. Если атомы водорода находятся в основном состоянии, то даже для их перехода с основного уровня на первый возбужденный требуется энергия ультрафиолетового кванта (рис. 2.11), а соответствующая ультрафиолетовая область спектра не может наблюдаться с поверхности Земли.

ЛИНИЯ 21 СМ

Проблема обнаружения холодного межзвездного водорода была решена с появлением радиоастрономии, когда стало известно, что даже в холодном состоянии водород может поглощать и излучать на определенной длине волны 21 см (0,21 м). Дело в том, что и протон, и электрон — частицы, образующие атом водорода, — обладают спином и магнитным моментом. Они ведут себя как крошечные диполи, и поэтому энергия атома различна в зависимости от того, параллельны их спины или антипараллельны (рис. 2.12), причем энергия

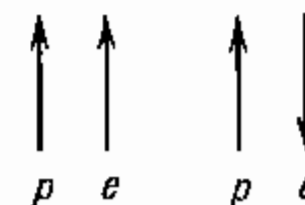


Рис. 2.12. Возможная взаимная ориентация спинов электрона и протона в атоме водорода.

атома выше в случае параллельной ориентации спинов. Если ориентация спинов меняется с параллельной на антипараллельную, то испускается излучение на длине волны 21 см. Заметим, что разность энергий двух подуровней, на которые расщеплен основной уровень атома водорода, составляет всего лишь $6 \cdot 10^{-7}$ от разности энергий между основным и первым возбужденным уровнями. Этим и объясняется очень большая длина волны излучения.

Существование излучения с длиной волны 21 см и его важная роль для астрономии были предсказаны голландским астрономом ван де Хюлстом во время второй мировой войны. Как только после войны были возобновлены серьезные астрономические исследования, несколько групп радиоастрономов в ряде стран создали приемники, способные регистрировать это излучение. В 1951 г. оно было обнаружено, и эти наблюдения немедленно дали очень ценную информацию о строении Галактики, особенно о ее вращении. Из дальнейшего мы увидим, что интерпретация наблюдений не полностью однозначна, поскольку нет прямых методов определения расстояния до объекта, излучающего радиоволны. Поэтому оценка расстояний основывается на предположениях, которые в чем-то могут быть неверны.

Начнем с предположения, которое мы уже делали при изучении движения звезд. Будем считать, что, если не учитывать тепловых движений атомов, газ движется по круговым орбитам.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ ПО РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ

Наблюдая газ в определенном направлении, которому соответствует галактическая долгота l , мы обнаружим, что спектр радиоизлучения в области 21 см выглядит примерно так, как показано на рис. 2.13. Причиной разброса излучения относительно длины волны 21 см является доплеровское смещение. Оно возникает как вследствие движения газа в целом к нам или от нас, так и вследствие того, что для атомов водорода внутри любого облака газа характерен разброс скоростей. Таким образом, спектр, приведенный на рис. 2.13, свидетельствует о существовании нескольких изолированных облаков газа в направлении, соответствующем галактической долготе l . Каждый пик в спектре можно связать с отдельным облаком, а ширина его определяется случайными скоростями газа в самом облаке. Эти облака должны находиться на различных расстояниях от локальной системы отсчета.

Посмотрим теперь, от чего зависит лучевая скорость облака, если оно движется точно с круговой скоростью. Мы можем использовать формулу (2.16)

$$v_R = (\omega - \omega_0) R_0 \sin l. \quad (2.16)$$

Предположим теперь, что $\omega(\tilde{\omega})$ уменьшается с удалением от оси вращения. Ниже мы увидим, что это справедливо как для нашей,

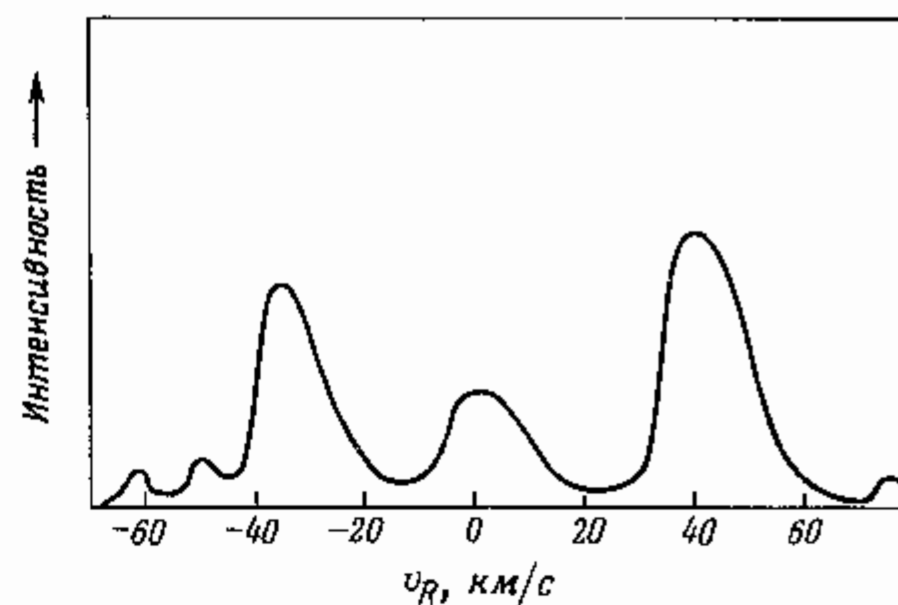


Рис. 2.13. Спектр излучения вблизи $\lambda = 21$ см в направлении, соответствующем галактической долготе l . Наблюдаемые значения длин волн переведены в значения скоростей приближения или удаления. Наличие максимумов объясняется существованием межзвездных облаков, а их ширина зависит от скоростей хаотического движения внутри облаков.

так и для других галактик; найденные нами значения постоянных Оорта A и B указывают на то, что это предположение верно и для окрестностей Солнца. В таком случае, как следует из уравнения (2.16), величина $\omega - \omega_0$, а следовательно, и v_R , возрастает по мере продвижения в направлении галактической долготы l в глубь Галактики, пока не будет достигнута точка P (рис. 2.14). За ней лучевая скорость уменьшается, пока не станет равной нулю в точке L' ; еще дальше скорость станет отрицательной. Если бы газ присутствовал

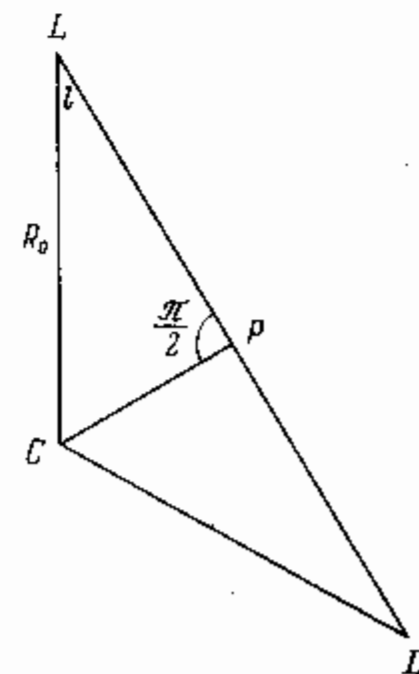


Рис. 2.14.

во всех точках на луче зрения, то можно было бы сказать, что максимальная скорость, наблюдаемая в направлении l (или, точнее, скорость наиболее быстро движущегося облака), соответствует точке P . Лучевую скорость облака легко оценить по длине волны наблюдаемого излучения, используя обычную формулу связи между доплеровским смещением и скоростью. Если считать, что величина R_0 известна из оценок, полученных описанными выше методами, то мы знаем и длину отрезка CP . Отсюда легко найти значение угловой скорости на расстоянии CP от центра Галактики. Проводя наблюдения в направлении различных галактических долгот, мы можем построить кривую вращения Галактики для всех расстояний, меньших R_0 . Кривая вращения может быть построена даже в том случае, если величина R_0 не известна, поскольку отрезок CP составляет определенную долю R_0 ($CP/R_0 = \sin l$). Однако следует иметь в виду, что в точке, где можно ожидать максимальную скорость для данного направления l , газа может вообще не быть. Поэтому полученная оценка скорости вращения всегда меньше ее истинного значения или равна этому значению.

КРИВАЯ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ

Используя описанную выше процедуру и учитывая оценки скорости $v_{\phi 0}$ и ее градиента, полученные по изучению близких звезд, можно построить кривую вращения, общий вид которой показан на рис. 2.15. Детальная форма кривой вращения во внутренней области Галактики определяется довольно неуверенно, однако достаточно точно

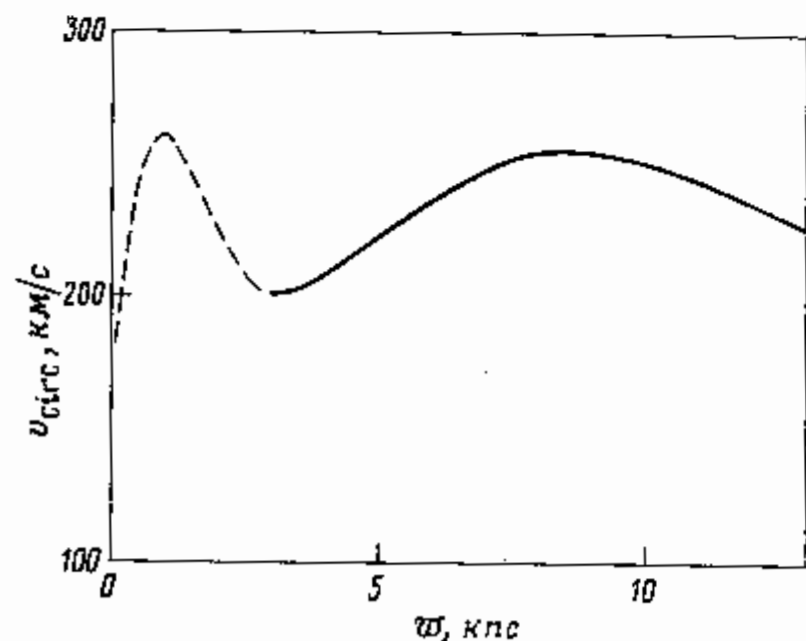


Рис. 2.15. Сглаженная кривая вращения Галактики. Штриховая линия отмечает наименее уверенно определяемую часть кривой.

установлено, что после быстрого роста вблизи центра Галактики скорость вращения сравнительно медленно меняется до больших расстояний. Это говорит о том, что Галактика — дифференциально вращающаяся система, угловая скорость которой убывает наружу; наличие минимума, расположенного на кривой вращения за областью ее быстрого роста, не в состоянии изменить монотонного уменьшения угловой скорости. Когда мы будем рассматривать в гл. 5 связь между скоростью вращения и распределением массы в галактиках, мы покажем, что дифференциальное вращение имеет простое объяснение. Мы увидим также, что это дифференциальное вращение играет большую роль в образовании спиральной структуры нашей и других спиральных галактик.

Кривая вращения, показанная на рис. 2.15, в общих чертах правильна, однако кривые, полученные для положительных и отрицательных галактических долгот, не совпадают полностью друг с другом (рис. 2.16), хотя они должны были бы совпасть, если бы вращение газа было единственной формой его движения. Маловероятно, чтобы эти различия целиком объяснялись отсутствием газа в точках, которым соответствует максимальная скорость. Наиболее простое объяснение заключается в том, что движение газа отклоняется от строго кругового, особенно в центральной области Галактики. Например, легко показать, что сложение скорости кругового движения и скорости общего расширения приведет к асимметрии кривых лучевой скорости, полученных для положительных и отрицательных l , а следовательно, и асимметрии кривых вращения, построенных в предположении строго кругового движения. По-видимому, газ действительно движется от центра Галактики наружу, что, возможно, является следствием взрыва, происшед-

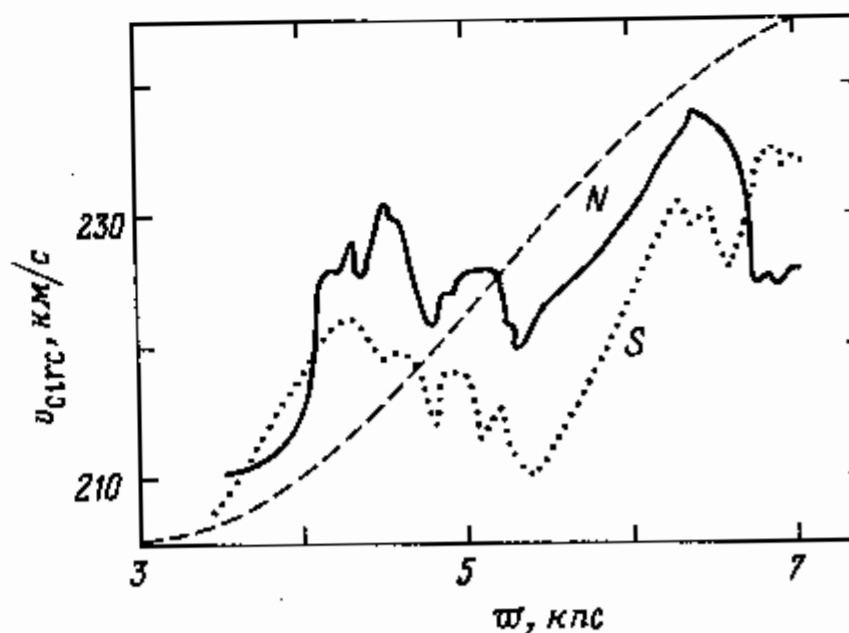


Рис. 2.16. Кривые вращения Галактики, полученные для северного (N) и южного (S) полушарий. Штриховая линия — часть сглаженной кривой вращения, показанной на рис. 2.15.

во всех точках на луче зрения, то можно было бы сказать, что максимальная скорость, наблюдаемая в направлении l (или, точнее, скорость наиболее быстро движущегося облака), соответствует точке P . Лучевую скорость облака легко оценить по длине волны наблюдаемого излучения, используя обычную формулу связи между доплеровским смещением и скоростью. Если считать, что величина R_0 известна из оценок, полученных описанными выше методами, то мы знаем и длину отрезка CP . Отсюда легко найти значение угловой скорости на расстоянии CP от центра Галактики. Проводя наблюдения в направлении различных галактических долгот, мы можем построить кривую вращения Галактики для всех расстояний, меньших R_0 . Кривая вращения может быть построена даже в том случае, если величина R_0 не известна, поскольку отрезок CP составляет определенную долю R_0 ($CP/R_0 = \sin l$). Однако следует иметь в виду, что в точке, где можно ожидать максимальную скорость для данного направления l , газа может вообще не быть. Поэтому полученная оценка скорости вращения всегда меньше ее истинного значения или равна этому значению.

КРИВАЯ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ

Используя описанную выше процедуру и учитывая оценки скорости $v_{\phi 0}$ и ее градиента, полученные по изучению близких звезд, можно построить кривую вращения, общий вид которой показан на рис. 2.15. Детальная форма кривой вращения во внутренней области Галактики определяется довольно неуверенно, однако достаточно точно

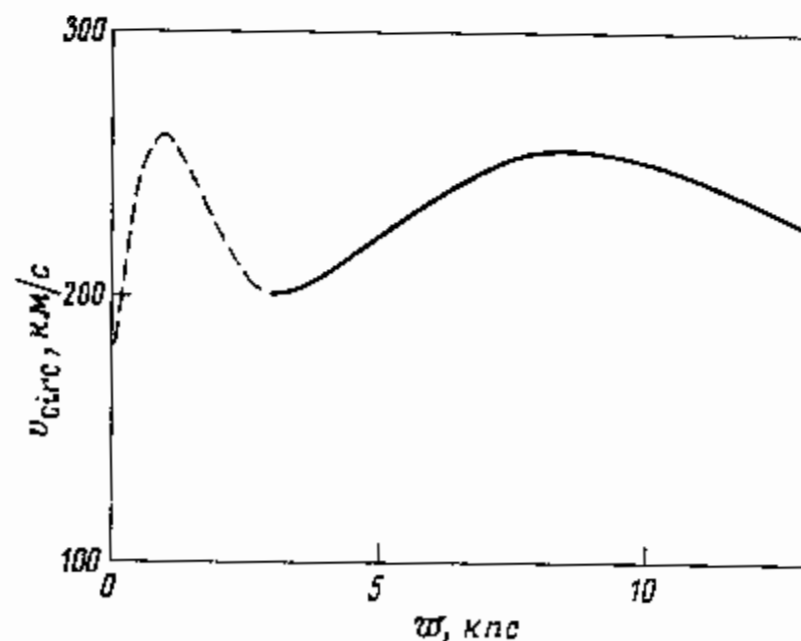


Рис. 2.15. Сглаженная кривая вращения Галактики. Штриховая линия отмечает наименее уверенно определяемую часть кривой.

установлено, что после быстрого роста вблизи центра Галактики скорость вращения сравнительно медленно меняется до больших расстояний. Это говорит о том, что Галактика — дифференциально вращающаяся система, угловая скорость которой убывает наружу; наличие минимума, расположенного на кривой вращения за областью ее быстрого роста, не в состоянии изменить монотонного уменьшения угловой скорости. Когда мы будем рассматривать в гл. 5 связь между скоростью вращения и распределением массы в галактиках, мы покажем, что дифференциальное вращение имеет простое объяснение. Мы увидим также, что это дифференциальное вращение играет большую роль в образовании спиральной структуры нашей и других спиральных галактик.

Кривая вращения, показанная на рис. 2.15, в общих чертах правильна, однако кривые, полученные для положительных и отрицательных галактических долгот, не совпадают полностью друг с другом (рис. 2.16), хотя они должны были бы совпасть, если бы вращение газа было единственной формой его движения. Маловероятно, чтобы эти различия целиком объяснялись отсутствием газа в точках, которым соответствует максимальная скорость. Наиболее простое объяснение заключается в том, что движение газа отклоняется от строго кругового, особенно в центральной области Галактики. Например, легко показать, что сложение скорости кругового движения и скорости общего расширения приведет к асимметрии кривых лучевой скорости, полученных для положительных и отрицательных l , а следовательно, и асимметрии кривых вращения, построенных в предположении строго кругового движения. По-видимому, газ действительно движется от центра Галактики наружу, что, возможно, является следствием взрыва, происшед-

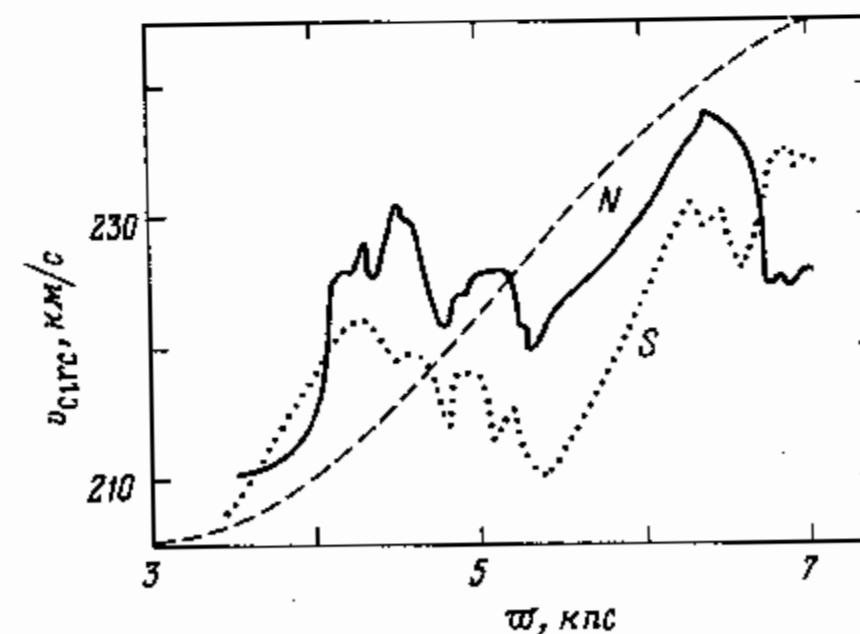


Рис. 2.16. Кривые вращения Галактики, полученные для северного (N) и южного (S) полушарий. Штриховая линия — часть сглаженной кривой вращения, показанной на рис. 2.15.

шего в центральной области несколько миллионов лет назад. В гл. 3 мы расскажем о значительно более мощных движениях газа в центральных областях некоторых галактик.

Мы завершим этот раздел рассказом о том, как наблюдения газа могут быть использованы для оценки величины AR_0 , а следовательно, и R_0 , если постоянную Оорта A считать известной. Рассмотрим точки, расположенные на расстоянии $\tilde{\omega}$ от центра, близком к R_0 . Из уравнений (2.16), (2.18) и из определения A следует

$$v_R = 2A(R_0 - \tilde{\omega}) \sin l. \quad (2.35)$$

Из схемы на рис. 2.14 видно, что величина v_R достигает максимума в направлении l на расстоянии

$$\tilde{\omega} = R_0 \sin l. \quad (2.36)$$

При $l \approx 90^\circ$ это значение $\tilde{\omega}$ будет близко к R_0 . Подставляя выражение (2.35) в (2.36), получим

$$v_{R \max} = 2AR_0(1 - \sin l) \sin l. \quad (2.37)$$

Если измерения скорости проводятся в направлении l , близком, но не точно равном 90° , то из наблюдений можно получить оценки AR_0 . Они оказались равными 135–150 км/с. Если принять $A = 15$ км/(с·кпс), то R_0 равно 9–10 кпс.

В настоящее время обычно принимается, что $A = 15$ км/(с·кпс), $B = -10$ км/(с·кпс), $R_0 = 10$ кпс, $v_{\phi 0} = 250$ км/с, однако эти оценки все еще остаются неуверенными, и неудивительно, если они окажутся не очень точными.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗА

Межзвездный водород в основном сконцентрирован в тонком диске, сравнимом по толщине с диском, образованным молодыми звездами. Газ, наблюдаемый по излучению на волне 21 см, имеет низкую температуру и не заполняет однородно весь диск, а образует облака (рис. 2.13). Есть основания считать, что между облаками также находится газ, но более горячий и более разреженный. Наконец, если газ случайно оказался вблизи звезды с очень высокой температурой поверхности, то он ионизируется ее ультрафиолетовым излучением и образует области HII, о которых уже шла речь выше. Облака холодного газа также неоднородно распределены по диску. Области максимальной плотности газа, по-видимому, очерчивают спиральные рукава, положение которых по крайней мере качественно хорошо согласуется с положением спиральных рукавов, образуемых голубыми звездами наибольшей светимости и областями HII. Хотя совершенно ясно, что наша Галактика относится к числу спиральных, нам, находящимся внутри диска, нелегко выявить мелкомасштабные детали спиральной структуры. По этой причине мы не знаем, какой узор

образуют спиральные рукава Галактики. Значительно более ясная картина получена для таких галактик, как M51 (рис. 3.4). На фотографии, сделанной в свете линии H α , очень четко выделяются рукава, образующие фигуру, показанную на рис. 2.17. Маловероятно, что Галактика обладает такой же упорядоченной спиральной структурой.

Есть указания на то, что помимо газа, расположенного в плоскости Галактики, небольшое количество газа имеется и вдали от нее. Оказалось также, что газовый диск довольно сильно изогнут на периферии (рис. 2.18). К этому искривлению газового слоя мы еще вернемся в гл. 3. Поскольку по радиоизлучению можно оценивать лишь скорость межзвездного газа, а не расстояние до него, нам трудно определить, где находятся облака с большими скоростями, которые наблюдаются в высоких галактических широтах: принадлежат ли они к нашей Галактике или представляют межгалактический газ? Даже если считать, что они находятся внутри или вблизи Галактики, остается неясным, выброшены ли они из плоскости Галактики вследствие того же явления, которое ответственно за искривление газового диска, или это облака межгалактического газа, падающего на Галактику. Мы вернемся к этой проблеме в гл. 3, когда речь пойдет о Местной группе галактик.



Рис. 2.17. Схема спиральной структуры галактики M51, фотография которой приведена на рис. 3.4. Неправильная галактика-спутник, по-видимому, расположенная на конце спиральной ветви, находится внизу.

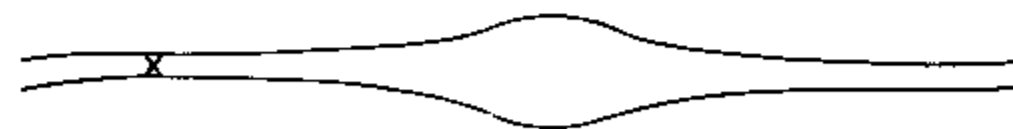


Рис. 2.18. Газовый диск Галактики, искривляющийся на больших расстояниях от ее центра. Положение Солнца отмечено крестиком.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПЫЛЬ

Мы уже неоднократно упоминали о том, что важной составляющей межзвездной среды является *межзвездная пыль*, которая ответственна за большую часть поглощения, испытываемого светом звезд. Теперь мы остановимся на том, как эта пыль была обнаружена и что о ней известно. Свет далекой звезды может претерпевать в межзвездной среде как *поглощение*, так и *рассеяние*. Рассеяние — это всего лишь изменение направления движения фотона. При поглощении фотон исчезает, а поглощенная энергия последовательно переизлучается. В этом случае возможно изменение как направления, так и частоты излучения. Если бы излучение любой длины волны поглощалось или рассеивалось одинаковым образом, то звезда просто выглядела бы слабее, а следовательно, казалась бы дальше от нас, чем на самом деле. Но в действительности существует сильная зависимость поглощения от длины волны, причем синий свет подвержен ему в большей степени, чем красный. По этой причине цвет звезды меняется, однако спектральные линии, образующиеся в атмосфере звезды, остаются такими же, поэтому спектральный класс звезды перестает соответствовать ее цвету. Это позволяет оценить как полное поглощение, так и изменение поглощения с длиной волны.

Таким образом, необходимо постулировать существование в межзвездной среде некоторого поглощающего агента, действие которого качественно и количественно объясняет наблюдаемое поглощение. Оно совершенно не поддается объяснению, если рассматривать любые возможные атомы или молекулы. Значительно легче истолковать поглощение, если считать, что межзвездная среда содержит небольшие твердые частицы, размеры которых приблизительно равны длине волны света. Ученые еще не достигли полного согласия относительно того, каков химический состав таких *межзвездных пылинок*. В качестве составляющих предлагались графит, силикаты и загрязненный лед (лед с примесями), и все они могут объяснить те или иные характеристики межзвездного поглощения. По-видимому, существует несколько типов межзвездных пылинок.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ЗВЕЗД

Ряд других наблюдений также указывает на существование межзвездной пыли и среди них — наблюдения *поляризации света звезд*. В некоторых случаях свет звезд оказывается сильно поляризованным. Обычно обнаруживается, что свет звезд всех спектральных классов, расположенных в некоторой области неба, поляризован. Это свидетельствует о крайне малой вероятности того, что свет поляризуется в процессе излучения, и указывает на его поляризацию при рассеянии в межзвездной среде. Первоначально неполяризованный свет становится поляризованным, если преимущественному поглощению или рассеянию



Рис. 2.19. Поляризация света звезд. Свет звезды, приходящий к наблюдателю в точке O, будет поляризован, если он подвергся рассеянию на частицах, ориентированных так, как показано на рисунке.

подвергается излучение с определенной ориентацией плоскости поляризации. Это имеет место, когда асимметричные рассеивающие частицы не ориентированы случайным образом, а как бы выстроены в некотором направлении (рис. 2.19). Принято считать, что рассеяние происходит на вытянутых пылинках, имеющих преимущественную ориентацию благодаря действию *межзвездного магнитного поля*.

МЕЖЗВЕЗДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Подробное обсуждение свойств межзвездного магнитного поля и космических лучей мы отложим до гл. 6, в которой речь пойдет о динамике межзвездной среды. Однако ряд свойств мы кратко опишем здесь. *Космические лучи*, наблюдаемые вблизи Земли, представляют собой заряженные частицы очень высокой энергии, приходящие к Земле примерно в одинаковых количествах со всех направлений. Двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, они могли бы, если бы этому ничто не препятствовало, вылететь из Галактики в межгалактическое пространство за время порядка 10^5 лет. В гл. 6 мы приведем свидетельства того, что космические лучи проводят около 10^7 лет в диске Галактики и что они удерживаются в диске благодаря действию магнитного поля. Это второй аргумент в пользу существования крупномасштабного межзвездного магнитного поля. Заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле, излучают энергию в форме радиоволн, приходящих к нам как из диска, так и из гало Галактики и не связанных с облаками межзвездного газа или другими дискретными источниками радиоизлучения. Поэтому естественно интерпретировать это радиоизлучение как результат движения электронов космических лучей в магнитном поле. Все это свидетельствует о том, что космические лучи, как и магнитное поле, являются составляющей нашей Галактики.

МЕЖЗВЕЗДНЫЕ МОЛЕКУЛЫ

Наиболее важное открытие, к которому привело исследование межзвездной среды за последние годы, связано с *межзвездными молекулами*. Они были обнаружены главным образом радиоастрономическими ме-

тодами. Молекулы, как правило, имеют большое число спектральных линий в микроволновой или инфракрасной областях электромагнитного спектра, причем большинство молекул было открыто по наблюдениям на длинах волн, несколько более коротких, чем длина волны излучения атомарного водорода в линии 21 см. Первой молекулой, открытой таким путем, был радикал OH, который, как оказалось, широко распространен в Галактике. Другими молекулами, найденными во многих областях Галактики, явились окись углерода и формальдегид. Молекулы воды также оказались широко распространенными. Наиболее часто встречающиеся молекулы — это, конечно, молекулы водорода H_2 , однако они были открыты лишь недавно по наблюдениям в ультрафиолетовой области спектра. Это открытие стало возможно с появлением ультрафиолетовых телескопов, установленных на спутниках. По-видимому, полное количество молекулярного водорода сопоставимо с полным количеством атомарного водорода.

Существование сравнительно небольших молекул не было неожиданным, а вот открытие плотных облаков газа, содержащих в больших количествах довольно сложные молекулы, вызвало удивление. Неполный список открытых к настоящему времени молекул приведен в табл. 2.4. Были обнаружены такие многоатомные органические молекулы, как этиловый спирт и цианоацетилен. Почти наверняка со временем будут найдены еще более сложные молекулы. В отличие от простых молекул сложные молекулы были открыты лишь в небольшом числе плотных облаков. Самая высокая концентрация молекул была найдена в области, расположенной вблизи центра Галактики. Радиоволны очень слабо поглощаются межзвездной средой, что позволяет наблюдать молекулы вблизи центра Галактики, хотя свет любой звезды, расположенной в этой области, был бы очень сильно ослаблен. Образование сложных молекул и сохранение их от разрушения — очень интересная проблема. Даже в наиболее плотных облаках газа скорость образования молекул чрезвычайно низка. Ведь они образуются путем последовательных столкновений атомов и молекул, а по обычным лабораторным стандартам межзвездные облака представляют собой

Таблица 2.4

Список молекул (неполный), открытых в межзвездной среде

OH	SiO	HNCO	HCCCCCN
CN	NH ₃	H ₂ CNH	HCCCCCCCN
CH	C ₃ N	H ₃ CCN	CH ₃ CHO
CO	HCN	H ₃ CCCH	CH ₃ OH
H ₂ O	HNC	HCOOH	(CH ₃) ₂ O
H ₂	H ₂ CO	H ₃ CON	CH ₃ CH ₂ OH
CS	H ₂ CS	H ₂ NCOH	
H ₂ S	OCS	HCCCN	

вакуум! При концентрациях порядка 10^{12} м^{-3} и температурах 10 К время между двумя столкновениями даже для атомов водорода составляет не менее 10^6 с, а для других атомов и молекул, содержащихся в значительно меньшем количестве, это время намного больше. Чтобы сложные молекулы могли образоваться путем последовательных столкновений, они должны быть защищены от ультрафиолетового излучения горячих звезд, которое легко может их разрушить. Вероятнее всего, молекулы образуются и сохраняются в центральных областях плотных облаков, где содержится пыль, поглощающая излучение звезд. Тесная связь между пылью и молекулами действительно наблюдается. Поскольку в плотных облаках концентрация газа значительно выше, чем в межзвездной среде в среднем, они скорее всего не находятся в состоянии равновесия, а сжимаются под действием гравитации. Такое сжатие, по-видимому, продолжается $10^6 - 10^7$ лет, так что у молекулы имеется достаточно времени, чтобы успеть образоваться. Из сжимающихся плотных облаков почти наверняка в недалеком будущем должны родиться звезды.

Большая часть дальнейшего изложения будет посвящена нашей Галактике и, в частности, тем выводам, которые можно получить из наблюдений, упоминавшихся в настоящей главе. Прежде чем продолжать изложение, мы дадим в гл. 3 краткий обзор свойств галактик различных типов и расскажем о том, как они распределены во Вселенной.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 2

В этой главе мы узнали, что большинство звезд, газ и пыль в Галактике образуют очень тонкий диск. Помимо него существуют приблизительно сферически симметрично распределенные в пространстве шаровые звездные скопления и отдельные звезды с большой пространственной скоростью, образующие так называемое гало Галактики. Сплюснутость галактического диска связана с его быстрым вращением. Мы объяснили, каким образом наблюдения видимых движений системы шаровых скоплений и Местной группы галактик, в которой наша Галактика — второй по величине член, могут быть использованы для оценки скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики. Чтобы получить информацию о вращении Галактики и о расстоянии от Солнца до ее центра, можно также использовать наблюдения движений звезд в окрестностях Солнца и движений газовых облаков, находящихся на больших расстояниях. Было, в частности, установлено, что Галактика вращается не как твердое тело: угловая скорость уменьшается с расстоянием от центра Галактики. Доступны изучению и случайные скорости звезд в окрестностях Солнца. Оказалось, что если исключить небольшое число быстро движущихся звезд, то скорости случайных движений значительно меньше круговой скорости. Кроме того, амплитуда скоростей звезд в направлении на галактический центр

и от него больше, чем скорости случайных движений в других направлениях. Определение химического состава звезд показывает, что почти все звезды состоят в основном из водорода и гелия, однако звезды гало содержат меньше тяжелых элементов по сравнению со звездами диска.

Межзвездный газ, пыль и космические лучи также расположены в тонком диске. Газ образует спиральный узор, который очерчивается большинством молодых звезд высокой светимости. Основная масса газа заключена в холодных межзвездных облаках, состоящих в основном из атомарного водорода, между которыми находится более горячий и менее плотный газ. Часть газа образует плотные облака, содержащие много молекул, в том числе такие многоатомные, как этиловый спирт, однако основной их составляющей является молекулярный водород. Диск Галактики пронизан также крупномасштабным магнитным полем, удерживающим частицы космических лучей в Галактике значительно дольше, чем они оставались бы в ней при отсутствии магнитного поля. Если бы магнитного поля не существовало, то космические лучи покидали бы Галактику менее чем за 10^5 лет. Магнитное поле заставляет их двигаться по винтовым траекториям вдоль силовых линий.

Глава 3

Свойства галактик

ВВЕДЕНИЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЛАКТИК ПО ХАББЛУ

В предыдущей главе мы достаточно подробно рассмотрели свойства одного из представителей класса галактик — нашей Галактики. Теперь мы обратимся к другим галактикам и сравним их характеристики с характеристиками Галактики. Наиболее простым для изучения свойством галактик является их внешний вид. Вскоре после того как в начале 20-х годов было установлено существование других галактик, выяснилось, что галактики правильной формы можно разделить на два основных класса: *спиральные* и *эллиптические*. Впоследствии оказалось, что спиральные галактики следует разделить на обычные спирали и *спирали с перемычками* и что необходимо ввести еще один класс — *линзовидные галактики*. Кроме того, существуют неправильные галактики, не обладающие очевидной симметрией формы. В 30-х годах Хаббл предложил свою схему классификации галактик, которая в несколько модифицированном виде используется и поныне. Наиболее простой вариант схемы классификации по Хабблу показан на рис. 3.1. Предлагая свою схему, Хаббл считал, что она, по-видимому, представляет эволюционную последовательность: галактики, вероятно, эволюционируют от эллиптических к спиральным, однако, как мы узнаем ниже, в настоящее время это предположение отвергнуто. Существуют

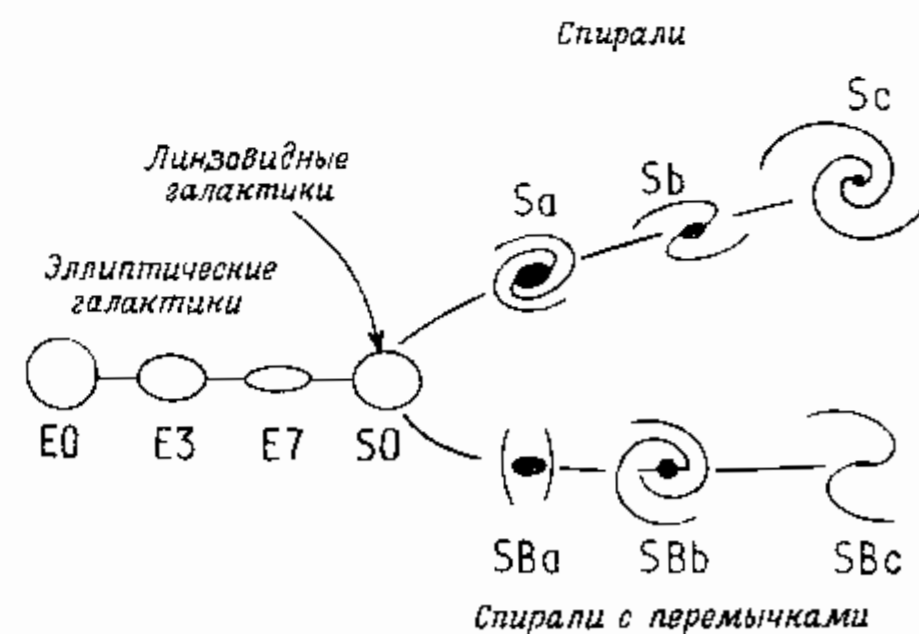


Рис. 3.1. Классификация галактик по Хабблу. Эллиптические галактики показаны «с ребра», а линзовидные, спиральные и спиральные с перемычкой — в положении «плашмя».

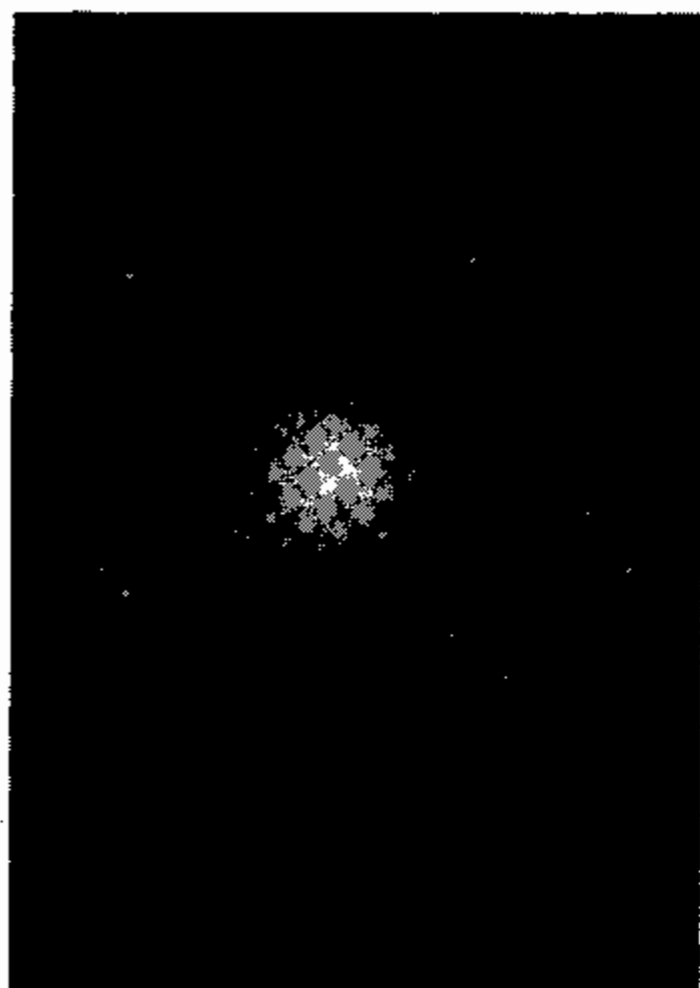


Рис. 3.2. Галактика типа E0. Гигантская галактика M 87 в созвездии Девы. (Фотография обсерваторий им. Хейла получена на 5-метровом паломарском телескопе.)

и другие схемы классификации галактик, однако в данной книге достаточно остановиться на схеме Хаббла. Рассмотрим теперь более подробно общий вид галактик различных типов, не связывая его пока с их физическими характеристиками.

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ (СФЕРОИДАЛЬНЫЕ) ГАЛАКТИКИ

Эллиптические галактики (точнее, сфероидальные галактики, поскольку все они, по-видимому, обладают осью симметрии*) классифицируются с учетом наблюдаемых отношений их большой и малой осей. Галактика, видимые полуоси которой равны a и b , относится к классу E_n , где

$$n = 10(a - b)/a. \quad (3.1)$$

* Недавно было высказано предположение, что некоторые галактики являются трехосными эллипсоидами.

Ни для одной эллиптической галактики n не превышает 7. Вследствие эффектов проекции наблюдаемое значение n будет меньше или равно его истинному значению, а сфероидальная галактика, наблюдаемая вдоль малой оси, всегда будет выглядеть круглой. Однако резкий «обрыв» в распределении наблюдаемых величин n при $n = 7$ говорит о том, что сильно сплюснутых эллиптических галактик не существует. Этим эллиптические галактики отличаются от всех других галактик, обладающих правильной формой (линзовидных, спиральных и спиральных с перемычкой), которые, как и наша Галактика, очень сильно сплюснуты. На рис. 3.2 и 3.3 приведены фотографии эллиптических галактик с двумя различными значениями n .

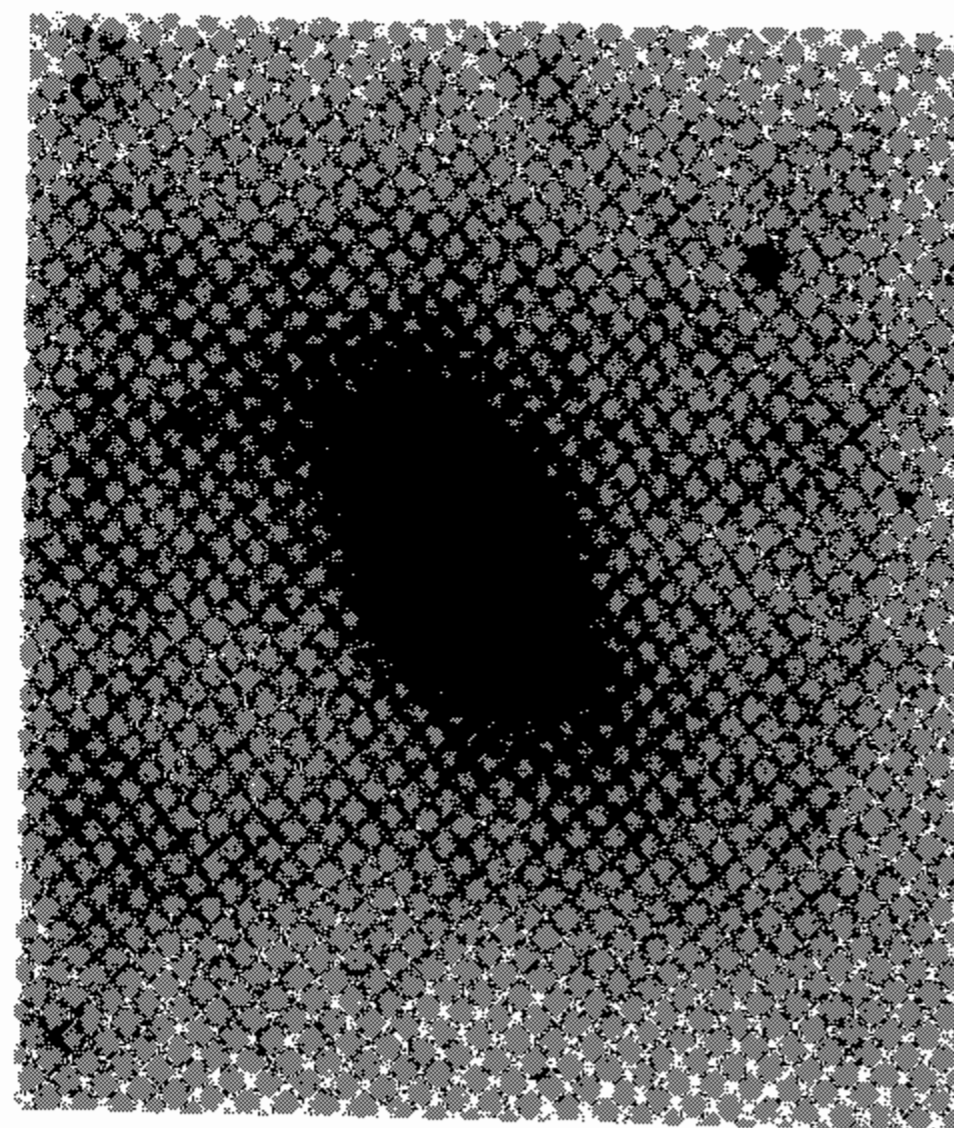


Рис. 3.3. Галактика типа E4. NGC 1389 в скоплении галактик в созвездии Печи (негатив). (Фотография получена на 3,9-метровом англо-австралийском телескопе, воспроизведена с разрешения Совета по англо-австралийскому телескопу.)

СПИРАЛИ, СПИРАЛИ С ПЕРЕМЫЧКОЙ И ЛИНЗОВИДНЫЕ ГАЛАКТИКИ

Спиральные галактики были открыты первыми и получили свое название по той причине, что распределение яркости в них напоминает спираль. Это хорошо видно на фотографии спиральной галактики на рис. 3.4. Первоначально считалось, что форма спиральных галактик сильно отличается от осесимметричной, однако теперь стало ясно, что распределение массы в них характеризуется значительно меньшей асимметрией, чем распределение яркости. Яркость определяется главным образом массивными молодыми звездами, концентрирующимися вдоль спиральных ветвей. Мы можем наблюдать эти звезды непосредственно, либо сделать вывод об их присутствии по наблюдениям



Рис. 3.4. Спиральная галактика типа Sc M 51 в созвездии Гончих Псов. Видна также неправильная галактика-спутник (внизу). (Фотография обсерваторий им. Хейла, 5-метровый паломарский телескоп.)

горячих облаков газа (областей HII). Эти облака являются мощными источниками видимого света, и их высокая температура поддерживается находящимися в них звездами. Масса галактики в отличие от ее яркости определяется более старыми маломассивными звездами, значительно более однородно распределенными по диску галактики. Спиральные галактики — сильно сплюснутые системы, как это хорошо видно на рис. 3.5.

Основное различие между спиральными галактиками с перемычками и обычными спиралями связано с формой ядра: ядро галактики приблизительно сферическое в обычных спиральных галактиках, в галактиках с перемычкой заметно вытянуто и образует перемычку. Поскольку в ядре всегда заключена значительная доля массы галактики, галактики с перемычкой можно считать асимметричными телами. Как показано на рис. 3.1, обычные спирали разделяются на подклассы Sa, Sb, Sc, а галактики с перемычкой — на SBa, SBb, SBc. Вдоль каждой из последовательностей меняются как размеры ядра, так и степень закрученности спиралей. От подкласса «a» к «с» ядро становится меньше, а спиральные ветви — менее туго закрученными.

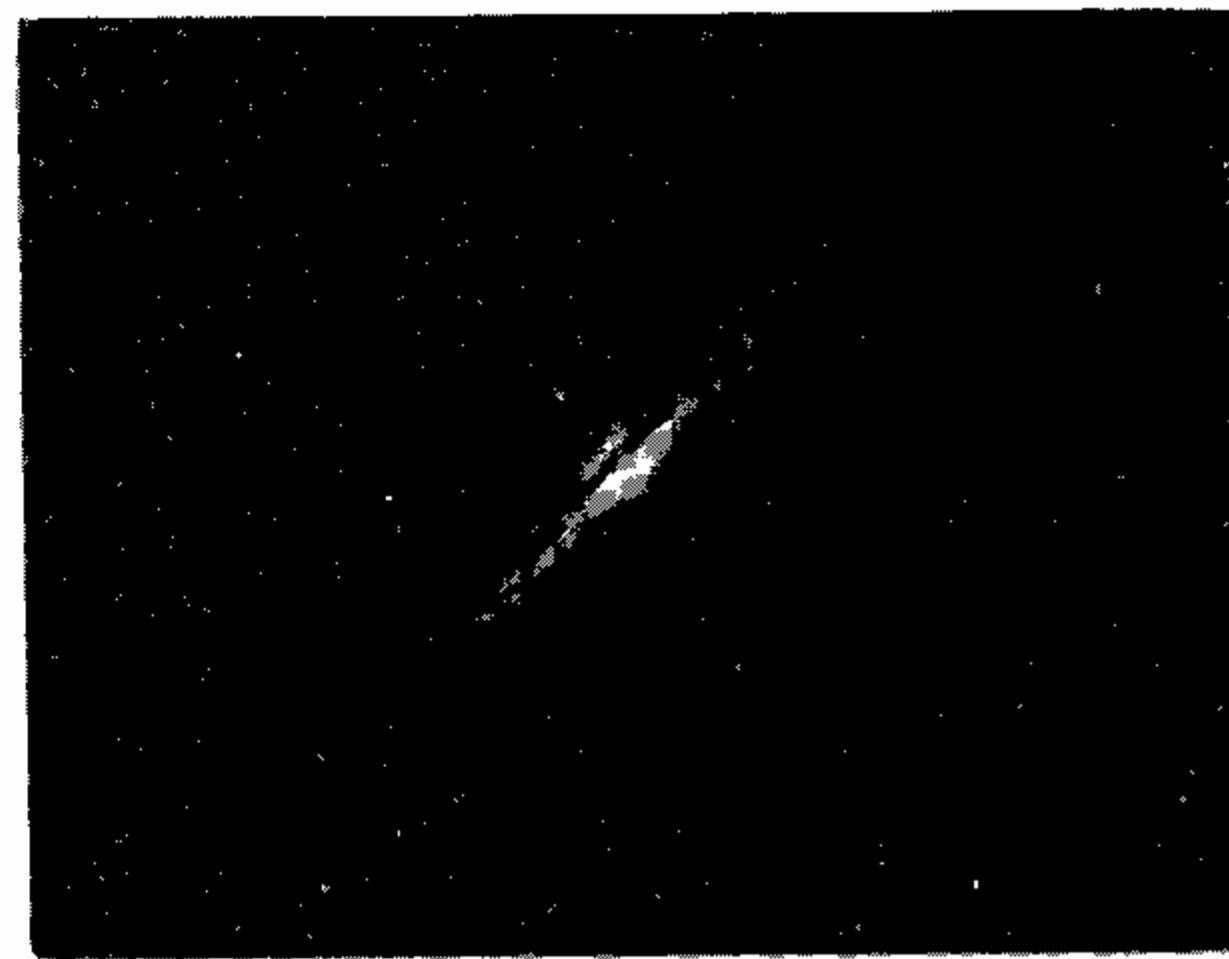


Рис. 3.5. Спиральная галактика типа Sb, наблюдаемая «с ребра», NGC 4565 в созвездии Волосы Вероники. (Фотография обсерваторий им. Хейла, 5-метровый паломарский телескоп.)

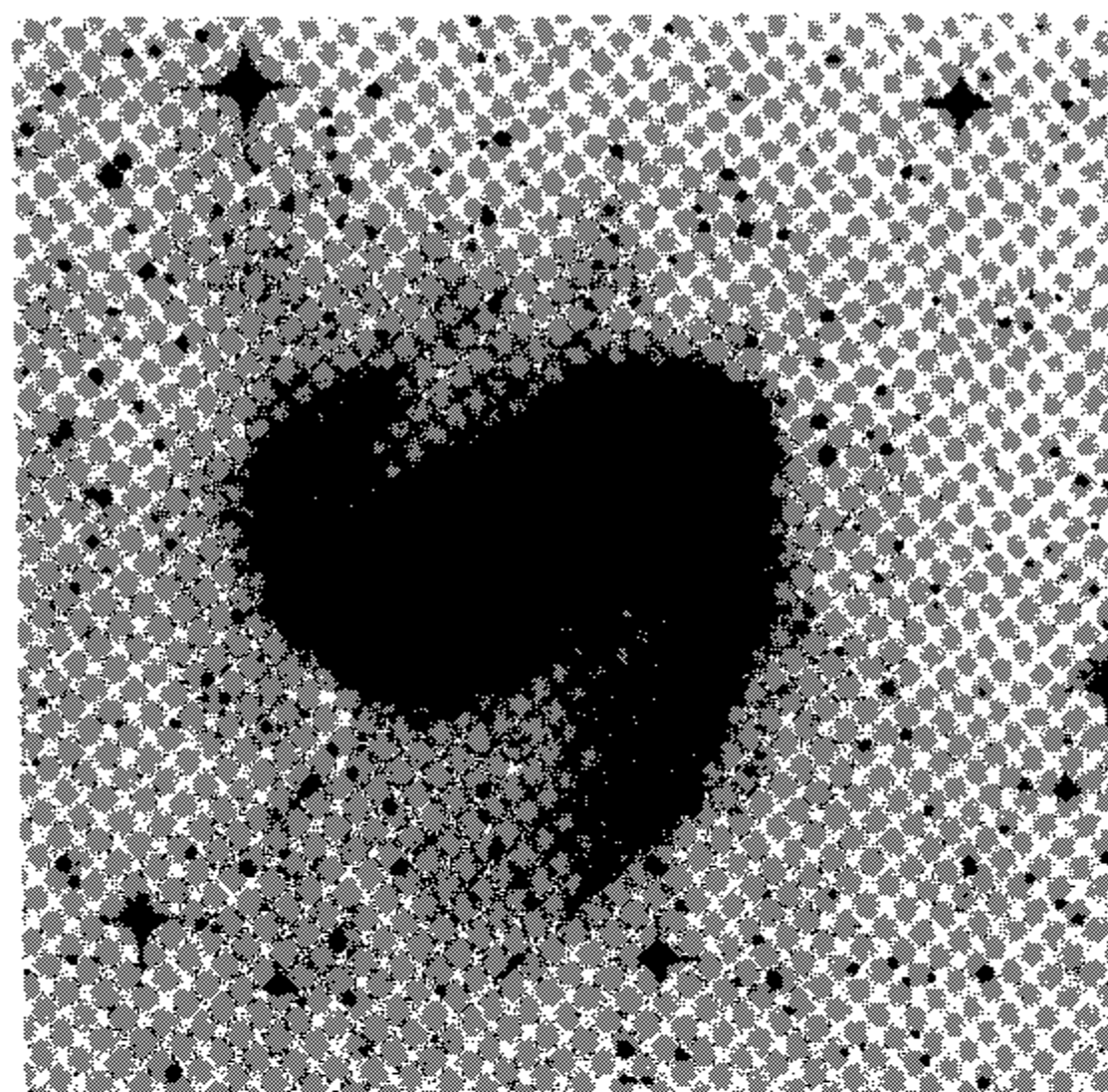


Рис. 3.6. Спиральная галактика с перемычкой NGC 2442 в созвездии Летучей Рыбы (негатив). (Фотография получена на 1,2-метровом телескопе Шмидта, воспроизводится с разрешения Эдинбургской королевской обсерватории.)

Фотография спиральной галактики с перемычкой приведена на рис. 3.6. Линзовидные галактики (рис. 3.7) похожи на спиральные тем, что они также сильно сплюснуты, однако они не обладают спиральной структурой.

НЕПРАВИЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ

Помимо четырех типов галактик, описанных выше, существуют еще неправильные галактики. Эти объекты можно условно разделить на две группы: IrI и IrII. Галактики IrI внешне выглядят как объекты неправильной формы, хотя в действительности вещество распределено в них более или менее симметрично. У галактик типа IrII и видимая, и действительная формы являются неправильными. Это деление основано на том, что в галактиках типа IrI, к которым, например, относятся два главных спутника нашей Галактики — *Большое Магел-*

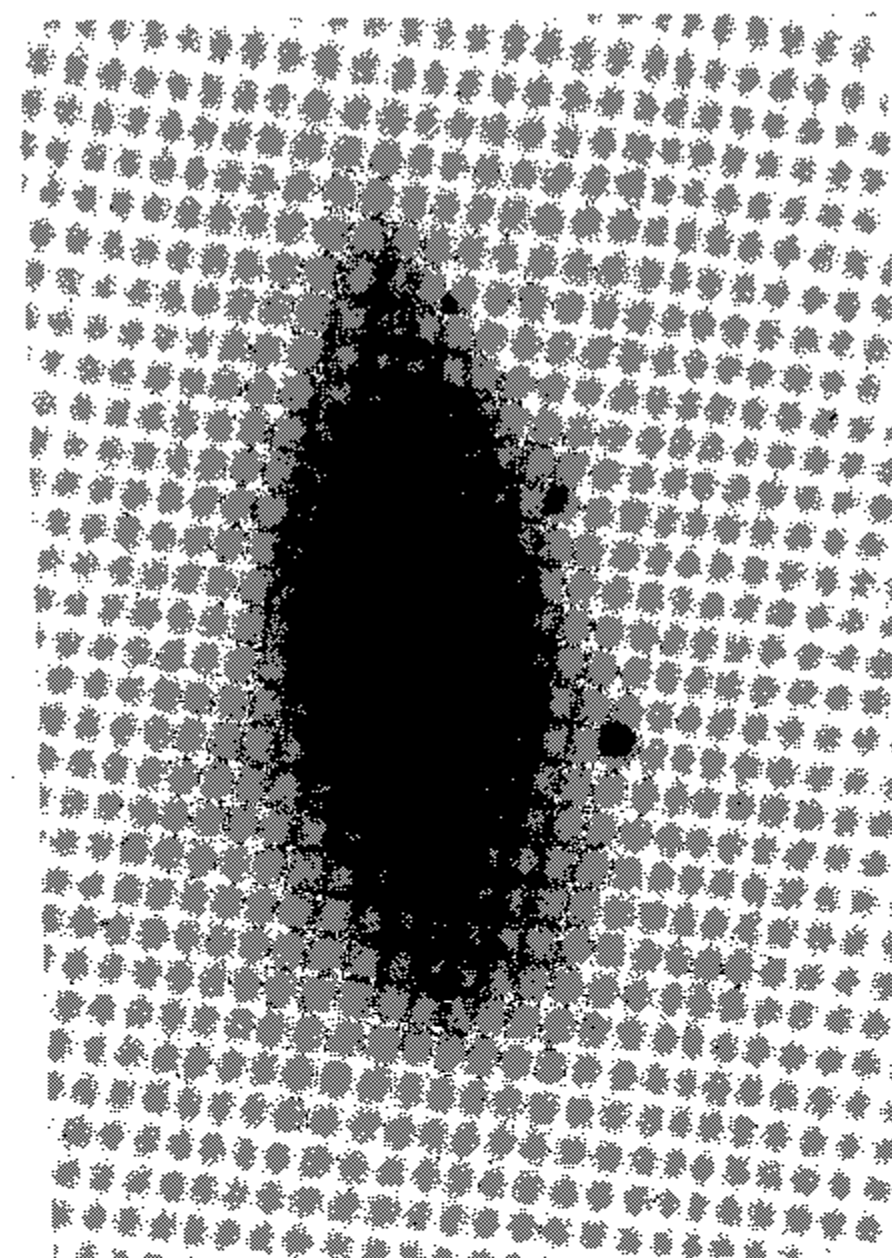


Рис. 3.7. Линзовидная галактика NGC 1380 в скоплении галактик в созвездии Печи, негатив. (Фотография получена на 3,9-метровом англо-австралийском телескопе, воспроизводится с разрешения Совета по англо-австралийскому телескопу.)

ланово Облако (БМО) и Малое Магелланово Облако (ММО), — распределение массы значительно более симметрично, чем распределение яркости. Этим они напоминают спиральные галактики, и действительно в некотором смысле галактики типа IrI можно считать потенциальными спиральными галактиками, в которых почему-то не возникли спиральные ветви. Истинно неправильные галактики, по-видимому, недавно испытали мощный взрыв, либо имеют искаженную форму в результате взаимодействия с одной или несколькими близкими галактиками. Действительно, трудно представить себе, как изолированная неправильная галактика, состоящая из звезд, каждая из которых

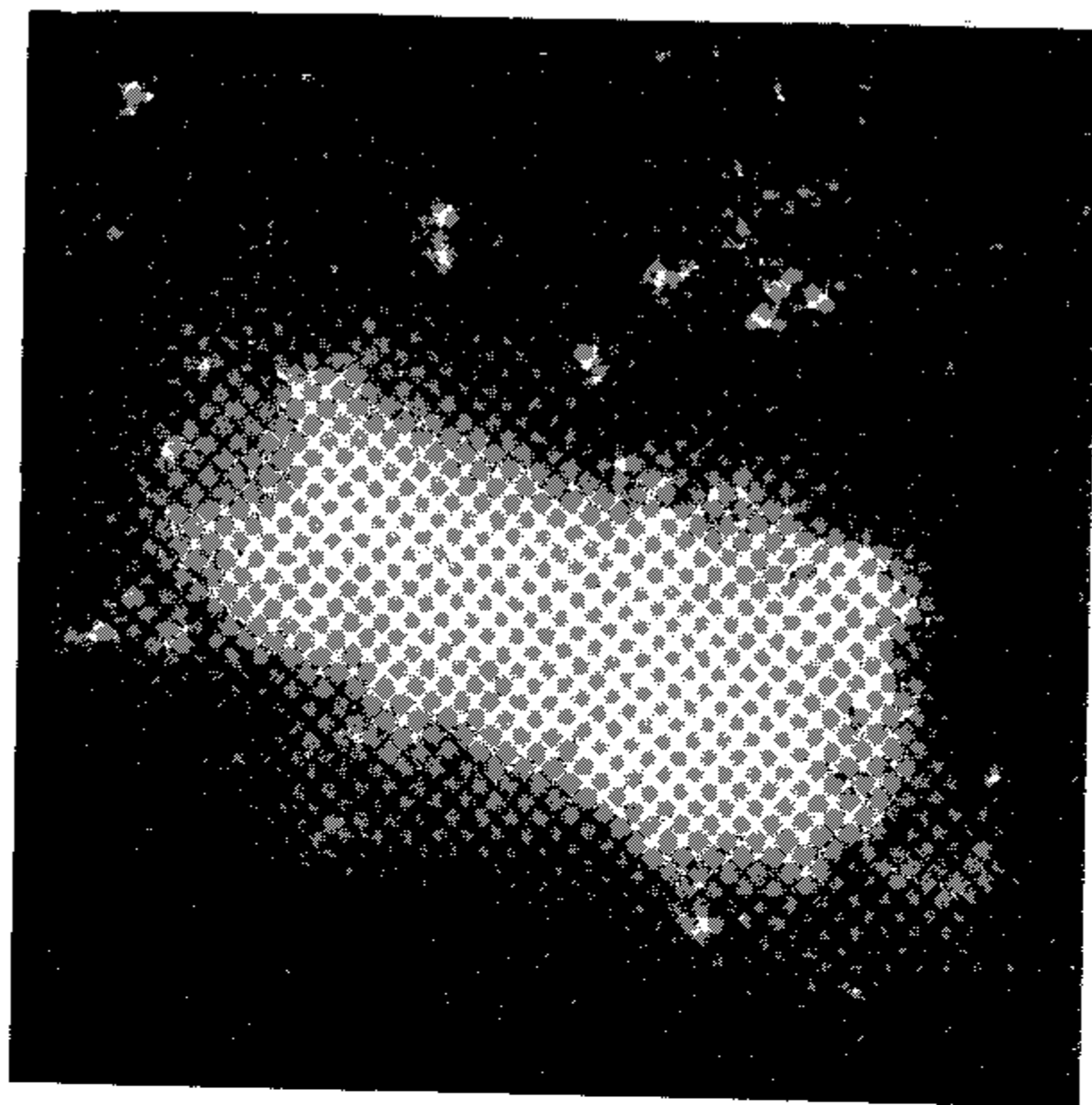


Рис. 3.8. Большое Магелланово Облако — галактика типа IGI. (Фотография получена на 1,2-метровом телескопе Шмидта, воспроизводится с разрешения Эдинбургской королевской обсерватории.)

имеет свою скорость, может оставаться неправильной в течение тысяч миллионов лет. В конце этой главы мы вновь вернемся к неправильным и пекулярным галактикам. Фотографии галактик типа IGI и IGII приведены на рис. 3.8 и 3.9.

ВОЗМОЖНЫЕ ОБЪЯСНЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИИ ХАББЛА

Описанная выше классификация Хаббла является фактически морфологической: галактики разделены на типы в соответствии с их внешним видом, но до сих пор эта классификация не получила физического обоснования. Как уже упоминалось, Хаббл первоначально считал, что его схема представляет эволюционную последовательность галактик:

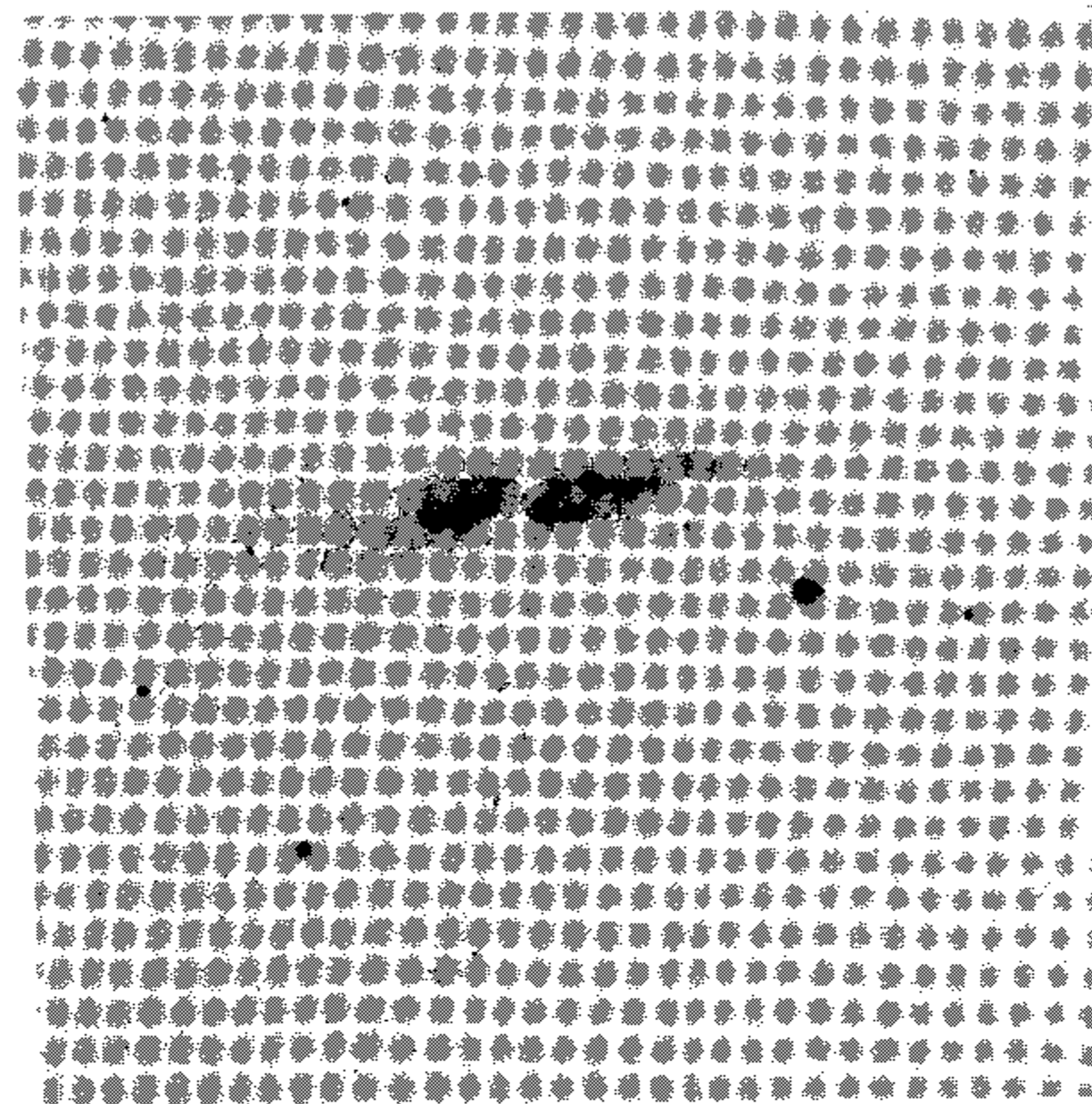


Рис. 3.9. Галактика типа IGII. Электронная фотография в полосе V галактики M 82 в созвездии Большой Медведицы. (Получена на 1-метровом телескопе обсерватории Вайз Тель-Авивского университета. Любезно предоставлена Д. Аксоном.)

галактики в течение жизни должны эволюционировать вдоль этой последовательности. Теперь такая интерпретация представляется маловероятной по нескольким причинам, и самой веской из них является, по-видимому, различное распределение по массам эллиптических и спиральных галактик. Массы эллиптических галактик охватывают большой диапазон от минимальных до максимальных возможных значений, тогда как массы спиральных галактик заключены в значительно более узких пределах. Даже предположение, что эволюция галактик вдоль последовательности типов происходит с различной скоростью в зависимости от массы, не позволяет обойти эту трудность.

В настоящее время принято считать, что различие морфологических

типов отражает различие условий образования галактик. Облака догалактического газа по ряду свойств должны отличаться друг от друга, и от этих свойств зависит, какая образуется галактика. По-видимому, двумя наиболее важными интегральными характеристиками протогалактического облака являются его масса и момент количества движения. Было бы естественно предположить, что галактики одинаковой массы располагаются вдоль хаббловской последовательности в зависимости от их момента количества движения, отнесенного к единице массы. Тогда можно считать, что наибольшую сплюснутость имеют те галактики, которые обладают максимальным моментом количества движения, и наоборот, из невращающегося протогалактического облака рождается сферическая галактика. В гл. 8 мы увидим, что окончательное объяснение, вероятно, будет не таким простым. Например, если звезды возникают на ранней стадии сжатия протогалактического облака, то образовавшаяся галактика будет сплюснута гораздо слабее, чем в том случае, когда облако до конца своего сжатия остается газовым.

Даже если момент количества движения, рассчитанный на единицу массы, действительно определяет, будет ли галактика эллиптической или сильно сплюснутой, может потребоваться выделение еще одного физического параметра, изменения которого от объекта к объекту способны объяснить разделение сплюснутых галактик на спиральные, спиральные с перемычкой, линзовидные и, конечно, неправильные, типа Магеллановых Облаков. Каков этот дополнительный физический параметр, пока остается неизвестным. Ван ден Берг высказал предположение, что линзовидные галактики также образуют последовательность S0a, S0b, S0c, параллельную последовательностям спиральных галактик и спиральных галактик с перемычкой. Вдоль этих последовательностей меняется размер ядерного утолщения, так что линзовидные галактики нельзя отнести к промежуточному типу между эллиптическими и спиральными. Он предположил также, что галактики типа Магеллановых Облаков (IrI) можно отнести к классам Irla, b или c. Если это предположение будет принято, останется лишь найти тот физический параметр, от которого зависит, будет ли галактика, к примеру, относиться к типу S0a, Sa, SBa или Irla. Хотя эволюция галактик вдоль хаббловской последовательности маловероятна, различие между эллиптическими и спиральными галактиками может оказаться не таким уж резким, если подтвердятся некоторые выдвинутые в последнее время теоретические предположения. Согласно этим предположениям, такие спиральные галактики как наша могут иметь эллипсоидальные короны низкой плотности, но большой массы, степень сплюснутости которых значительно меньше, чем у наблюдаемых спиралей. Если это окажется верным, то будет означать, что эллиптические и спиральные галактики одинаковой массы значительно меньше отличаются друг от друга по своему моменту количества движения, чем обычно принято считать. Мы вернемся к вопросу о массивных коронах в гл. 5.

КАК НАБЛЮДАЮТ ВРАЩЕНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

В предыдущей главе мы описали, как можно наблюдать вращение нашей Галактики. Как обстоит дело в отношении других спиральных галактик? Чтобы можно было наблюдать вращение галактики, она должна быть повернута к нам ребром или почти ребром: лишь в этом случае будет достаточно большой та составляющая скорости, которая направлена к наблюдателю или от него. Если галактика видна с ребра и если она находится не слишком далеко от нас, но и не слишком близко к нам, то, расположив щель спектрографа вдоль большой оси галактики, можно получить спектр ее излучения (рис. 3.10). Пусть галактика вращается так, что ее левая половина приближается к нам, а правая удаляется от нас (рис. 3.10). В этом случае, если бы вся галактика вращалась с одинаковой угловой скоростью, то ее спектр выглядел бы так, как показано на рис. 3.11. Спектральные линии наклонены по той причине, что спектр излучения левой части галактики испытывает фиолетовое, а правой — красное доплеровское смещение. Заметим, что эти смещения складываются со смещением спектра галактики в целом, которое связано с ее движением к нам или от нас. По спектру легко оценить наблюдаемую скорость вращения галактики, и, исправив ее на наклон галактики к лучу зрения, если она видна не точно с ребра, получить истинную скорость вращения.

Наблюдаемые спектры галактик обычно бывают больше похожи на спектр, изображенный на рис. 3.12, а не 3.11. Форма спектральных линий на рис. 3.12 свидетельствует о том, что галактика не вращается как твердое тело. Такой спектр позволяет найти зависимость угловой

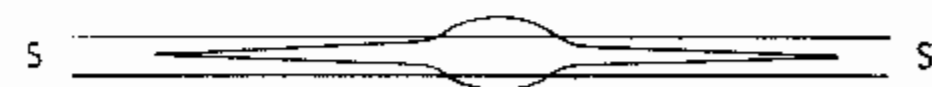


Рис. 3.10. Измерение скорости вращения галактики. Щель SS' спектрографа ориентирована вдоль большой оси галактики.

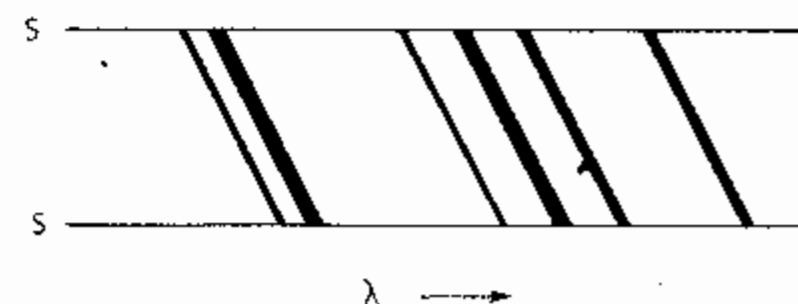


Рис. 3.11. Спектр галактики, вращающейся как твердое тело.

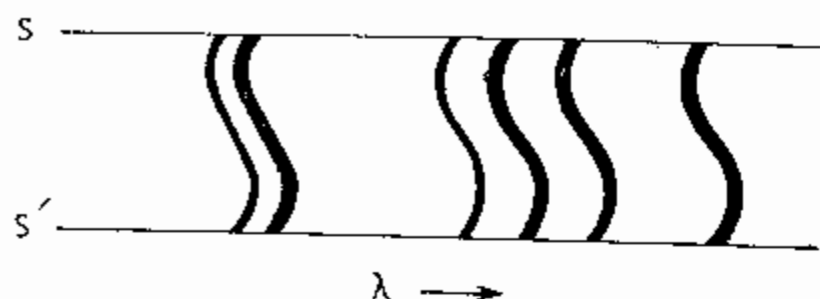


Рис. 3.12. Спектр дифференциально вращающейся галактики.

скорости вращения от расстояния до центра галактики и сопоставить результирующую кривую вращения с кривой вращения нашей Галактики (рис. 2.15). Основная трудность при этом связана с уширением наблюдаемых спектральных линий. Оно происходит по двум причинам. Поскольку излучение галактики представляет собой суммарное излучение ее звезд, уширение спектральных линий обусловлено уширением линий в спектрах отдельных звезд, вызванным главным образом вращением звезд, при котором одна половина их диска приближается, а другая удаляется от нас. К тому же звезды обладают помимо круговых движений вокруг центра галактики еще и случайными движениями. В спиральных галактиках в отличие от эллиптических этими случайными движениями можно пренебречь по сравнению с вращением. Обычно можно найти достаточно узкие спектральные линии, чтобы построить кривую вращения с желаемой точностью.

Наблюдаемые кривые вращения, как правило, похожи на кривую вращения нашей Галактики: центральные области обладают более высокой угловой скоростью, чем внешние. Как мы уже отмечали в гл. 2, в общих чертах мы знаем, чем объясняется такая особенность кривых вращения. Круговая скорость на любом расстоянии от центра должна быть связана с гравитационным ускорением, направленным к центру галактики, выражением

$$v_{\text{circ}}^2 / \tilde{\omega} = -g_{\tilde{\omega}}, \quad (3.2)$$

где $g_{\tilde{\omega}}$ — сила гравитации на единицу массы вдоль радиуса галактики $\tilde{\omega}$. На достаточном удалении от центра галактики ее гравитационное поле с хорошим приближением можно считать полем, создаваемым точечной массой, так что

$$v_{\text{circ}} \propto \tilde{\omega}^{-1/2}. \quad (3.3)$$

Наблюдаемые кривые вращения галактик можно использовать для изучения распределения масс в них и оценки полной массы. Обсуждению соответствующего метода и связанных с ним неопределенностей мы посвятим часть гл. 5, а в этой главе мы будем приводить значения масс, полученные по кривым вращения.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК И СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

Хотя уравнение (3.2) может объяснить дифференциальное вращение галактик по аналогии с обращением планет Солнечной системы вокруг Солнца, описываемым законом Кеплера [уравнение (3.3)], возникает серьезная проблема с объяснением спиральной структуры. Предположим, что в некоторый момент времени галактика обладает несколько идеализированным спиральным узором, показанным на рис. 3.13, а. Предположим также, что кривая вращения галактики имеет описанный выше вид: угловая скорость вблизи центра значительно больше, чем на краю. Рассмотрим теперь эволюцию галактики в течение времени, за которое ее центральная область сделает несколько оборотов, а внешние области не успеют совершить ни одного полного оборота. Легко понять, что ее структура станет такой, как показано на рис. 3.13, б. Спиральные ветви вытянутся и закрутятся, и сравнительно простая форма ветвей быстро исказится. Наблюдаемые кривые вращения галактик свидетельствуют о том, что сильное закручивание спиральных ветвей произойдет за время порядка 10^9 лет, малое по сравнению с оценкой возраста большинства галактик (10^{10} лет или больше). Поскольку наблюдается довольно большое число галактик с отчетливо выраженным спиральным узором, можно сделать вывод, что спиральная структура — долгоживущее явление, которое должно противостоять изменениям, связанным с дифференциальным вращением.

Это привело к предположению о том, что спиральные ветви не могут все время содержать одно и то же вещество. Если бы в их состав постоянно входили одни и те же облака газа и звезды, то эффекты дифференциального вращения, без сомнения, привели бы к изменениям, показанным на рис. 3.13. Чтобы избежать этого, была выдвинута идея, что спиральный узор определяется волной плотности.

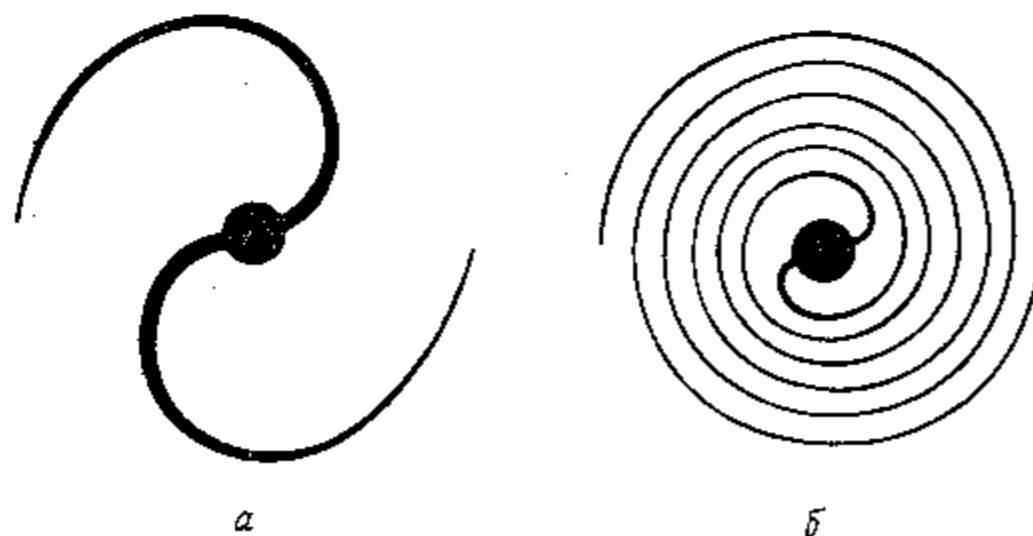


Рис. 3.13. Закручивание «материальных» спиральных рукавов дифференциальным вращением галактики.

Тогда, несмотря на то что спиральный узор существует постоянно, вещество, образующее его, непрерывно меняется. Подобная ситуация имеет место в случае любой волны, например волны на поверхности воды. Ясно, однако, что такая волна плотности должна иметь ряд весьма сложных свойств. Она сама должна обладать дифференциальным вращением, которое будет противодействовать вращению галактики и сохранять спиральный узор в течение значительно более длительного времени, чем в том случае, если бы ее природа не была волновой. Мы продолжим наш разговор о спиральной структуре и приведем ряд аргументов в пользу теории волн плотности в гл. 6.

СВОЙСТВА ГАЛАКТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

В предыдущей главе мы дали очень подробное описание свойств нашей Галактики. Нет смысла повторять его для какой-либо другой галактики, поэтому мы просто сопоставим свойства галактик различных типов. Легче всего это сделать, ограничившись небольшим числом интегральных свойств галактик, таких, как полная масса, масса газа (обычно нейтрального водорода), светимость (в определенном диапазоне длин волн), интегральный цвет, а также химический состав межзвездного газа. В настоящей главе мы обсудим наблюдаемые значения перечисленных величин. Ниже (в гл. 7 и 8) мы коснемся вопроса о том, можно ли объяснить зависимость свойств галактик от их морфологического типа различием в процессах образования галактик и эволюции звезд в них.

В принципе наиболее просто определяемыми характеристиками галактик являются их светимость и цвет. Для любой галактики можно измерить видимую звездную величину и, если расстояние до нее известно, вычислить ее светимость. В гл. 1 мы уже кратко останавливались на том, как строится шкала расстояний, и указывали на ряд трудностей, связанных с оценкой расстояний до галактик. Они приводят к соответствующим неопределенностям в оценке светимости галактик. Цвет же галактики не зависит от расстояния до нее — если она не настолько далека, что имеет значительное красное смещение.

МАССЫ ГАЛАКТИК

Как мы уже упоминали, описание методов определения масс галактик мы отложим до гл. 5. Здесь мы будем использовать уже известные оценки. Первое, что следует отметить — это очень большой диапазон масс галактик, а второе — то, что большинство оценок масс, по-видимому, являются их нижними пределами. Причина этого (как мы узнаем в гл. 5) заключается в том, что обычно невозможно определить полную массу галактики. Мы в состоянии получить лишь оценку массы вещества, заключенного в пределах некоторого расстояния от центра. Для спиральной галактики в качестве такого предела удобно

выбрать расстояние, до которого построена кривая вращения. Во многих случаях во внешних областях галактики может содержаться значительное количество вещества, учет которого увеличит оценку массы на целый порядок. Это следует иметь в виду при обсуждении приведенных ниже цифр.

Нельзя ответить на вопрос, какова минимальная масса галактик. На это есть две причины: во-первых, очень маленькие галактики крайне трудно обнаружить, даже если они расположены по соседству с Галактикой; во-вторых, у нас нет строгого определения того, что считать галактикой. Можно попытаться определить галактику как большое изолированное скопление звезд. В таком случае мы не назовем галактикой шаровое звездное скопление, поскольку оно недостаточно изолировано, но не всегда очевидно, что сравнительно небольшая звездная система является галактикой, а не шаровым звездным скоплением, которое стало независимым, вылетев из галактики. Отсутствие четкого определения того, что называть галактикой, не так уж важно. Нам известно, что существуют карликовые галактики, масса которых не превышает массу большого шарового скопления ($\sim 10^6 M_\odot$). Имеется неопределенность и в оценке массы самых больших галактик; причины этого указывались в предыдущем разделе. Несомненно, существуют гигантские эллиптические галактики, массы которых превышают $10^{12} M_\odot$, а может быть, и $10^{13} M_\odot$. Следовательно, судя по диапазону масс, масса нашей Галактики, равная примерно $1,5 \cdot 10^{11} M_\odot$, выше средней, однако Галактику нельзя считать одной из самых массивных галактик.

Когда исследования галактик только начинались, считалось, что существует некоторое характерное значение их массы, а распределение масс вокруг этого значения имеет вид, схематически представленный кривой *a* на рис. 3.14. Теперь мы знаем, что такое представление

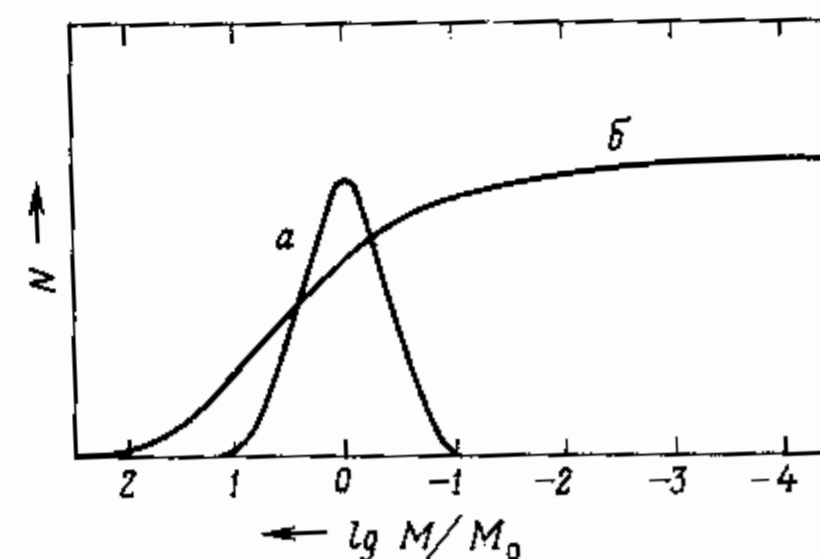


Рис. 3.14. Схема распределения галактик по массам. *a* — результаты ранних определений, *б* — современные данные.

Таблица 3.1

Массы галактик

Все приведенные значения очень приближенные. Если галактики обладают массивными коронами, то массы некоторых из них придется увеличить раз в десять по сравнению с принимаемыми значениями

Название или тип галактики	Масса, M_{\odot}
Массивные эллиптические галактики	10^{13}
M 31 (туманность Андромеды)	$3 \cdot 10^{11}$
Галактика	$1,5 \cdot 10^{11} - 2 \cdot 10^{11}$
Небольшие спиральные галактики	10^{10}
Типичные галактики IгI	10^{10}
Карликовые эллиптические галактики	10^6

абсолютно неверно. Оно явилось следствием того, что слабые маломассивные галактики трудно обнаружить. В настоящее время нет прямых указаний на то, что кривая распределения галактик по массам идет вниз в области малых масс (кривая б на рис. 3.14). Хотя полное число маломассивных галактик известно очень плохо, маловероятно, чтобы учет этих галактик значительно изменил оценку полного количества вещества, заключенного в форме галактик. В гл. 8 будет показано, что эта величина очень важна при изучении эволюции Вселенной в целом. С учетом сказанного выше мы можем привести в табл. 3.1 принятые в настоящее время значения масс галактик. Как видно (и как мы уже отмечали), массы эллиптических галактик охватывают наибольший диапазон. Массы спиральных и неправильных галактик заключены в более узком интервале.

ЗАВИСИМОСТЬ МАССА — СВЕТИМОСТЬ ДЛЯ ГАЛАКТИК

Галактики обычно характеризуются не только массой, но и отношениями масса — светимость (M/L) и масса нейтрального водорода — полная масса (M_{HI}/M). Не все галактики одного и того же морфологического типа имеют одинаковые значения M/L и M_{HI}/M , однако, как оказалось, разброс этих величин в пределах одного морфологического типа меньше, чем при сопоставлении галактик различных типов. Изменение этих отношений вдоль последовательности морфологических типов показано в табл. 3.2. Поскольку массы галактик определяются не столь уверенно, как светимость, и могут быть нами недооценены, приведенные значения M/L могут оказаться заниженными.

Как следует из табл. 3.2, самым высоким значением M/L обладают эллиптические галактики, а самым низким — галактики типа Sc и неправильные галактики. Для отношения M_{HI}/M справедливо обратное.

Таблица 3.2

Отношение масса — светимость и доля по массе нейтрального водорода для галактик различных типов

Все значения очень приближенные, но дают правильное представление об изменении этих величин. Если галактики имеют массивные короны, то M/L может возрасти на порядок, а M_{HI}/M уменьшится. Конечно, в галактиках существует газ и помимо нейтрального водорода

Тип галактик	$(M/M_{\odot})/(L/L_{\odot})$	M_{HI}/M
E	20—40	~ 0
S0	10	0,005
Sa	10	0,03
Sb	10	0,05
Sc	< 10	0,07
IгI	< 10	0,2

В первом приближении можно считать, что эллиптические галактики лишены межзвездного вещества. Здесь мы не будем рассматривать содержание газа в галактиках. Сделаем только одно замечание, отложив подробное обсуждение до гл. 7 и 8. Есть три возможных источника межзвездного газа, наблюдающегося в настоящее время в любой галактике. Это может быть первичный галактический газ, который ни разу еще не побывал в составе звезд, либо газ, входивший в состав звезд и испытавший воздействие ядерных реакций, либо же межгалактический газ, захваченный галактикой при ее движении сквозь межгалактическую среду. Мы должны объяснить количество и химический состав межзвездного газа как результат процессов образования звезд, потери вещества звездами и, возможно, аккреции межгалактического газа.

Отношение M/L зависит как от относительного количества светящегося и несветящегося вещества в галактике, так и от распределения звезд галактики по светимостям. Из гл. 2 мы знаем, что светимость звезды главной последовательности быстро растет с массой, так что приблизительно выполняется соотношение

$$L_s \propto M_s^4. \quad (2.2)$$

С другой стороны, полный запас ядерной энергии звезды удовлетворяет соотношению

$$E_N \propto M_s. \quad (2.3)$$

Отсюда время жизни звезды на главной последовательности

$$t_{\text{ms}} \propto M_s^{-3}. \quad (2.4)$$

Мы знаем также, что звезда проводит на главной последовательности большую часть своей жизни.

Массивные звезды характеризуются гораздо более высоким значением светимости в расчете на единицу массы по сравнению со звездами малой массы, однако их время жизни несравненно короче. Эллиптические галактики, обладающие наибольшим значением M/L , в то же время не содержат или почти не содержат межзвездного газа. Это говорит о том, что в настоящее время или в недавнем прошлом в этих галактиках могло образоваться лишь очень немного звезд. Наблюдения подтверждают, что в эллиптических галактиках отсутствуют массивные голубые звезды главной последовательности. Поскольку в спиральных и неправильных галактиках они есть, неудивительно, что значение M/L для эллиптических галактик выше, чем для спиральных. Понятно также, что интегральный цвет спиральных галактик должен быть голубее, чем эллиптических. Хотя присутствие массивных голубых звезд, безусловно, влияет на отношение M/L , конечно, ни в одной галактике они не могут быть ее основной составляющей. Все значения $(M/M_{\odot})/(L/L_{\odot})$, приведенные в табл. 3.2, сильно превышают единицу. Большое значение M/L , характерное для всех галактик, указывает на то, что основная масса вещества любой галактики должна быть заключена либо в межзвездном газе и угасших звездах, либо в звездах, значительно менее массивных, чем Солнце. По-видимому, в большинстве, если не во всех случаях, справедливо последнее. В гл. 7 будет показано, что отношение M/L должно возрастать по мере эволюции галактик и что очень молодые галактики имели значительно более низкие значения M/L по сравнению с теми, которые мы наблюдаем в настоящее время.

Существует еще одно интегральное свойство галактик, о котором мы упоминали на стр. 80. Это химический состав межзвездного газа. В настоящее время появляется возможность наблюдать изменения химического состава от одной галактики к другой и от одной области к другой внутри отдельной галактики. Эти наблюдения в конечном счете должны дать нам ценную информацию об эволюции галактик. Мы вернемся к этому вопросу в гл. 7.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛАКТИК ВО ВСЕЛЕННОЙ. МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК

Выше мы кратко суммировали наблюдаемые свойства галактик всех типов, кроме пекулярных галактик, на свойствах которых мы остановимся в конце этой главы. Теперь рассмотрим вопрос о том, как распределены галактики в пространстве. Хотя мы попытались определить галактику как изолированную звездную систему, в действительности они обычно не являются по настоящему изолированными. Значительная часть галактик, как и звезд, образует двойные или крат-

ные системы. Наша Галактика имеет по крайней мере два спутника, составляющие вместе с ней гравитационно связанную систему (Большое и Малое Магеллановы Облака). Кроме того, есть несколько более удаленных карликовых эллиптических галактик, которые, находясь вблизи нашей Галактики, также, вероятно, являются ее спутниками. Ответ на вопрос о том, как возникли кратные системы: связаны ли во всех случаях галактики в них общим происхождением или некоторые системы образовались путем последовательного захвата, по-видимому, не столь ясен, как в случае звезд. Столкновение или захват галактик более вероятен, чем звезд, поскольку отношение типичного размера галактики к характерному расстоянию между ними несравненно больше, чем соответствующее отношение для звезд. По этой же причине можно ожидать, что галактики значительно чаще испытывают возмущающее влияние со стороны своих соседей. Выше (стр. 61) мы уже обращали внимание на то, что газовый диск нашей Галактики искажен во внешних областях. Есть мнение, что это искажение связано с гравитационным влиянием со стороны Большого Магелланова Облака, которое этот объект оказывал на нашу Галактику при последнем прохождении через ближайшую к ее центру точку своей орбиты (перигалактий). Некоторые авторы полагают, что вдоль орбиты Магеллановых Облаков находятся также некоторые карликовые галактики, шаровые звездные скопления и облака газа. С их точки зрения, этот так называемый *Магелланов Поток* представляет собой вещество, оставшееся на орбите после столкновения между Магеллановыми Облаками и нашей Галактикой. Здесь можно провести аналогию с кометами и метеорными потоками, обращающимися вокруг Солнца по одной и той же орбите.

Галактики образуют не только пары и триплеты, они проявляют сильную тенденцию к образованию групп большего размера, или скоплений, в некотором смысле подобных рассеянным и шаровым звездным скоплениям. Наша Галактика принадлежит к так называемой *Местной группе галактик*, которая насчитывает по крайней мере 20 членов. Наверняка к ней относятся и некоторые из карликовых галактик, членство которых еще не установлено надежно, и возможно другие, пока не открытые галактики. Основные члены Местной группы и некоторые их характеристики перечислены в табл. 3.3. Из табл. 3.3 следует, что Местная группа состоит из галактик самых различных типов, но в ее составе нет гигантских эллиптических галактик, и это неудивительно, если принять во внимание, насколько редко они встречаются по сравнению с галактиками других типов. Наша Галактика не является самой массивной даже среди галактик Местной группы, однако она вместе с довольно похожей на нее галактикой в созвездии Андромеды (M31), которая в 1,5 раза массивней, выделяется по своей массе среди остальных членов. Из табл. 3.3 легко

Таблица 3.3

Основные члены Местной группы галактик

M_V — визуальная абсолютная звездная величина ($\text{const} - 2,5 \lg L$). Для некоторых членов указано расстояние от Галактики. M 32 и NGC 205 — спутники M 31. Символ d относится к карликовым галактикам. Фотографии M 31, Большого Магелланова Облака и NGC 147 приведены на рис. 1.12, 1.13 и 3.8

Название галактики	Тип	M_V	Расстояние, кпс
Туманность Андромеды M 31 = NGC 224	Sb	-21,1 ^m	690
Галактика	Sb или Sc	-20 ?	—
M 33 = NGC 598	Sc	-18,9	690
Большое Магелланово Облако	Ir I	-18,5	50
Малое Магелланово Облако	Ir I	-16,8	60
NGC 205	E6	-16,4	—
M 32 = NGC 221	E2	-16,4	—
NGC 6822	Ir 1	-15,7	460
NGC 185	dE0	-15,2	—
NGC 147	dE4	-14,9	—
IC 1613	Ir 1	-14,8	740
Система в Печи	dE	-13,6	—
Система в Скульпторе	dE	-11,7	—
Лев I	dE	-11,0	—
Лев II	dE	-9,4	—
Система в Большой Медведице	dE	-8,8	—
Система в Драконе	dE	-8,6	—

оценить, каковы размеры Местной группы. Из нее же следует, что ближайшая к нам большая галактика расположена на расстоянии 690 кпс.

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Галактики образуют и такие группы, которые значительно превышают по размерам Местную группу, их называют скоплениями галактик. Большое скопление может насчитывать тысячи членов без учета небольших слабых галактик, недоступных наблюдениям. Самым близким большим скоплением галактик является скопление в Деве; на рис. 3.2 уже была приведена фотография наиболее массивного его члена. Считается, что центр этого скопления находится на расстоянии около 15 Мпс от Галактики. Есть основание полагать, что сама Местная группа является далеким спутником этого скопления. Другим очень хорошо известным скоплением, находящимся несколько дальше, чем скопление в Деве, является скопление галактик в созвездии Волосы Вероники (рис. 3.15).

При наблюдениях далеких объектов астрономы обычно исследуют



Рис. 3.15. Близкое скопление галактик в созвездии Волосы Вероники. (Фотография выполнена на 5-метровом паломарском телескопе обсерваторий им. Хейла.)

свойства не отдельных галактик, а их скоплений. Скопления галактик, так же как и звезды, и галактики, делятся на классы в зависимости от числа членов (класс богатства). Наиболее массивные галактики самой высокой светимости обычно наблюдаются в самых богатых скоплениях. Скопление сначала выявляют по повышенной поверхностной плотности галактик в данной области неба по сравнению с характерной плотностью в окружающих областях. Затем предполагается, что скопление представляет собой гравитационно связанную систему. Это предположение станет более обоснованным, если окажется, что члены подозреваемого скопления имеют сходные красные смещения. Тогда галактики, наблюдающиеся в направлении на скопление, красные смещения которых сильно отличаются от среднего значения, следует рассматривать как объекты ближнего или дальнего фона, не принадлежащие к скоплению. Хотя подобный способ отождествления скоплений галактик представляется достаточно надежным, здесь все же имеются свои трудности, о которых мы расскажем в гл. 5 и 8. Если скопления галактик действительно являются гравитационно связанными системами, то это означает, что гравитационное притяжение всех галактик достаточно велико, чтобы не позволить отдельным членам скопления покинуть его. По наблюдаемым случайным скоростям галактик мы

можем определить, какова приблизительно должна быть полная масса скопления, чтобы галактики удерживались в нем. Часто оказывалось, что эта масса намного превышает массу скопления, если только не считать, что значительная часть вещества не доступна наблюдениям. Позднее мы подробнее остановимся на этой проблеме *скрытой массы*.

Хотя нам известно, что многие галактики входят в скопления, остается еще целый ряд нерешенных вопросов.

1. Существуют ли в достаточно большом числе галактики, не принадлежащие к скоплениям?

2. Существуют ли скопления всех возможных размеров и бывают ли скопления скоплений?

Эти вопросы решаются путем статистического анализа распределения большого числа галактик, и на них в настоящее время нет ясных ответов. По-видимому, значительного прогресса в решении этих вопросов можно ожидать в ближайшие годы, поскольку современные телескопы и их оборудование позволяют наблюдать гораздо более слабые галактики, чем раньше, а новые измерительные машины способны измерить координаты и звездные величины многих миллионов галактик.

Еще один вопрос, который хотелось бы затронуть, связан с относительным числом галактик различных типов. Согласно наиболее ранним исследованиям, относившимся лишь к сравнительно близким объектам и не учитывавшим карликовые эллиптические галактики и галактики богатых скоплений, большинство галактик являются спиральными. Значительный процент приходится на эллиптические галактики, и очень небольшая доля галактик относится к неправильным и линзовидным. В настоящее время получена совершенно иная картина. И эллиптические, и линзовидные галактики более многочисленны, чем спиральные, хотя эти три класса галактик можно считать основными. Так в центральных областях богатых скоплений сильно сплюснутые галактики в большинстве своем являются линзовидными.

КРУПНОМАСШТАБНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛАКТИК

Обратимся теперь к распределению и движению галактик в самых больших масштабах, доступных наблюдениям. Прежде всего можно проверить, одинаковое ли число галактик наблюдается в различных областях неба, если, конечно, эти области значительно превосходят по размерам отдельные скопления галактик. Если говорить о звездах нашей Галактики, то мы знаем, что они распределены неравномерно: ярчайшие звезды разбросаны по всему небу, а более слабые наблюдаются преимущественно в полосе Млечного Пути, т.е. в диске Галактики. Далекие галактики распределены совсем иначе. Мы наблюдаем приблизительно *изотропное распределение галактик*, включая наиболее слабые из них. Не обнаружено четких признаков какой-либо сплюснутости всей наблюдаемой системы галактик, хотя форма многих отдельных скоплений, без сомнения, отличается от сферической.

РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Вторым важным эмпирическим выводом является один из выводов, уже обсуждавшихся в гл. 1. Спектральные линии далеких галактик смещены к красному концу спектра, и красное смещение связано с расстоянием до галактик. Эта зависимость была установлена Хабблом в 20-х годах, хотя первые результаты спектральных наблюдений были получены несколько раньше. Если интерпретировать красное смещение как следствие эффекта Доплера (а именно так мы и поступали, когда рассматривали движение звезд в галактиках и галактик в скоплениях), то это означает, что существует общее расширение Вселенной, при котором далекие галактики удаляются от нас быстрее, чем более близкие. Хотя время от времени делались попытки найти иное объяснение красному смещению, большинство астрономов считают расширение Вселенной наиболее вероятной причиной красного смещения в спектрах далеких галактик.

ЗАНИМАЕТ ЛИ НАША ГАЛАКТИКА ОСОБОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ВО ВСЕЛЕННОЙ?

Может показаться, что наблюдения изотропной системы галактик, о которых шла речь в двух предыдущих разделах, свидетельствуют о том, что наша Галактика занимает особое положение в центре Вселенной. Если Вселенная обладает единым центром, то такой вывод действительно неизбежен. Однако легко показать, что независимо от того, является ли Вселенная бесконечной в пространстве или это пространство искривлено и конечно, любую точку Вселенной можно считать находящейся в центре. На рис. 3.16 приведены два примера, иллюстрирующие это положение; разумеется, они неприменимы к реальной Вселенной. На рис. 3.16, а показаны точки, разделенные правильными промежутками, которые заполняют бесконечное двумерное евклидово пространство, а на рис. 3.16, б — точки, которые мы будем считать однородно распределенными по поверхности сферы. В обоих случаях, если расстояние между всеми точками равномерно увеличивается (во втором случае это равносильно расширению сферы), то относительно каждой точки все другие будут удаляться со скоростью,

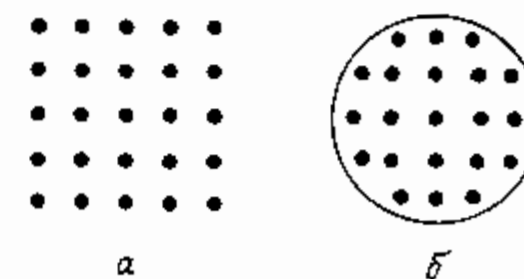


Рис. 3.16.

пропорциональной расстоянию. Согласно общей теории относительности, пространство-время должно быть искривлено. Эта теория допускает однородные изотропные расширяющиеся модели Вселенной. Однородность Вселенной означает, что ее свойства в среднем во всех точках одинаковы. Отсюда, в частности, следует, что не существует единого центра расширения. В гл. 8 мы обсудим такие модели расширяющейся Вселенной.

ПЕКУЛЯРНЫЕ ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ

До сих пор в этой главе мы ограничивались обсуждением характеристик таких галактик, которые можно назвать нормальными. В конце главы мы коснемся редко встречающихся галактик с необычными свойствами и проанализируем, действительно ли некоторые из них являются аномальными или же в жизни большинства галактик имеются такие периоды, когда они выглядят пекулярными. Начнем с категории объектов, представления о которых, по-видимому, наиболее противоречивы и которые, возможно, являются галактиками, — с квазаров.

КВАЗАРЫ

История открытия квазаров очень интересна. С развитием радиоастрономии было установлено, что наподобие точечных источников света — звезд — во Вселенной существуют точечные источники радиоизлучения. Эти объекты называли *радиозвездами*. Угловое разрешение первых радиотелескопов было очень низким, но, по мере того как оно улучшалось, выяснилось, что большинство радиозвезд являются протяженными источниками радиоизлучения и что многие из них можно отождествить либо с облаками газа в нашей Галактике, либо с другими галактиками*. Сам термин «радиозвезда» на долгое время был забыт, поскольку возникло сомнение, существуют ли вообще настоящие радиозвезды, и был принят термин *источник космического радиоизлучения* или просто *радиоисточник*, который широко используется и в настоящее время. Но в 1962 г. были открыты четыре радиоисточника, положение которых совпадало, как тогда считали, с четырьмя слабыми звездами. Было решено, что обнаружены первые радиозвезды, однако это предположение вскоре было отвергнуто. Сначала спектры этих звезд совершенно не поддавались расшифровке, но затем удалось установить, что их можно объяснить, полагая, что спектральные линии обладают красным смещением, сравнимым или значительно большим,

* Конечно, существует источник переменного радиоизлучения, связанный с Солнцем, особенно сильный, когда на нем много пятен. Однако радиоизлучение Солнца слишком слабое, чтобы его можно было уловить, если бы Солнце находилось на расстоянии ближайших звезд. В настоящее время обнаружено радиоизлучение от некоторых звезд.

чем у самых далеких из наблюдаемых галактик. Поскольку эти объекты выглядели как звезды, их называли *квазизвездными объектами* или сокращенно *квазарами*. Хотя, как считают, квазары несравненно больше звезд по размерам, они все же могут выглядеть как точечные источники света, потому что находятся на очень больших расстояниях. Об этом свидетельствуют их большие красные смещения, если принять, что они имеют доплеровскую космологическую природу. Однако квазары должны быть значительно меньше обычных галактик. Если их красное смещение связано с космологическим расширением, то квазары — это самые далекие из известных объектов Вселенной, а их мощность излучения, достигающая 10^{41} Вт, больше, чем у любых других известных объектов. Хотя первые квазары были открыты по их радиоизлучению, наиболее примечательными являются особенности их оптического излучения. К этим особенностям мы прежде всего отнесем высокую светимость, значительно превышающую светимость обычной галактики и сосредоточенную в объеме, несравненно меньшем объема галактики. Как только появилась возможность открывать квазары без помощи радионаблюдений, было найдено много «радиоспокойных» квазаров.

ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРАХ КВАЗАРОВ

Не все астрономы согласны с тем, что красные смещения квазаров имеют космологическую доплеровскую природу, и на этом мы еще остановимся ниже. Но об одном из свойств квазаров следует, однако, сказать сейчас. Красные смещения квазаров первоначально были измерены по их эмиссионным линиям (рис. 3.17), а не по линиям погло-

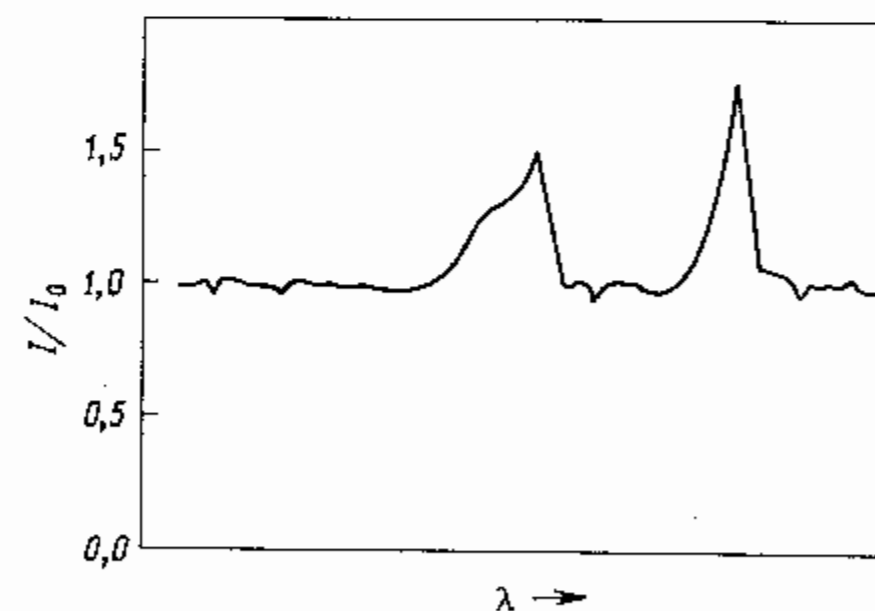


Рис. 3.17. Две сильные эмиссионные линии в спектре квазара. Интенсивность излучения I в линиях намного выше интенсивности I_0 в соседних участках спектра.

щения (рис. 3.18), которые обычно используются при изучении звездных спектров. Однако в спектрах некоторых квазаров удалось отождествить как линии излучения, так и линии поглощения, и в этих случаях были обнаружены весьма любопытные особенности. Оказалось, что в спектрах квазаров может присутствовать несколько групп линий поглощения, имеющих различные красные смещения, которые в свою очередь отличаются от красного смещения линий излучения. Если все эти красные смещения объясняются эффектом Доплера, то относительные скорости областей, излучающих свет, и областей, в которых возникают линии поглощения, могут составлять значительную долю скорости света. Это связано либо с большими относительными скоростями в самом квазаре, либо с существованием облаков межгалактического газа между квазаром и наблюдателем, которые поглощают свет квазара. В первом случае возможно, что газовые облака выброшены из центральных областей квазара с большими скоростями (рис. 3.19). Во втором случае объяснение аналогично приведенному в гл. 2 объяснению поглощения света звезд межзвездными облаками. Большое различие между красными смещениями линий может возникнуть в том случае, если межгалактическое облако находится достаточно далеко от квазара, и поэтому его скорость удаления от нас будет сильно отличаться от скорости квазара. К сожалению, плотность распределения квазаров по небесной сфере недостаточна для того, чтобы можно было проверить гипотезу о межгалактических облаках, наблюдая линии с одним и тем же красным смещением в близких друг к другу (на небесной сфере) квазарах. Хотя происхождение красных смещений

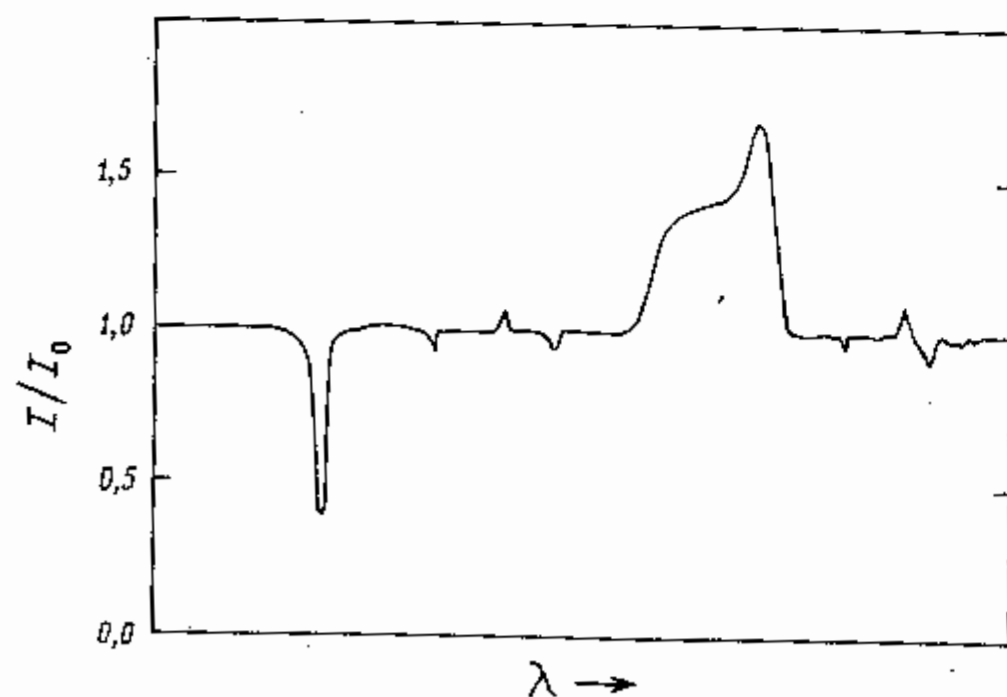


Рис. 3.18. Линия поглощения в спектре квазара смещена в фиолетовую сторону по отношению к соответствующей эмиссионной линии.

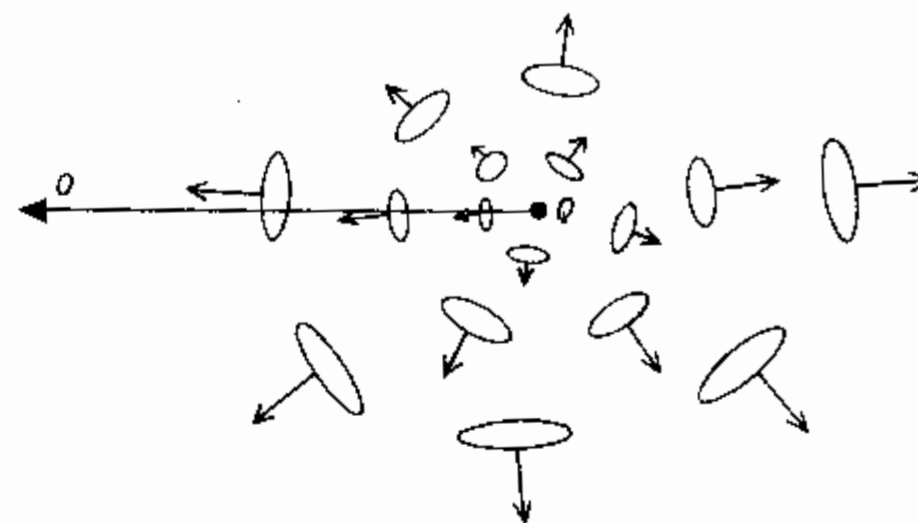


Рис. 3.19. Возможное расположение газовых облаков, движущихся от квазара Q внутри его оболочки. Несколько облаков лежат на луче зрения наблюдателя O.

линий поглощения не совсем ясно, в большинстве случаев, вероятнее всего, они связаны с процессами в самом квазаре. Однако в некоторых случаях, по-видимому, межгалактические облака также играют свою роль.

РАДИОГАЛАКТИКИ

Оставим пока в стороне квазары и обратимся к другим объектам, принадлежность которых к классу галактик не вызывает сомнений. Мы уже упоминали, что некоторые радиоисточники можно отождествить с галактиками. Любая галактика является источником радиоизлучения, которое возникает при различных процессах, происходящих внутри нее, однако некоторые галактики являются очень мощными источниками радиоволн. Они получили название *радиогалактик*. Простейший тип радиогалактики — *двойной радиоисточник* (рис. 3.20). В этом случае наблюдается галактика (обычно очень большая эллиптическая галактика), а по обе стороны на значительном расстоянии от нее располагаются области мощного радиоизлучения. Часто также заметно слабое радиоизлучение между этими областями и галактикой. В центре самой галактики может присутствовать мощный и очень компактный источник. По мере накопления радиоданных становится все более очевидным, что мощный центральный источник присутствует во всех радиогалактиках. Хотя мы не можем определить расстояние до областей радиоизлучения, их положение по отношению к оптической галактике не позволяет считать связь с ней случайной. Не у всех радиогалактик структура настолько проста и ясна. В некоторых случаях наблюдаются более чем два компонента радиоисточника, а в некоторых невозможно

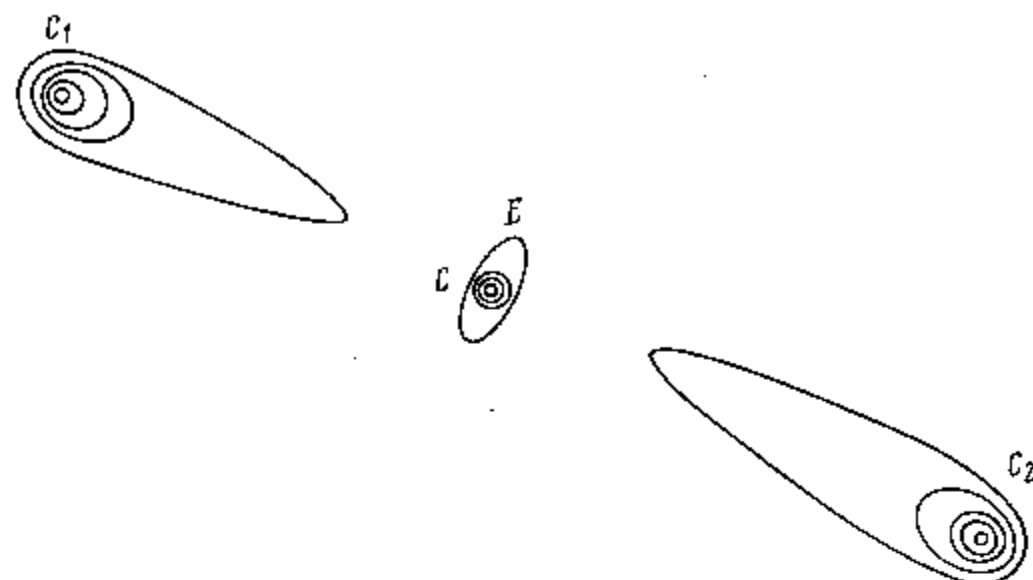


Рис. 3.20. Двойной радиосточник. Компоненты C_1 и C_2 расположены по обе стороны от эллиптической галактики E . C — центральный радиосточник. Кривые — линии равной радиояркости.

найти связь с оптической галактикой — расстояние до нее, по-видимому, слишком велико, чтобы ее можно было заметить. Однако можно не сомневаться в существовании радиогалактик простейшего типа.

ЭНЕРГИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Принято считать, что радиогалактика описанного типа возникает в результате взрыва или какого-либо другого бурного процесса в центре галактики. Количество энергии, выделяющейся при таком взрыве, должно быть очень большим. Наиболее разумное объяснение радиоизлучения объектов этого и большинства других типов заключается в том, что его порождают заряженные частицы, летящие в магнитном поле (рис. 3.21). Заряженные частицы движутся в магнитном поле по винтовым траекториям, и поскольку при этом они движутся ускоренно, то излучают энергию. При ожидаемых значениях начальной энергии частицы (электрона) и напряженности магнитного поля это излучение должно приходиться на радиодиапазон. Электрон, имеющий

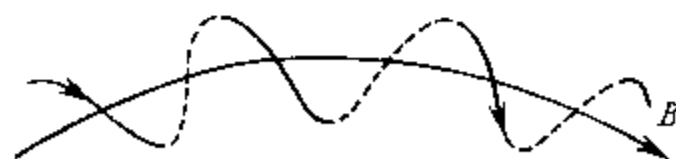


Рис. 3.21. Движение заряженных частиц по винтовой траектории вдоль силовой линии магнитного поля.

Таблица 3.4

Минимальная энергия трех
внегалактических радиосточников

Радиосточник	Энергия, Дж
Лебедь А	$2 \cdot 10^{52}$
Центавр А	10^{53}
3C 236	10^{54}

энергию ϵ и движущийся в поле с магнитной индукцией B , излучает на частотах, близких к

$$\nu_{\max} = (eB_{\perp} / 4\pi m_e) (\epsilon / m_e c^2)^2, \quad (3.4)$$

где B_{\perp} — составляющая вектора магнитной индукции, направленная перпендикулярно вектору скорости частицы. Такое излучение называется *синхротронным*, поскольку тот же механизм излучения действует в ускорителе частиц, называемом синхротроном. Мощность излучения зависит как от полной энергии частиц, так и от составляющей вектора B , перпендикулярной направлению движения. Она определяется формулой

$$P_{\text{рад}} \approx 1,6 \cdot 10^{-14} B^2 \epsilon \epsilon_{\text{tot}} / (m_e^2 c^4) [\text{Вт}]^*, \quad (3.5)$$

где $P_{\text{рад}}$ — мощность излучения, а ϵ_{tot} — полная энергия частиц. Излучение данной мощности может генерироваться либо высокоэнергичными частицами, находящимися в слабом магнитном поле, либо частицами с меньшей энергией, но двигающимися в более сильном поле. Можно однако показать, что существует минимальное значение полной энергии заряженных частиц и магнитного поля, необходимое для объяснения наблюдаемой мощности радиосточников. Эта минимальная энергия бывает чрезвычайно большой (табл. 3.4).

Даже эти оценки пришлось значительно увеличить, когда выяснилось, что в радиокомпонентах может присутствовать вещество, не вносящее вклада в наблюдаемое радиоизлучение. К этому веществу могут относиться как высокоэнергичные атомные ядра, так и холодная среда. Ядра атомов неизбежно должны присутствовать, чтобы был компенсирован электрический заряд электронов, и их учет увеличит оценку энергии, содержащейся в радиосточниках, на один-два порядка величины.

* Здесь принято, что энергия всех электронов одинакова, но в действительности это не так. Формула (3.5) останется справедливой, если ϵ — соответствующим образом определенная средняя энергия.

Хотя в некоторых случаях помимо синхротронного механизма могут действовать и другие, более эффективные механизмы потери энергии, тем не менее полная энергия, содержащаяся в радиокомпонентах радиогалактик должна быть очень высокой. В книге небольшого объема мы не в состоянии подробно останавливаться на теориях строения радиоисточников, которые к тому же очень противоречивы. Можно, однако, отметить, что, как теперь обычно считают, не вся энергия радиокомпонентов была приобретена ими при начальном взрыве, инжекция энергии в них продолжается непрерывно. Это свидетельствует о бурных активных процессах в центральных областях галактик, что придает им сходство с квазарами. К этому следует добавить, что некоторые квазары также оказались двойными в радиодиапазоне, хотя расстояние между их радиокомпонентами меньше, чем в случае радиогалактик.

ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ. СЕЙФЕРТОВСКИЕ ГАЛАКТИКИ

Выше было введено понятие пекулярной галактики. Пекулярные галактики можно разделить на два типа. Во-первых, к ним относятся галактики, имеющие близких соседей, так что их форма сильно искажена гравитационным воздействием соседней галактики. Мы не будем останавливаться на этой разновидности галактик. Во-вторых, к пекулярным относятся «активные» галактики, в которых происходят бурные процессы, вызванные действием внутренних сил. К этому классу принадлежат и радиогалактики. Существуют и другие типы «активных» галактик. Они могут быть мощными источниками излучения в рентгеновской и радиообласти спектра, хотя и были впервые открыты по присутствию очень широких эмиссионных линий в оптических спектрах. Профиль этих эмиссионных линий можно объяснить, считая, что газ истекает из центральной области галактики в результате происшедшего там взрыва. Галактики одного из таких типов, обладающие мощными эмиссионными линиями в спектре, называются *сейфертовскими* в честь их первооткрывателя К. Сейферта. В отличие от мощных радиогалактик многие сейфертовские галактики являются спиральными. В последнее время стало очевидным, что взрывные процессы в ядрах галактик не редкость. Интенсивность взрывной активности ядра сильно меняется от галактики к галактике. Даже в нашей Галактике имеются указания на бурную активность ядра в недавнем прошлом, которая привела к движению газа по направлению от центра (об этом мы упоминали в гл. 2). Последствия взрыва не могут сохраняться вечно. Маловероятно, что «активные» галактики чем-то принципиально отличаются от нормальных галактик, со свойствами которых мы познакомились в начале этой главы в связи с классификацией Хаббла. Скорее, любая галактика время от времени

становится «активной». Вид и степень активности могут зависеть от типа по Хабблу и возраста галактики, а возможно, и от того, является ли она членом скопления.

ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Мы уже видели, что для образования мощных двойных радиоисточников требуется освобождение колоссальной энергии. Это справедливо и для квазаров, если они находятся на космологических расстояниях. Поскольку оказалось очень трудным найти объяснение тому, откуда берется энергия, освобождаемая в квазарах, некоторые исследователи выдвинули предположение, что квазары расположены значительно ближе к нам и, следовательно, их светимость не столь высока. Тогда красные смещения квазаров либо вызываются их очень высокими скоростями, не космологическими по природе, либо имеют недоплеровское (и возможно, неизвестное) происхождение. В любом случае многое остается неясным. Попытки установить расстояние до квазаров сконцентрированы на проверке двух возможностей: принадлежат ли квазары со сравнительно низким красным смещением к скоплениям галактик, имеющим примерно такое же красное смещение, или же квазары физически связаны с галактиками со значительно меньшим красным смещением. В первом случае подтвердилась бы правильность космологической интерпретации красного смещения квазаров, во втором оказалось бы, что некоторая часть их красного смещения имеет не космологическую природу. Выдвигались и обсуждались утверждения, что наблюдения свидетельствуют в пользу как той, так и другой точки зрения. Автор придерживается космологической интерпретации красного смещения квазаров.

Какова бы ни была природа квазаров, нам не избежать вывода об очень высоких темпах выделения энергии в радиогалактиках. Первоначально предполагалось, что энергия взрывов в ядрах галактик имеет термоядерное происхождение. Ядерные реакции в плотном веществе ядра галактики могут высвободить большое количество энергии. Затем выяснилось, что образование некоторых радиогалактик требует взрыва слишком большой массы вещества, поскольку при ядерных реакциях, происходящих в веществе с массой M , не может выделиться, по-видимому, более одного процента энергии Mc^2 , соответствующей ее массе покоя. В отдельных случаях приходится говорить о взрыве $10^9 M_\odot$. Хотя природа источника энергии еще не объяснена полностью, считается, что большую роль должна играть гравитационная энергия. Согласно общей теории относительности, максимальная энергия, которая может выделиться при коллапсе тела, равна его энергии покоя. Детальные исследования показали, что эта предельная

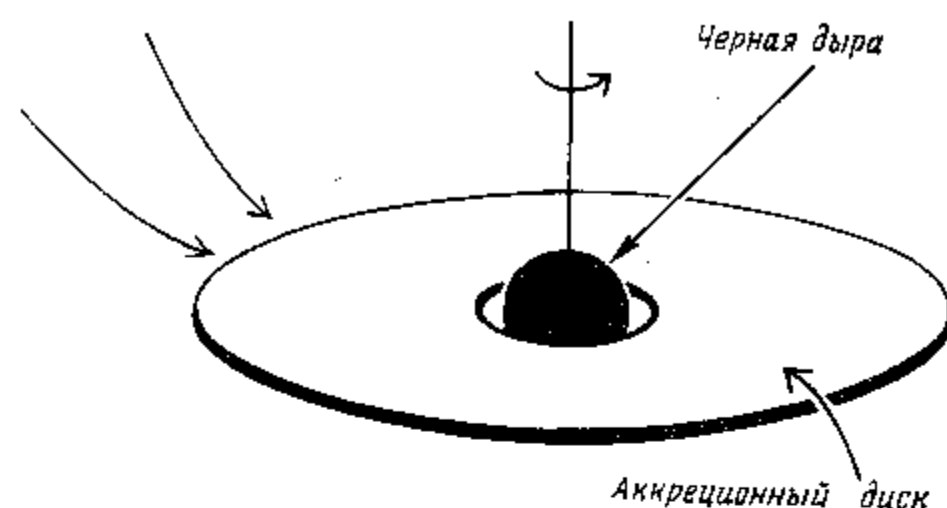


Рис. 3.22. Аккреционный диск вокруг черной дыры. Вещество, падающее к черной дыре в направлении, указанном стрелками слева, образует вращающийся плоский диск. Вследствие трения вещество диска постепенно движется к центру. В промежутке между аккреционным диском и черной дырой не существует устойчивых орбит.

энергия недостижима, однако в процессе сжатия тела до его радиуса Шварцшильда*

$$R_{\text{Sch}} = 2GM/c^2 \quad (3.6)$$

вполне может выделиться энергия, равная $0,1 Mc^2$. Как только будет достигнут радиус Шварцшильда, ни один квант не сможет покинуть объект, и он превратится в так называемую черную дыру. При построении моделей радиоисточников обычно принимается, что вещество падает на уже существующую черную дыру. Если частицы падают радиально, не сталкиваясь с другими частицами, то никакого выделения полезной энергии не произойдет. Однако можно ожидать, что момент количества движения падающих частиц относительно центрального тела не равен нулю, и тогда частицы образуют вокруг него аккреционный диск (рис. 3.22). Диссипация энергии, связанная с трением вещества в этом диске, и приводит к освобождению полезной энергии. Ясно, что требуется время на то, чтобы окончательно понять свойства активных ядер галактики.

* Существование этого критического радиуса можно понять, не обращаясь к общей теории относительности. Согласно механике Ньютона, скорость убегания с поверхности тела массой M и радиусом R равна $v_{\text{esc}}^2 = 2GM/R$. Из специальной теории относительности следует, что скорость передачи энергии не должна превышать скорости света. С учетом этого ограничения написанное выше выражение и приводит к формуле (3.6).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 3

Галактики можно классифицировать по их морфологическим признакам. Большинство из них имеет довольно правильную форму, и их можно отнести к одному из следующих классов: эллиптические, линзовидные, спиральные и спиральные галактики с перемычкой. Эллиптические галактики, фактически являющиеся сфероидальными образованиями, имеют две оси сравнимых размеров, галактики других типов сильно сплюснуты. Помимо галактик с правильными очертаниями, есть два типа неправильных галактик. Галактики IrI характеризуются несимметричным распределением яркости, но значительно более симметричным распределением вещества, тогда как галактики IrII имеют действительно неправильную форму. В сильно сплюснутых галактиках скорости вращения звезд вокруг центра значительно превосходят скорости их хаотического движения, в эллиптических галактиках, наоборот, скорости вращения играют значительно меньшую роль. Наблюдения также показывают, что спиральные галактики вращаются неоднородно. Это означает, что долгоживущая спиральная структура не образована постоянно входящим в нее веществом, а является волной плотности.

Диапазон масс галактик очень широк — от гигантских эллиптических галактик с массой до $10^{13} M_{\odot}$ до карликовых галактик, масса которых составляет $10^6 M_{\odot}$ или меньше. Массы спиральных и большинства неправильных галактик лежат в этих пределах. Оценки масс всех галактик остаются очень неуверенными, многие из них могут обладать большими массами за счет вещества, заключенного в протяженных коронах. Отношения масса — светимость и масса нейтрального водорода — полная масса заметно меняются от класса к классу: спиральные и неправильные галактики характеризуются как более высоким содержанием газа, так и более низкими значениями M/L по сравнению с эллиптическими. Более низкое отношение M/L частично связано с присутствием массивных ярких голубых звезд в спиральных и неправильных галактиках. Однако во всех случаях отношения M/L настолько велики, что можно утверждать, что основная доля массы галактик приходится на маломассивные или угасшие звезды.

Многие галактики принадлежат к двойным или кратным системам. Они могут быть также членами групп или скоплений. Двумя самыми большими спутниками нашей Галактики являются Магеллановы Облака. Галактика принадлежит к Местной группе галактик, в которой она занимает второе место по массе. Местная группа в свою очередь является спутником большого скопления галактик в Деве. Пока не выяснено окончательно, все ли галактики принадлежат к скоплениям и существуют ли «скопления скоплений». В наибольших наблюдаемых масштабах распределение галактик приблизительно изотропно. Далекие галактики характеризуются большим красным смещением в спектрах, что свидетельствует о расширении Вселенной, если справедлива доплеровская интерпретация красных смещений.

Небольшая часть галактик, которые можно классифицировать как неправильные или которые по основным параметрам близки к спиральным или эллиптическим, называются пекулярными галактиками или галактиками с активными ядрами. К ним относятся несколько типов галактик, в ядрах которых наблюдаются бурные процессы. Разновидностью таких галактик являются радиогалактики, в которых по обе стороны от родительской галактики расположены обширные области радиоизлучения. Другой пример — сейфертовские галактики, в них наблюдаются потоки газа, по-видимому, истекающие из ядра в результате происшедшего там взрыва. Вероятно, в жизни многих галактик имеются периоды, когда они становятся пекулярными, разделенные более продолжительными промежутками времени, в течение которых галактики находятся в «нормальном» состоянии. Квазары, отличающиеся самыми высокими из известных красных смещений и являющиеся очень компактными объектами с оптической светимостью, более высокой, чем у галактик (если их красное смещение имеет космологическую природу), могут быть родственны ядрам галактик. Источник энергии квазаров и активных ядер галактик не установлен окончательно. Возможно, что он связан с выделением гравитационной энергии при падении вещества на черную дыру.

Глава 4

Звездная динамика *

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей главе мы будем считать, что галактика состоит из одних только звезд. В первом приближении это действительно так, поскольку в течение почти всего времени существования галактики масса, заключенная в звездах, значительно превосходит массу межзвездного газа. К тому же звезды оказывают несравненно более сильное влияние на межзвездный газ, чем газ на звезды. Хотя между звездами и межзвездной средой непрерывно происходит обмен веществом, этот процесс после завершения стадии формирования галактики протекает очень медленно по сравнению с временем, которое требуется для пролета через галактику отдельной звезды. В этой главе в основном рассматривается наша Галактика, но ее можно считать типичной галактикой.

Прежде всего отметим, что если рассматривать нашу Галактику как систему звезд, то сами звезды с достаточной степенью точности допустимо считать точечными массами. Повсюду, за исключением наиболее плотных областей, расстояние между звездами в галактиках редко бывает меньше 10^{16} м, тогда как лишь самые большие звезды имеют радиус, превышающий 10^{10} м. Таким образом, отношение радиуса звезд к расстоянию между ними обычно меньше (часто во много раз) 10^{-6} . Так, для Солнца и ближайшей к нему звезды это отношение равно $2 \cdot 10^{-8}$. Для сравнения укажем, что аналогичное отношение, типичное для молекул воздуха при нормальном давлении, составляет около $1/50$. Отсюда следует, что, когда нас не интересуют физические свойства отдельных звезд, можно рассматривать совокупность звезд как газ и применять для его описания представления, которые используются в кинетической теории газов. Конечно, многие звезды являются членами двойных или кратных систем, в этом случае отношение расстояния между звездами к их размеру будет во много раз меньше. Тогда мы можем рассматривать двойные или кратные системы как молекулы газа, не меняя общей схемы рассуждений.

Галактики состоят из очень большого числа звезд (10^{11} или более звезд в средней или гигантской галактике), которые гравитационно

* Содержание данной главы несколько выходит за рамки темы этой книги; оно также более «математизировано». Эту главу можно пропустить без ущерба для понимания остального материала. Основные выводы, которые будут использованы в дальнейшем, приведены в конце главы.

взаимодействуют друг с другом. Хотя мы хорошо знаем силы, с которыми звезды притягивают друг друга, совершенно очевидно, что мы не можем исследовать движение каждой звезды по отдельности, а если бы даже могли это сделать, то получили бы много совершенно лишней информации. По этой причине обычно используют статистический подход (кинетическую теорию). Ниже, однако, мы увидим, что некоторые интересные выводы могут быть получены и по изучению движения одной звезды в усредненном гравитационном поле, создаваемом всеми остальными звездами. Такой метод называется методом *пробной частицы*. Он может быть использован, например, для того, чтобы найти, какой путь прошло наше Солнце в Галактике за всю свою историю.

ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В кинетической теории газов состояние системы принято описывать с помощью так называемой *функции распределения*. Если газ состоит из частиц только одного типа (например, из молекул водорода), то обычно вводят функцию распределения $F(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t)$, где (x, y, z) — координаты какой-либо молекулы, а (v_x, v_y, v_z) — компоненты ее скорости. При этом число молекул в элементе объема $\delta x \delta y \delta z$ с центром в точке (x, y, z) , скорости которых лежат в пределах объема $\delta v_x \delta v_y \delta v_z$ пространства скоростей с координатами центра v_x, v_y, v_z в момент t , равно

$$\delta N = F(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t) \delta x \delta y \delta z \delta v_x \delta v_y \delta v_z. \quad (4.1)$$

В случае звездной системы используется несколько иное определение, поскольку звезды обладают различными массами, причем возможны любые значения масс. Поэтому удобнее ввести *функцию распределения по массам* таким образом, чтобы величина

$$\delta M = f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t) \delta x \delta y \delta z \delta v_x \delta v_y \delta v_z \quad (4.2)$$

определяла полную массу, заключенную в звездах в элементе объема фазового пространства.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСВЕЛЛА

При решении большинства элементарных задач в кинетической теории газов (в частности, тех, в которых рассматриваются электрически нейтральные молекулы) обычно используют функцию распределения F , почти не отличающуюся от так называемой *функции Максвелла*:

$$F = n(m/2\pi kT)^{3/2} \exp[-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/2kT]. \quad (4.3)$$

Здесь n — число частиц в единице объема, а T — температура газа. Рассмотрим поведение содержащегося в замкнутом объеме газа, начальное распределение молекул которого по скоростям отличается от максвелловского. Можно показать, что столкновения молекул друг с другом

и со стенками сосуда приведут к тому, что функция распределения будет очень быстро приближаться к максвелловской. Обычно это происходит за время, короткое по сравнению с продолжительностью эксперимента, поэтому, как правило, можно ограничиваться рассмотрением функций распределения, мало отличающихся от максвелловской. Одним из важнейших свойств максвелловского распределения является одинаковое распределение скоростей по всем трем координатам.

Совершенно иная ситуация имеет место при рассмотрении звезд в галактике. Во-первых, из наблюдений ближайших звезд нашей Галактики мы знаем, что распределение их по скоростям отличается от максвелловского. В гл. 2 мы уже отмечали, что после вычитания из скоростей звезд скорости вращения Галактики мы получим средние случайные скорости звезд, которые различны для различных направлений, в отличие от того, что следовало бы ожидать, если бы их распределение имело вид, описываемый формулой (4.3). Во-вторых, учитывая теоретические соображения, приведенные ниже, неудивительно, что распределение по скоростям не является максвелловским.

СТОЛКНОВЕНИЯ ЗВЕЗД

Мы уже убедились в том, что звездный газ в Галактике крайне разрежен. Следствием очень большого отношения расстояния между звездами к их размеру является низкая вероятность столкновений между ними. Они происходят настолько редко, что, как мы увидим, типичная звезда нашей Галактики еще ни разу не столкнулась с другой звездой за время существования Галактики. В обычном газе именно столкновения между молекулами преобразуют первоначально произвольное распределение по скоростям в максвелловское. Если частицы звездного газа фактически не сталкиваются, то нет и причин, по которым распределение по скоростям должно стать максвелловским.

Когда мы говорим о столкновениях между звездами или между молекулами газа, то, разумеется, речь идет не о столкновениях, подобных соударению двух бильярдных шаров. Мы будем называть столкновением* близкое прохождение двух звезд, если в результате гравитационного взаимодействия направление их движения изменится на достаточно большой угол, сравнимый по величине с прямым углом. Можно сделать грубую оценку расстояния, на которое должны подойти друг к другу звезды одинаковой массы, чтобы произошло такое изменение скорости. Их гравитационное воздействие друг на друга будет значительным, если на расстоянии наибольшего сближения гравитационная потенциальная энергия взаимодействия окажется больше кинетической энергии их относительного движения. Выберем систему координат,

* Истинные столкновения, которые возможны в звездных скоплениях с очень большой пространственной плотностью звезд, следует называть иначе, например соударениями.

в которой одна из звезд покоится, а другая имеет скорость v . Пусть минимальное расстояние между ними равно d (рис. 4.1). Тогда это условие можно записать в виде

$$Gm^2/d \geq mv^2/2, \quad (4.4)$$

где m — масса каждой из звезд. Неравенство (4.4) перепишем в виде

$$d \leq 2Gm/v^2. \quad (4.5)$$

Рассмотрим теперь звезду, которая движется в Галактике со скоростью v относительно центра масс всех других звезд. Тогда ее эффективный радиус столкновений примерно равен $2Gm/v^2$. Это означает, что звезда сталкивается на своем пути со всеми звездами фона, которые находятся в цилиндре радиусом $2Gm/v^2$ (рис. 4.2). Это выражение можно рассматривать лишь как приближенное, поскольку, во-первых, приближенным является само неравенство (4.4), во-вторых, массы звезд различны, в-третьих, звезды фона обладают случайными скоростями, которыми мы здесь пренебрегли. Однако подобный упрощенный подход вполне приемлем для наших целей. Если число звезд в единице объема равно n , то средняя длина свободного пробега между столкновениями l , играющая ту же роль, что и средняя длина свободного пробега молекул обычного газа, составляет

$$l = 1/\pi (2Gm/v^2)^2 n. \quad (4.6)$$

Среднее время между столкновениями τ_c равно

$$\tau_c = v^3/(4\pi G^2 m^2 n). \quad (4.7)$$

В действительности, как мы уже отмечали, звезды имеют различные массы и нельзя считать, что звезда движется среди неподвижных звезд. Тем не менее, используя средние значения m и v , мы получим довольно правильные оценки.

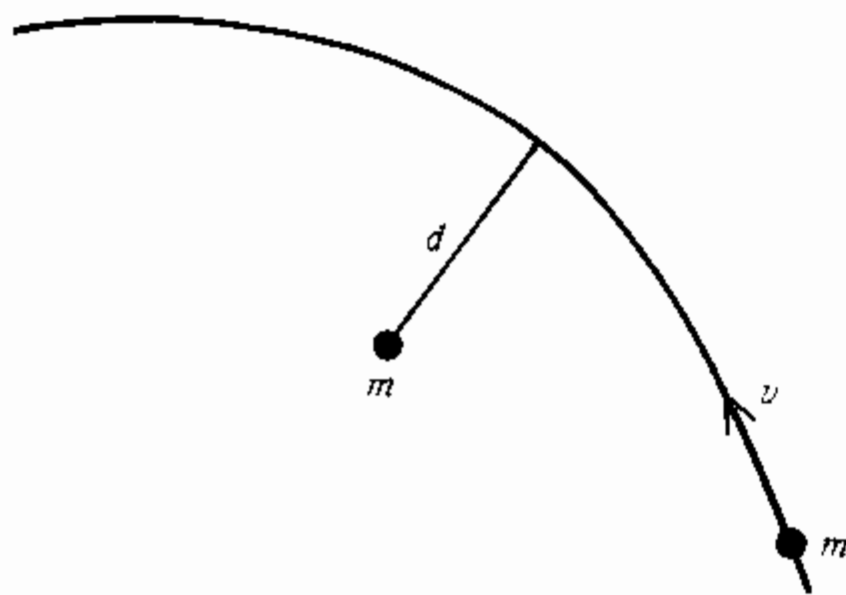


Рис. 4.1.

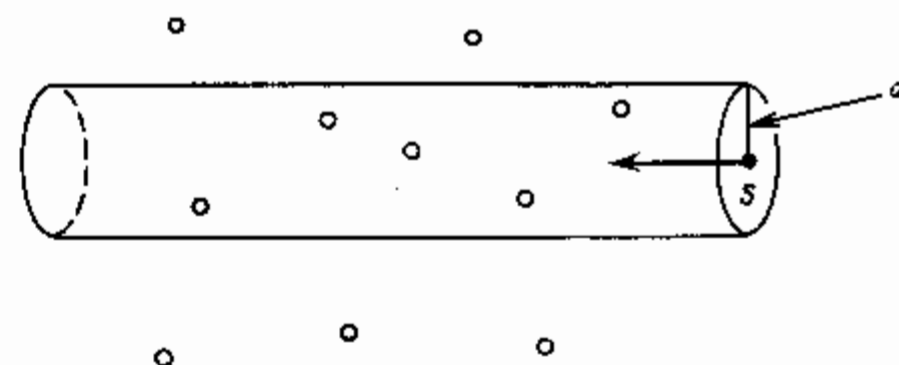


Рис. 4.2. Эффективное сечение столкновений. Звезда ведет себя как тело с площадью поперечного сечения, равной πd^2 (где $d = 2Gm/v^2$), и сталкивается со всеми звездами внутри изображенного здесь цилиндра. Число звезд на рисунке сильно преувеличено.

Исходя из значений v , m и n для Солнца и его окрестностей, можно составить представление о величине τ_c . Скорость Солнца относительно центра масс системы близких звезд составляет около 20 км/с, масса его равна $2 \cdot 10^{30}$ кг, а ближайшая известная звезда находится на расстоянии более 1 пс. Для приведенных «солнечных» значений v и m и пространственной плотности звезд 1 пс^{-3} величина τ_c равна $3 \cdot 10^{13}$ лет, что значительно больше предполагаемого возраста Галактики $1 \cdot 10^{10} - 2 \cdot 10^{10}$ лет. Хотя наши рассуждения очень упрощены и не точны в деталях, мы не могли завысить значение τ_c на три порядка величины. Поэтому сделанных оценок достаточно, чтобы показать, что звездный газ в Галактике — это не обычный газ: он является *бесстолкновительным*. Поскольку максвелловское распределение по скоростям устанавливается благодаря столкновениям, не следует удивляться тому, что к звездному газу оно неприменимо.

Однако, хотя распределение звезд по скоростям не является максвелловским, в большинстве галактик оно, по-видимому, не меняется существенно со временем. Это утверждение нельзя проверить непосредственно — ведь за время, меньшее 10^7 или 10^8 лет, в галактике не может произойти никаких заметных изменений. Мы можем сделать такое заключение, потому что большинство галактик (хотя и не все) имеют довольно правильную форму. Если бы распределение по скоростям зависело от времени, то лишь случайным совпадением можно было бы объяснить, что многие галактики одновременно выглядят симметричными образованиями. Рассуждая более строго, можно выразить эту мысль так: время, которое требуется типичной звезде для того, чтобы пересечь галактику, не превышает обычно нескольких сотен миллионов лет, а вероятный возраст галактики составляет более 10^{10} лет. Это означает, что было достаточно времени для того, чтобы любая нерегулярность в распределении звезд по скоростям проявила себя. Можно, конечно, предположить, что все галактики, которые не обладали достаточно регулярным

распределением звезд по скоростям, давно рассеялись в пространстве или сколлапсировали, так что выжили лишь регулярные галактики. Однако если выживание галактик определяется лишь чистой случайностью, то придется сделать вывод, что выжила слишком малая доля галактик. Но оказалось, что можно предложить иное объяснение: хотя столкновения между звездами и не играют большой роли после того, как звезды образовались, гравитационные взаимодействия между далекими звездами в процессе формирования самих галактик в состоянии объяснить и регулярную форму, и регулярный характер распределения начальных скоростей звезд в большинстве из них. В современную эпоху в нашей Галактике продолжают рождаться звезды из облаков межзвездного газа, и распределение по скоростям этих «новорожденных» звезд должно отражать распределение по скоростям породивших их газовых облаков, а также движение газа внутри этих облаков. Столкновения межзвездных облаков происходят значительно чаще, чем звезд, поскольку их плотности несравненно меньше, а потому размеры облаков сами по себе и по сравнению с расстояниями между ними значительно больше, чем у звезд. Столкновения между облаками газа могут привести к регулярному распределению их по скоростям, что отразится на распределении по скоростям молодых звезд.

КАК ЗАПИСЫВАЕТСЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Исходя из наблюдательного факта, что во многих галактиках функция распределения звезд по скоростям не зависит от времени, попытаемся найти, какой вид может иметь такая функция распределения f . Прежде всего необходимо уравнение для функции f , описывающее изменения произвольно выбранной функции распределения со временем. Из этого уравнения можно узнать, каким должен быть вид функции распределения, чтобы она не изменялась со временем. Поскольку столкновения между отдельными звездами не играют заметной роли (за исключением, быть может, плотных центральных областей галактик и звездных скоплений), примем, что гравитационное поле галактики описывается гладкой медленно меняющейся функцией координат и что звезды движутся в этом «сглаженном» поле без столкновений. Если Φ — сглаженный гравитационный потенциал, то уравнения движения отдельной звезды будут иметь вид

$$\dot{v}_x = \ddot{x} = \partial\Phi/\partial x, \quad \dot{v}_y = \ddot{y} = \partial\Phi/\partial y, \quad \dot{v}_z = \ddot{z} = \partial\Phi/\partial z, \quad (4.8)$$

где точки означают производные по времени, и

$$\dot{x} = v_x, \quad \dot{y} = v_y, \quad \dot{z} = v_z. \quad (4.9)$$

Теперь можно записать выражение для f , используя известное свойство дифференциальных уравнений, заключающееся в том, что шесть

простых дифференциальных уравнений первого порядка эквивалентны одному дифференциальному уравнению первого порядка в частных производных, которое имеет вид

$$\frac{df}{dt} + v_x \frac{\partial f}{\partial x} + v_y \frac{\partial f}{\partial y} + v_z \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial v_x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial v_y} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial v_z} = 0. \quad (4.10)$$

Известно, что это уравнение в точности эквивалентно следующему*:

$$\frac{dt}{1} = \frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z} = \frac{dv_x}{\partial\Phi/\partial x} = \frac{dv_y}{\partial\Phi/\partial y} = \frac{dv_z}{\partial\Phi/\partial z}. \quad (4.11)$$

Они в свою очередь эквивалентны уравнениям (4.8) и (4.9). Эквивалентность этих уравнений надо понимать следующим образом: уравнения (4.11) описывают траекторию звезды в шестимерном фазовом пространстве (x, y, z, v_x, v_y, v_z) , а поверхности $f = \text{const}$ в этом пространстве содержат траектории звезд. Отсюда следует, что постоянные значения f сохраняются вдоль траекторий звезд. Тогда можно использовать частный случай хорошо известной теоремы статистической механики, называемой *теоремой Лиувилля*. Нетрудно доказать эквивалентность этих уравнений. Сопоставим значение f в точке (x, y, z, v_x, v_y, v_z) в момент времени t со значением в ближайшей точке $(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, v_x + \delta v_x, v_y + \delta v_y, v_z + \delta v_z)$, в которой находится та же звезда в момент времени $t + \delta t$. Используя уравнение (4.11), можно записать

$$\begin{aligned} f(x + \delta x, y + \delta y, z + \delta z, v_x + \delta v_x, v_y + \delta v_y, v_z + \delta v_z, t + \delta t) - \\ - f(x, y, z, v_x, v_y, v_z, t) = \\ = \frac{\partial f}{\partial t} \delta t + \frac{\partial f}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \delta y + \frac{\partial f}{\partial z} \delta z + \frac{\partial f}{\partial v_x} \delta v_x + \frac{\partial f}{\partial v_y} \delta v_y + \frac{\partial f}{\partial v_z} \delta v_z = \\ = \delta t \left(\frac{df}{dt} + v_x \frac{\partial f}{\partial x} + v_y \frac{\partial f}{\partial y} + v_z \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial v_x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial v_y} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial v_z} \right). \end{aligned} \quad (4.12)$$

Приравняв нулю правую часть уравнения (4.12), мы получим уравнение, в точности эквивалентное (4.10). Это и доказывает сделанное выше утверждение, что функция f — не зависящая от времени функция, описывающая движение звезды. Если столкновениями звезд нельзя пренебречь, то надо учитывать изменение функции f с изменением скоростей и направлений движения звезд при их столкновениях друг с другом. В учебниках по кинетической теории газов показано, что к правой части уравнения (4.10) следует прибавить член $(\partial f / \partial t)_{\text{coll}}$. Если система, в которой происходят столкновения, находится в стационарном состоянии, то функция f не должна

* См., например, книгу I. N. Sneddon. Elements of Partial Differential Equations, McGraw-Hill.

меняться, поэтому $(\partial f / \partial t)_{\text{coll}} = 0$, так что уравнение (4.10) остается в силе. Это означает, что максвелловское распределение является одним из решений уравнения (4.10).

ИНТЕГРАЛЫ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗДЫ

Пойдем теперь дальше и посмотрим, какие ограничения накладывает это уравнение на вид функции f для галактики. В первую очередь нас интересует, какой вид могут иметь функции f , не зависящие от времени. Если рассмотреть уравнения (4.12) как шесть простых дифференциальных уравнений первого порядка для величин x, y, z, v_x, v_y, v_z , являющихся функциями времени, то можно в принципе найти их решения. Эти решения будут содержать шесть постоянных интегрирования — по одной на каждое уравнение. Их можно определить, если задать положение и скорость звезды в некоторый момент времени t .

Иными словами, существует шесть функций от переменных x, y, z, v_x, v_y, v_z , которые вдоль траектории звезды должны оставаться постоянными. Тогда можно выразить t через x, y, z, v_x, v_y, v_z и одну из постоянных и использовать это выражение, чтобы исключить t из оставшихся пяти уравнений. Прделав это, мы получим пять функций от x, y, z, v_x, v_y, v_z , постоянных вдоль траектории звезды. Эти пять независимых от времени постоянных — интегралов движения — можно записать как $I_1(x, y, z, v_x, v_y, v_z), \dots, I_5(x, y, z, v_x, v_y, v_z)$. В звездной системе, не меняющейся со временем, только эти пять величин (или любая их комбинация) могут оставаться постоянными при движении звезды. Но мы уже показали, что функция f также должна быть постоянной, отсюда

$$f = f(I_1, \dots, I_5). \quad (4.13)$$

Это выражение дает нам представление о возможном виде функции f для звездной системы, если, конечно, мы можем найти интегралы I_1, \dots, I_5 . А можем ли мы это сделать?

ИНТЕГРАЛЫ ДВИЖЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКИХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ГАЛАКТИКАХ

Рассмотрим сначала сферически симметричную звездную систему. Наши рассуждения будут относиться к сферической галактике типа Е0 и некоторым шаровым звездным скоплениям. Если общие свойства такой системы не изменяются со временем, что предполагает независимость от времени потенциала Φ , то четыре интеграла движения довольно легко найти. Первый интеграл не зависит от того, является ли система сферически симметричной, и равен полной энергии звезды (сумме кинетической и потенциальной энергий). Запишем его

в такой форме:

$$I_1 \equiv \frac{1}{2}(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) - \Phi^*. \quad (4.14)$$

Легко убедиться, что величина I_1 постоянна: для ее постоянства требуется не симметрия системы, а лишь равенство нулю $\partial \Phi / \partial t$, т. е.

$$\begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= \frac{\partial I_1}{\partial v_x} \frac{dv_x}{dt} + \frac{\partial I_1}{\partial v_y} \frac{dv_y}{dt} + \frac{\partial I_1}{\partial v_z} \frac{dv_z}{dt} + \\ &\quad + \frac{\partial I_1}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial I_1}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial I_1}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \\ &= v_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + v_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + v_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Phi}{\partial x} v_x - \frac{\partial \Phi}{\partial y} v_y - \frac{\partial \Phi}{\partial z} v_z = 0. \end{aligned}$$

Три других тривиальных интеграла находятся из условия, что в сферически симметричной звездной системе суммарная сила гравитации, действующая на любую звезду, должна быть направлена к центру системы, не создавая никакого вращающего момента. Это означает, что три компонента момента количества движения звезды относительно центра должны быть постоянными. В декартовой системе координат данное условие можно записать следующим образом:

$$I_2 \equiv xv_y - yv_x, \quad I_3 \equiv yv_z - zv_y, \quad I_4 \equiv zv_x - xv_z. \quad (4.15)$$

Большинство галактик не являются сферически симметричными, но по крайней мере в первом приближении они обладают осевой симметрией. Это справедливо для эллиптических** и линзовидных (S0) галактик. Поскольку нас интересует распределение массы, мы можем считать, что в спиральных галактиках оно лишь незначительно отличается от осесимметричного. Для осесимметричной галактики энергия звезды продолжает оставаться одним из интегралов движения, но что касается момента количества движения, то постоянен лишь один из его компонентов. Сила, действующая на звезду, в общем случае уже не направлена к центру галактики, хотя обязательно пересекает ось симметрии, т. е. момент количества движения сохраняется относительно этой оси (оси вращения галактики). Поэтому мы имеем интеграл, который следующим образом записывается в цилиндрической системе координат $(\tilde{\omega}, \phi, z)$:

$$I_2 \equiv \tilde{\omega} v_\phi. \quad (4.16)$$

* Заметим, что некоторые авторы, например Михалас и Рутли, принимают для Φ противоположный знак. Мы выбрали знак таким же, как в книге «Звезды» и других книгах по внутреннему строению звезд.

** См. примечание на стр. 68.

Здесь, как и в уравнении (4.15), I_2 — момент количества движения относительно оси z , рассчитанный на единицу массы.

Доказав существование этих интегралов, мы теперь можем утверждать, что в случае сферической галактики возможной формой записи функции f является следующая:

$$f = f(I_1, I_2, I_3, I_4). \quad (4.17)$$

Однако следует сделать два замечания. Первое, связанное с возможностью существования пятого интеграла, мы пока не будем обсуждать. Второе замечание заключается в том, что функция распределения должна быть достаточно симметричной, чтобы галактика, содержащая звезды, подчиняющиеся этой функции распределения, была бы сферически симметричной. Так, необходимо потребовать, чтобы для звезд, создающих гравитационное поле, в котором они сами движутся, выполнялось уравнение Пуассона. В сферических координатах оно запишется следующим образом:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi}{dr} \right) = -4\pi G \rho = -4\pi G \int f dv_x dv_y dv_z. \quad (4.18)$$

Уравнение (4.17) имеет смысл лишь в том случае, если ему соответствует сферически симметричное распределение плотности. Можно показать, что одним из представлений f , явно согласующимся с требованием сферической симметрии, является следующее:

$$f = f(I_1, I_2^2 + I_3^2 + I_4^2). \quad (4.19)$$

Примером функции f , которая удовлетворяет этому представлению, является функция распределения Максвелла, зависящая только от I_1 . Однако могут быть справедливы и другие представления f .

ИЗОЛИРУЮЩИЕ И НЕИЗОЛИРУЮЩИЕ ИНТЕГРАЛЫ

Обратимся теперь к последнему интегралу движения для сферической системы и к трем оставшимся интегралам для системы с осевой симметрией. Можно ли их найти, и если можно, то какой вид они имеют? Ограничимся случаем осевой симметрии как более общим. Прежде всего отметим, что не удалось найти ни одного интеграла, кроме рассмотренных выше, который имел бы простое аналитическое представление. Разумеется, интегралы должны существовать. Здесь мы разделим их на изолирующие и неизолирующие. В случае осевой симметрии условие $I_1 = \text{const}$ определяет поверхность (пятимерную) в шестимерном пространстве x, y, z, v_x, v_y, v_z . Условию $I_2 = \text{const}$ соответствует аналогичная поверхность. Они пересекаются, и линией их пересечения служит четырехмерная поверхность; обозначим ее S_4 . Пусть I_3 — третий интеграл движения. Тогда возможны два случая: либо пересечение поверхности $I_3 = \text{const}$ с поверхностью S_4 дает нам трехмерную поверхность S_3 , либо же поверхность $I_3 = \text{const}$ проходит

на сколь угодно малом расстоянии от любой точки на S_4 . В первом случае I_3 (так же как I_1 или I_2) называется *изолирующим интегралом*, а во втором — *неизолирующим интегралом*. Если выполняется второе условие, то бессмысленно искать зависимость функции распределения от I_3 : при известных I_1 и I_2 функция f одинакова для всех значений I_3 . Это приводит нас к теореме звездной динамики, называемой *теоремой Джинса*: функция f должна зависеть только от изолирующих интегралов.

Сказанное выше можно проиллюстрировать на примере пространства с меньшим числом измерений. Предположим, что в процессе нахождения интегралов мы получили поверхность, являющуюся в трехмерном пространстве тором (рис. 4.3). Как показано на рис. 4.3, положение точки на поверхности тора определяется значениями двух углов — θ и ϕ . Предположим теперь, что следующий интеграл имеет вид

$$I = l\theta + m\phi = \text{const}, \quad (4.20)$$

где l и m — известные постоянные величины. Если отношение l/m является рациональным числом, то винтовая линия (4.20) после совершения целого числа витков замыкается вокруг тора, и интеграл I можно считать изолирующим. Если же l/m — иррациональное число, то винтовая линия (4.20) в конечном счете пройдет на сколь угодно малом расстоянии от любой точки тора, и интеграл будет неизолирующим.

Вернемся теперь к проблеме осесимметричных галактик. Вопрос, который мы задавали выше относительно существования интегралов для осесимметричных систем, можно теперь сформулировать по-другому: существуют ли в произвольно взятой осесимметричной системе какие-либо другие изолирующие интегралы (помимо тривиальных)? Как мы уже отмечали, не было найдено никаких интегралов, имеющих простое аналитическое представление. Это означает, что мы должны искать их путем непосредственного интегрирования уравнений движения звезды с заданными значениями энергии и момента количества движения относительно оси симметрии и путем нахождения интегральных поверхностей. Это требует длительных расчетов

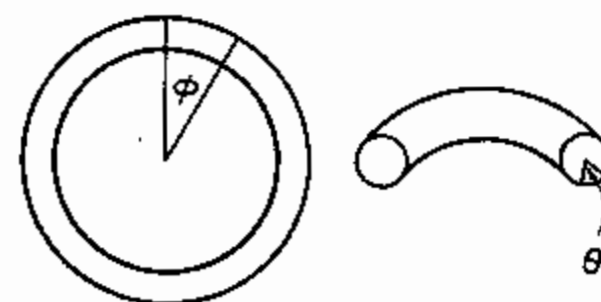


Рис. 4.3.

с использованием мощных электронных вычислительных машин, причем никакие расчеты не могут быть свободны от неточностей. Вычисления показали, что осесимметричная галактика, по распределению массы подобная нашей Галактике, по-видимому, обладает третьим изолирующим интегралом. Объясним теперь, почему это представляет такой интерес.

ТРЕТИЙ ИНТЕГРАЛ И ГАЛАКТИКА

Каковы бы ни были теоретические аргументы в пользу существования третьего изолирующего интеграла движения у сплюснутых галактик, наблюдения дают надежное свидетельство того, что либо такой интеграл действительно существует для нашей Галактики, либо не верно одно из исходных предположений, которые были сделаны нами выше. Какие основания имеются для такого вывода? Выше мы уже приводили характеристики случайных скоростей звезд в окрестностях Солнца [формула (2.8)]. Для них справедливо следующее выражение:

$$\langle (v_\phi - v_{\phi 0})^2 \rangle \approx \langle v_z^2 \rangle \approx 0,4 \langle v_\phi^2 \rangle. \quad (4.21)$$

Предположим теперь, что функция f для нашей Галактики зависит только от I_1 и I_2 , т. е.

$$f = f(v_\phi^2 + v_z^2 + v_\phi^2 - 2\Phi, \bar{\omega}v_\phi). \quad (4.22)$$

Выражение (4.22) симметрично относительно v_ϕ и v_z , что никак не согласуется с (4.21). Если бы функция f имела вид (4.22), то следовало бы ожидать, что

$$\langle v_\phi^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle. \quad (4.23)$$

Если же существует третий изолирующий интеграл, несимметричный относительно v_ϕ и v_z , то выражение (4.22) не верно. При подходящем выборе третьего интеграла из него можно получить соотношение (4.21). Нам приходится сделать вывод, что либо третий интеграл существует, либо необходимо учитывать отклонение от стационарного состояния или осесимметричности Галактики.

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЗВЕЗД

Подчеркнув, что нам не следует ожидать максвелловской функции распределения по скоростям для звезд в Галактике, и указав вкратце другие возможности, мы не будем более углубляться в общую проблему равновесия Галактики как звездной системы. В заключение сделаем лишь несколько замечаний относительно эволюции распределения по скоростям в плотных центральных областях галактики или звездных скоплениях. Здесь уже нельзя пренебрегать столкновениями между звездами, и поэтому распределение по скоростям в них стремится

стать максвелловским. Ситуация все же сильно отличается от той, которая имеет место в недрах звезд, где средняя длина свободного пробега частиц между столкновениями составляет пренебрежимо малую долю радиуса звезды. В звездных же скоплениях средняя длина свободного пробега значительно превосходит радиус скопления, так что между столкновениями звезда успевает совершить много колебаний. В недрах звезды температура, или средняя энергия движения частиц, значительно выше, чем вблизи поверхности. В звездном же скоплении большая средняя длина свободного пробега препятствует концентрации энергии вблизи центра, так что оно будет стремиться к состоянию, фактически являющемуся изотермическим.

Изотермичная гравитационно связанная газовая сфера не может находиться в состоянии равновесия. Это нетрудно показать. В любой самогравитирующей системе, находящейся в равновесии, полные кинетическая и потенциальная энергии равны по порядку величины:

$$GM^2/R \approx M \langle v^2 \rangle / 2, \quad (4.24)$$

где M и R — полная масса и радиус системы, а $\langle v^2 \rangle$ — среднее значение величин v^2 отдельных молекул (см. приложение 2). Из уравнения (4.24) следует, что типичная скорость молекул близка к скорости убегания. Температура в центре звезды значительно выше, и частицы там движутся значительно быстрее, чем у поверхности. Поэтому выполнение условия (4.24) не приводит к распаду системы. Иное дело в изотермической системе, в которой средняя скорость частиц повсюду одинакова, и многие частицы, находящиеся вблизи поверхности, могут покинуть ее. В результате, по мере того как звездное скопление будет приближаться к равновесному состоянию, звезды будут покидать его. При этом оставшиеся звезды образуют все более компактную систему, вследствие чего ее эволюция ускоряется. Приняв во внимание, что существуют звезды самых различных масс и что столкновения между ними стремятся уравнивать их кинетические энергии, легко прийти к выводу, что звезды малых масс приобретут наибольшие скорости и им легче всего будет покинуть скопление. По-видимому, эти процессы уже происходили в шаровых скоплениях, в которых имеет место дефицит звезд небольшой массы. Раньше эти звезды наверняка присутствовали в скоплениях, но со временем покинули их и превратились в одиночные быстрые звезды, которые, как показывают наши наблюдения, принадлежат к гало Галактики. Ниже в гл. 8 мы рассмотрим процесс динамической эволюции звездных систем и увидим, что аналогичные процессы могут играть важную роль в эволюции скоплений галактик.

ДВИЖЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ

В заключение мы остановимся на упомянутом в начале гл. 4 методе пробной частицы. В гл. 2 речь шла о том, что основным движением звезд в Галактике является обращение вокруг ее центра.

Помимо скорости обращения, отдельные звезды имеют небольшие случайные скорости. Интересно узнать, на какое расстояние могут разойтись две звезды, находящиеся в настоящее время рядом друг с другом, или, иными словами, какую долю от полного объема Галактики составляет объем, в котором может находиться данная звезда. Рассмотрим сначала движение в плоскости Галактики, а затем в перпендикулярном направлении.

Пусть имеются две звезды, положение которых первоначально совпадает с положением локальной системы отсчета. Предположим далее, что одна из звезд обладает чисто круговым движением, причем ее скорость совпадает со скоростью локальной системы отсчета, а другая, помимо скорости кругового движения, имеет небольшую составляющую скорости в направлении $\tilde{\omega}$ (рис. 4.4). Будем считать, что эта составляющая достаточно мала и можно принять, что в области движения звезды кривая вращения описывается линейной функцией, зависящей от постоянных Оорта A и B .

Чтобы рассчитать движение звезды, можно записать уравнение движения в направлении $\tilde{\omega}$ и закон сохранения момента количества движения относительно оси вращения Галактики. Если звезда первоначально находилась на расстоянии R_0 от центра Галактики, а затем ее расстояние от центра стало равным

$$\tilde{\omega} = R_0 + \xi, \quad (4.25)$$

то уравнение движения вдоль радиуса имеет следующий вид:

$$\ddot{\xi} - (R_0 + \xi)\dot{\phi}^2 = \partial\Phi/\partial\tilde{\omega}. \quad (4.26)$$

Здесь учтено, что радиальная составляющая ускорения в цилиндрической системе координат равна

$$a_{\tilde{\omega}} = \ddot{\tilde{\omega}} - \tilde{\omega}\dot{\phi}^2. \quad (4.27)$$

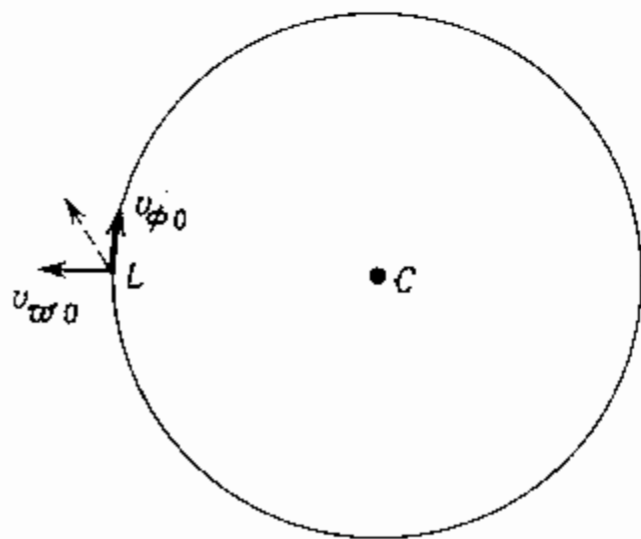


Рис. 4.4.

Запишем теперь условие сохранения момента количества движения относительно оси вращения:

$$(R_0 + \xi)^2 \dot{\phi} = R_0^2 \omega_0 = R_0 v_{\phi 0}, \quad (4.28)$$

где ω_0 и $v_{\phi 0}$ — угловая и линейная скорости вращения локальной системы отсчета соответственно. Подставив $\dot{\phi}$ из уравнения (4.28) в (4.26), получим

$$\ddot{\xi} - [R_0^2 v_{\phi 0}^2 / (R_0 + \xi)^3] = \partial\Phi/\partial\tilde{\omega}. \quad (4.29)$$

Заметим, что величина $\partial\Phi/\partial\tilde{\omega}$ на расстоянии $R_0 + \xi$ от центра связана со скоростью вращения Галактики на этом расстоянии, а последняя в свою очередь связана с $v_{\phi 0}$ и постоянными Оорта A и B . Итак,

$$v_{\text{circ}}^2(R_0 + \xi)/(R_0 + \xi) = -\partial\Phi/\partial\tilde{\omega}, \quad (4.30)$$

$$v_{\text{circ}}(R_0 + \xi) = v_{\phi 0} - (A + B)\xi. \quad (4.31)$$

Последнее выражение следует из формул (2.24) и (2.25), определяющих постоянные Оорта, и формулы (4.25). Подставляя формулы (4.30) и (4.31) в (4.29), получим

$$\ddot{\xi} - [R_0^2 v_{\phi 0}^2 / (R_0 + \xi)^3] = -[v_{\phi 0} - (A + B)\xi]^2 / (R_0 + \xi). \quad (4.32)$$

Разложив члены уравнения (4.32) в ряд по ξ и ограничившись членами ряда, линейно зависящими от ξ , мы получим уравнение, описывающее небольшие отклонения частицы от окружности радиуса R_0 . Выразив $v_{\phi 0}$ через постоянные Оорта с помощью формул (2.24) и (2.25), в результате будем иметь

$$\ddot{\xi} + [-4B(A - B)]\xi = 0, \quad (4.33)$$

или

$$\ddot{\xi} + \kappa^2 \xi = 0. \quad (4.34)$$

Здесь $\kappa^2 > 0$, поскольку величина B отрицательна, а $(A - B)$ положительна. Выражение (4.34) представляет собой уравнение простого гармонического колебания. Из него следует, что звезда осциллирует вдоль радиуса относительно положения локальной системы отсчета с периодом

$$P_{\tilde{\omega}} = 2\pi/\kappa = \pi/[-B(A - B)]^{1/2}. \quad (4.35)$$

Если считать, что при $t = 0$ $v_{\tilde{\omega}} = v_{\phi 0}$, то можно записать решение (4.34) в виде

$$\xi = (v_{\phi 0}/\kappa) \sin \kappa t \equiv \xi_0 \sin \kappa t. \quad (4.36)$$

ЭПИЦИКЛИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Теперь, используя закон сохранения момента количества движения, можно определить, на какое расстояние разойдутся звезды в направлении ϕ . Из уравнений (4.28) и (4.36) следует, что в любой момент времени

угловая скорость звезды примерно равна

$$\dot{\phi} = R_0 v_{\phi 0} / (R_0 + \xi)^2 \approx \omega_0 - (2v_{\phi 0} v_{\omega 0} / \kappa R_0^2) \sin \kappa t, \quad (4.37)$$

т. е. звезда в своем движении то отстает от локальной системы отсчета, то обгоняет ее, причем отстает она тогда, когда находится дальше от центра Галактики. Разность угловых скоростей звезды и локальной системы отсчета составляет

$$\Delta \dot{\phi} = - (2v_{\phi 0} v_{\omega 0} / \kappa R_0^2) \sin \kappa t. \quad (4.38)$$

Соответствующая разность компонентов скоростей, перпендикулярных радиусу, равна $R_0 \Delta \dot{\phi}$, и, чтобы узнать, на какое расстояние звезда может удалиться от локальной системы отсчета, следует проинтегрировать это выражение. В результате получим

$$\eta = [2v_{\phi 0} v_{\omega 0} / (\kappa^2 R_0)] [\cos \kappa t - 1] \equiv \eta_0 (\cos \kappa t - 1). \quad (4.39)$$

Объединяя формулы (4.36) и (4.39), приходим к уравнению

$$(\xi^2 / \xi_0^2) + [(\eta + \eta_0)^2 / \eta_0^2] = 1, \quad (4.40)$$

являющемуся уравнением эллипса. Следовательно, звезда движется по эллиптической орбите относительно локальной системы отсчета или по эпициклической орбите в невращающейся системе координат. Иллюстрация таких движений приведена на рис. 4.5 и 4.6.

Хотя выражения, выведенные здесь через постоянные Оорта, являются точными лишь для небольших отклонений движения от кругового, они в первом приближении хорошо описывают движение звезд в

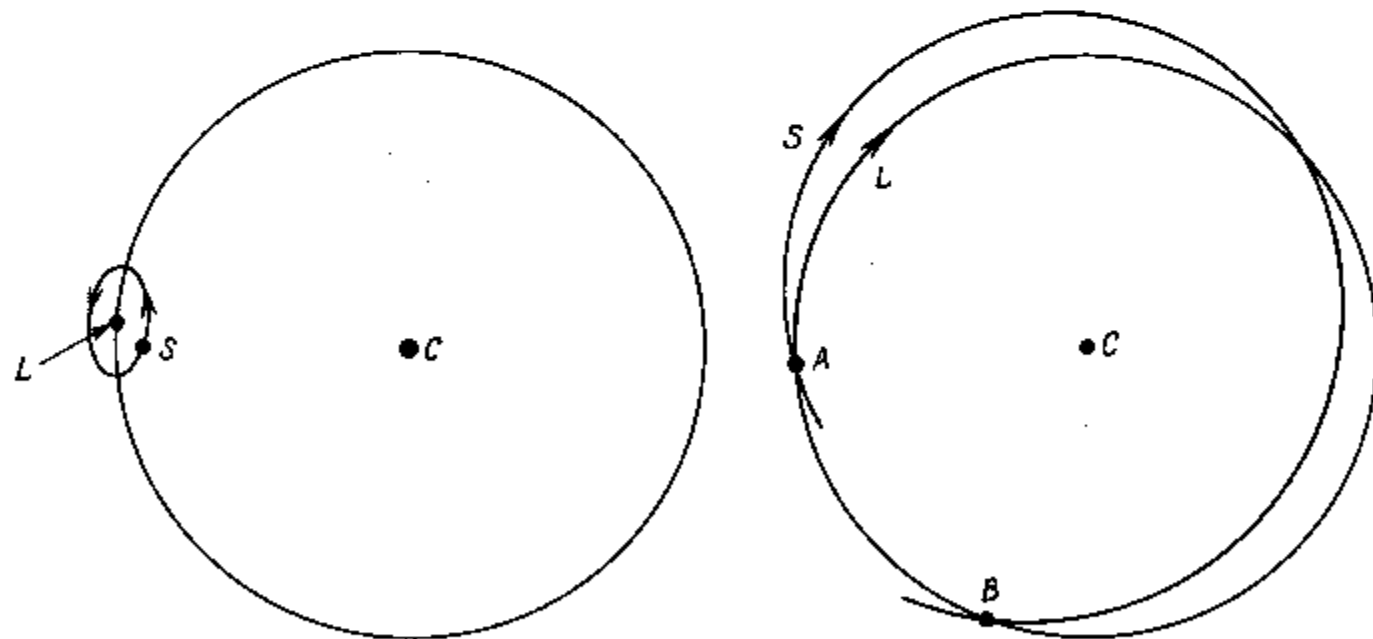


Рис. 4.5. Движение звезды S по эллипсу относительно локальной системы отсчета L .

Рис. 4.6. Эпициклическое движение звезды S . Если S и L совпадают в точке A , то в следующий раз они будут совпадать в точке B .

более общем случае. Таким образом, мы можем узнать, в каких пределах расстояний от галактического центра двигалось в прошлом и будет двигаться в будущем Солнце и другие звезды в его окрестностях. Однако мы приведем численные значения после того, как обсудим вопрос о движении звезд в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики.

ДВИЖЕНИЕ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ПЛОСКОСТИ ГАЛАКТИКИ

Скорость звезды в общем случае имеет составляющую, направленную перпендикулярно плоскости Галактики. При больших отклонениях от круговых орбит движение параллельно плоскости Галактики и перпендикулярно ей нельзя рассматривать по отдельности. Однако при сделанных упрощениях, когда мы ограничиваемся лишь линейными членами в разложении функций, описывающих отклонение движения звезды от кругового, мы можем рассматривать обе составляющие скорости независимо. Изучая движение звезд в окрестностях Солнца в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики, мы должны учесть, что вследствие небольшой толщины диска по сравнению с его радиусом все свойства диска меняются вдоль оси z намного быстрее, чем вдоль радиуса. Подробнее об этом речь пойдет в гл. 6. Следовательно, в первом приближении можно считать диск в окрестностях Солнца бесконечным и плоскопараллельным, а его характеристики — меняющимися только в направлении z (рис. 4.7). Рассмотрим вертикальное движение звезд в системе координат, вращающейся вместе с локальной системой отсчета. Иными словами, будем считать, что звезды движутся «вверх» и «вниз» через диск под действием составляющей g_z гравитационного ускорения. Чтобы найти амплитуду и период этих колебаний, мы должны знать величину g_z . Как ее оценить? В принципе это можно было бы сделать, наблюдая колебания звезд относительно плоскости Галактики. Однако подобные наблюдения потребовали бы значительно больше 10^7 лет, поэтому такой путь непригоден. Воспользуемся оценками пространственной плотности и скорости звезд на различных расстояниях по обе стороны от галактической плоскости и найдем g_z , считая, что Галактика находится в стационарном состоянии.

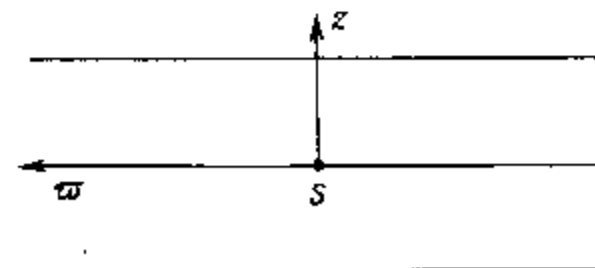


Рис. 4.7.

ПОЛЕ ГРАВИТАЦИИ В НАПРАВЛЕНИИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ ПЛОСКОСТИ ГАЛАКТИКИ

Сначала рассмотрим сущность этого метода. Мы находимся почти точно в плоскости, в которой вертикальная составляющая гравитационного поля g_z равна нулю. Мы можем наблюдать соседние звезды и, в частности, найти распределение числа звезд по составляющим их скоростей, перпендикулярным галактической плоскости (далее мы будем называть их вертикальными скоростями). Любая звезда, которая движется вертикально «вверх», попадает под влияние гравитационного поля, действующего на нее «вниз», так что рано или поздно направление движения изменится на обратное и звезда возвратится к плоскости симметрии Галактики. Чем больше ее вертикальная скорость в окрестностях Солнца, тем дальше она сможет отойти от плоскости симметрии. Если бы мы знали распределение g_z перпендикулярно плоскости симметрии, то могли бы вычислить, на какое расстояние уйдет та или иная звезда. Однако мы можем найти из наблюдений лишь пространственную плотность звезд как функцию z -координаты. Если считать распределение звезд стационарным, то можно вычислить изменение гравитационного поля с «высотой», основываясь на известном распределении пространственной плотности звезд.

Примем, что «вертикальное» движение звезд происходит независимо от «горизонтального». Тогда интеграл энергии, записанный для «вертикальных» движений, будет иметь вид

$$v_z^2/2 - \Phi(z) = v_{z0}^2/2 - \Phi(0), \quad (4.41)$$

где v_z — вертикальная скорость звезды, v_{z0} — ее скорость при $z = 0$, а $\Phi(z)$ — гравитационный потенциал, связанный с g_z выражением

$$g_z = d\Phi/dz. \quad (4.42)$$

Из наблюдений можно найти распределение по скоростям звезд в окрестностях Солнца. Предположим сначала, что это распределение имеет очень простой вид:

$$f(v_{z0}) \propto \exp(-l^2 v_{z0}^2), \quad (4.43)$$

где l — постоянная величина. Из общих свойств функций распределения для равновесного состояния, о которых шла речь в начале этой главы, мы знаем, что f должно быть функцией интеграла энергии (4.41), поэтому для любой координаты z мы можем записать

$$f(v_z) \propto \exp\{-l^2 v_z^2 + 2l^2 \Phi(z) - 2l^2 \Phi(0)\}. \quad (4.44)$$

Коэффициенты пропорциональности в уравнениях (4.43) и (4.44) должны быть равны. Здесь мы используем условие, согласно которому в состоянии равновесия функция f должна быть постоянной во времени (стр. 108). Теперь можно проинтегрировать уравнения (4.43) и (4.44) по скоростям v_z в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ и найти простран-

ственные плотности звезд в плоскости симметрии Галактики ($z = 0$) и на расстоянии z от нее. В результате будем иметь

$$n(z)/n(0) = \exp\{2l^2 [\Phi(z) - \Phi(0)]\}. \quad (4.45)$$

Здесь $n(z)$ — число звезд в единице объема (пространственная плотность) на расстоянии z от плоскости симметрии. Если $n(z)$, $n(0)$ и l известны из наблюдений, то можно найти величину $\Phi(z) - \Phi(0)$ (здесь, как обычно, играет роль лишь разность гравитационных потенциалов). Повторяя эту процедуру для различных значений z , мы с помощью (4.42) можем определить g_z .

Наблюдаемое распределение по скоростям звезд в окрестностях Солнца в действительности имеет более сложный вид, чем выражение (4.43), тем не менее оно в общих чертах сходно с ним, иначе мы не взяли бы его в качестве примера. Очевидно, что описанная выше процедура применима и к другим функциональным зависимостям $f(v_{z0})$, хотя соотношение между $n(z)$ и Φ уже не будет таким простым, как (4.45), и оценка g_z станет более сложной. Наилучшей формой представления наблюдаемой функции распределения является не простая экспоненциальная зависимость, а сумма нескольких экспонент с различными значениями l . Оценки g_z , полученные при таком представлении функции распределения, приводят к зависимости, показанной на рис. 4.8. Вблизи плоскости симметрии галактики ($z = 0$) величина g_z меняется почти линейно с z , однако на больших расстояниях ее рост замедляется.

В гл. 6 мы установим связь между гравитационным потенциалом и плотностью гравитирующего вещества. Она описывается уравнением

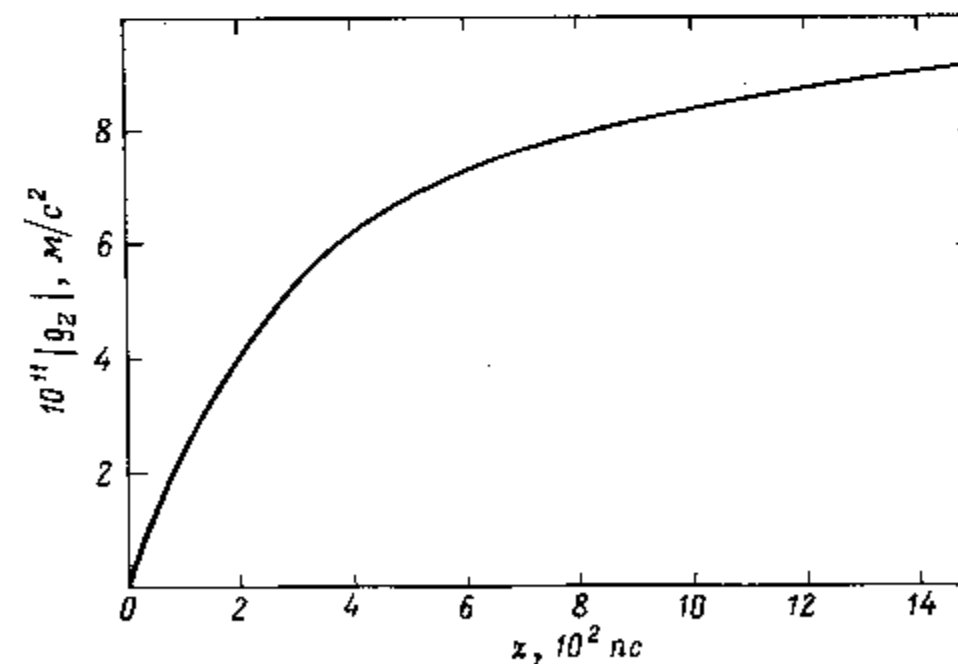


Рис. 4.8. Зависимость z -компонента гравитационного поля от расстояния до плоскости симметрии Галактики.

Пуассона в следующей упрощенной форме:

$$d^2\Phi/dz^2 = -4\pi G\rho, \quad (4.46)$$

где ρ — полная плотность вещества. Но в настоящей главе мы будем использовать наблюдаемые значения g_z , чтобы определить характер движения звезд в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики. Если расстояния от плоскости составляют менее 100 пс, то можно записать

$$g_z = -\lambda z, \quad (4.47)$$

где $\lambda \approx 10^{-29} \text{ с}^{-2}$. Отсюда следует, что движение звезд, не уходящих далеко от плоскости симметрии галактики, описывается уравнением

$$\ddot{z} + \lambda z = 0, \quad (4.48)$$

т. е. они совершают простые гармонические колебания. Для приведенного значения λ период колебаний составляет около $6 \cdot 10^7$ лет, а расстояние, на которое удаляется звезда, имеющая начальную скорость 10 км/с, от плоскости симметрии Галактики, примерно равно 100 пс. Это расстояние пропорционально начальной скорости (по крайней мере для меньших значений скоростей).

Если скорость звезды в плоскости симметрии Галактики достаточно велика, чтобы она могла вылететь за пределы тонкого диска, то она попадает в область, где гравитационное поле изменяется медленнее, чем по линейному закону, поэтому и период, и амплитуда колебаний звезды будут больше, чем это следует из приведенных выше простых формул. Разумеется, колебания звезды в этом случае уже не будут гармоническими, и в конечном счете предположение о независимости движений по координате z и параллельно плоскости симметрии Галактики окажется совершенно неверным. Это прежде всего относится к объектам гало, таким, как шаровые скопления и быстрые звезды, находящиеся в настоящее время в окрестностях Солнца. Период орбитального движения для них составляет несколько сотен миллионов лет.

АМПЛИТУДА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ СОЛНЦА

Вернемся теперь к вопросу о движении Солнца в плоскости симметрии Галактики и используем общепринятые значения постоянных Оорта для вычисления периода и амплитуды радиального движения. Для значений, приведенных в гл. 2 [$A = 15 \text{ км/(с·кпс)}$ и $B = -10 \text{ км/(с·кпс)}$], период, определяемый из уравнения (4.35), составит

$$P_{\odot} = 2 \cdot 10^8 \text{ лет}. \quad (4.49)$$

Период вращения Галактики для окрестностей Солнца при тех же значениях A и B равен $2,5 \cdot 10^8$ лет, так что период эпитического движения немного меньше периода вращения. Период «вертикальных»

колебаний вблизи Солнца составляет приблизительно одну треть от периода эпитического колебаний. Для звезды, случайная скорость которой в радиальном направлении равна 10 км/с, амплитуда колебаний приблизительно равна 300 пс. Эти данные нетрудно объединить с данными о движении перпендикулярно диску, чтобы узнать, какую форму имеет орбита звезды и в каком объеме Галактики она заключена. Используя наилучшие оценки скорости движения Солнца относительно локальной системы отсчета [формула (2.9)], найдем, что при движении Солнца по орбите его расстояние от центра Галактики меняется примерно на 800 пс, а в перпендикулярном направлении оно проходит расстояние 160 пс (т. е. его расстояние от центра меняется на ± 400 пс от среднего значения, которое превышает R_0 , и оно удаляется на ± 80 пс от плоскости Галактики).

РЕЗОНАНСНЫЕ ОРБИТЫ

Рассматривая вопрос о движении Солнца, мы считали Галактику строго осесимметричной. В действительности в нашей Галактике, как и в других спиральных галактиках, имеются небольшие отклонения от осевой симметрии, обусловленные спиральной структурой (стр. 79). Всякий раз, когда звезда проходит через спиральную волну плотности, ее движение испытывает небольшое возмущение. Если периоды обращения звезды, эпитического колебаний и обращения спирального узора вокруг центра галактики не связаны друг с другом простыми соотношениями, то возмущения соседних орбит происходят не в фазе, и влияние волны плотности на движение звезды не ощутимо. Если же спиральная волна на данном расстоянии от центра меняется в зависимости от угловой координаты ϕ и времени t как $\sin(m\phi + \omega_s t)$, а ее частота ω_s , частота обращения звезды вокруг центра ω и эпитическая частота κ связаны соотношениями

$$\omega_s + m\omega = 0 \text{ или } \pm \kappa, \quad (4.50)$$

то возмущающая сила каждый раз действует в одной фазе, и поэтому амплитуда колебаний звезды возрастает. Такой случай называется резонансом. Резонансы возникают на определенных расстояниях \bar{r} от центра. Обсуждение этих случаев выходит за рамки настоящей книги. Упомянем только, что резонансы, по-видимому, играют первостепенную роль в поддержании долгоживущей спиральной структуры.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 4

В этой главе мы рассматривали галактику как систему, состоящую из одних только звезд. Каждая звезда движется под действием сил гравитации со стороны всех других звезд. Поскольку размеры звезд много меньше расстояний между ними, звезды можно рассматривать

как точечные массы, а их совокупность можно считать звездным газом и применять к нему методы, используемые в кинетической теории газа. За исключением центральных областей галактик и плотных звездных скоплений, средний промежуток времени между столкновениями отдельной звезды с другими звездами значительно превышает современный возраст галактик. Это означает, что звездный газ можно считать бесстолкновительным. При отсутствии столкновений нет оснований ожидать, что распределение звезд по скоростям будет описываться функцией Максвелла, подобно газу в лабораторных условиях, где весьма часты столкновения между частицами. Показано, что функция распределения звезд по скоростям в галактике должна зависеть от величин, которые остаются постоянными при движении звезды. Для галактики, находящейся в стационарном состоянии, этими постоянными (интегралами) движения являются энергия звезды и три компонента ее момента количества движения в сферически симметричной системе или энергия и момент количества движения относительно оси симметрии (если система осесимметрична).

Если в звездной системе пространственная плотность достаточно высока, то важную роль могут играть столкновения между звездами. Столкновения стремятся «выравнять» распределение кинетической энергии как между звездами различных масс, так и между элементами объема в различных точках системы. В результате звезды (прежде всего маломассивные) покидают систему, а система в целом сжимается, что приводит к возрастанию роли столкновений.

Хотя движение совокупности звезд галактики можно исследовать только статистическими методами, мы можем изучать и движение отдельной звезды на фоне других звезд. В конце главы рассматривается движение звезды в окрестностях Солнца, скорость которой немного отличается от скорости вращения Галактики. Показано, что такая звезда совершает простые гармонические колебания как относительно своего среднего расстояния от центра Галактики, так и относительно галактической плоскости. Сделана оценка расстояний от центра и от плоскости симметрии Галактики, в пределах которых происходит движение Солнца в Галактике.

Глава 5

Массы галактик

ВВЕДЕНИЕ

Оценки масс галактик очень важны по целому ряду причин. Прежде всего необходимо знать, вносит ли видимое вещество в галактиках основной вклад в их полную массу (здесь мы под видимым веществом подразумеваем вещество, доступное наблюдениям каким-либо методом) или же значительное количество вещества находится в такой форме, что его пока не удалось обнаружить. Следующая очень важная причина связана с оценкой средней плотности материи во Вселенной. От этой величины, к примеру, зависит, сменится ли современное расширение Вселенной ее сжатием. Мы остановимся на этом вопросе в гл. 8.

МАССЫ ДВОЙНЫХ ГАЛАКТИК

Массу любого астрономического объекта можно оценить по наблюдениям движения либо этого объекта как единого целого, либо вещества внутри его. При этом предполагается, что движение определяется силой гравитации. В самом простом случае массу Солнца, планет или двойных звезд можно «измерить» с помощью законов Кеплера. Пусть две звезды с массами M_1 и M_2 движутся по эллиптическим орбитам, большие полуоси которых равны a_1 и a_2 , вокруг общего центра масс (рис. 5.1). Тогда справедливы соотношения

$$M_1 a_1 = M_2 a_2, \quad (5.1)$$

$$P^2 = 4\pi^2 (a_1 + a_2)^3 / G(M_1 + M_2), \quad (5.2)$$

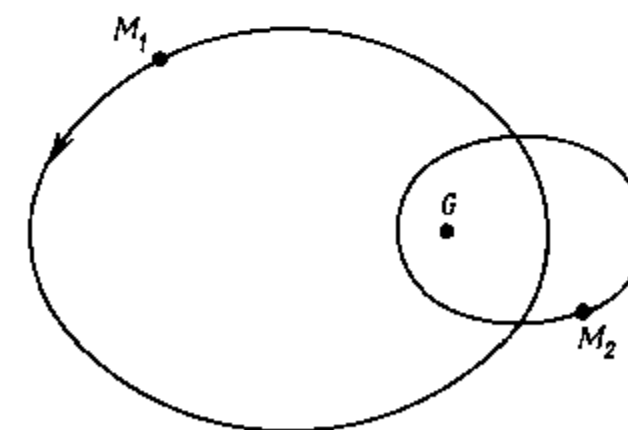


Рис. 5.1. Эллиптические орбиты двух звезд с массами M_1 и M_2 относительно их центра масс G .

где P — их период обращения. Очевидно, что если a_1 , a_2 и P известны из наблюдений, то из уравнений (5.1) и (5.2) можно найти массы обеих звезд. Однако на практике даже в случае двойной звездной системы измеряются не a_1 и a_2 , а лишь их проекции в картинной плоскости. Это приводит к ошибкам в оценках масс. Аналогичный метод определения масс применим и к физическим парам галактик, но в этом случае возникают дополнительные сложности. Первая из них связана с тем, что галактики не являются такими компактными объектами, как звезды, и поэтому расстояние между галактиками, образующими двойную систему, не обязательно будет во много раз превышать размеры каждой из галактик. Это ставит под сомнение возможность рассматривать галактики как точечные объекты — приближение, необходимое для применения законов Кеплера. Но эта проблема далеко не так серьезна, как следующая: мы не можем точно определить полную орбиту одной галактики вокруг другой, поскольку период обращения обычно составляет многие сотни миллионов лет. Измерениям доступны лишь угловое расстояние между галактиками и составляющие их скоростей вдоль луча зрения. Если считать, что расстояние до галактик известно с достаточной точностью, то можно от углового расстояния перейти к расстоянию, выраженному в килопарсеках, однако оно все же не будет равно истинному расстоянию между галактиками, поскольку не известно, какой угол составляет соединяющая их прямая с лучом зрения (рис. 5.2). Нельзя также непосредственно определить, какая часть наблюдаемой лучевой скорости каждой из галактик относится к движению всей двойной системы как целого вдоль луча зрения, а какая связана с относительными скоростями двух галактик.

Если выбрать такие пары, где галактики достаточно далеко отстоят друг от друга, то ошибка, которую мы внесем, рассматривая их как точечные массы, будет не слишком велика, так что мы сможем извлечь некоторую информацию об их массах. Наиболее точные результаты

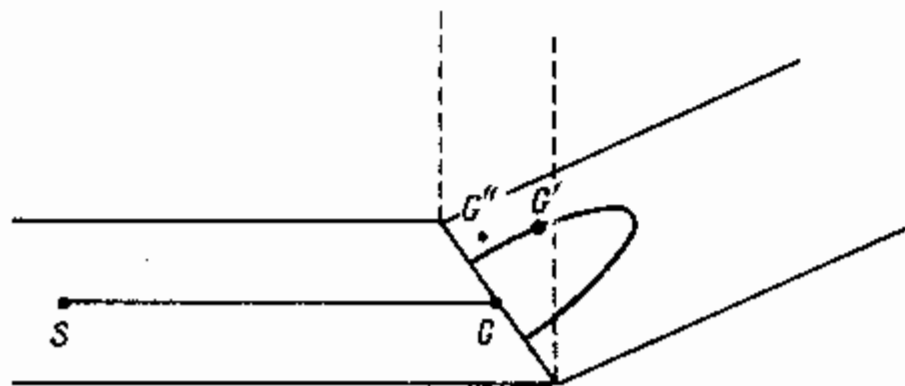


Рис. 5.2. Связь между видимой и истинной орбитами. Если галактика G' движется по эллиптической орбите относительно галактики G , то наблюдатель, находящийся в точке S , видит проекцию галактики G' в точку G'' .

получаются в двух случаях: когда система образована двумя близкими по массе галактиками, так что их массы можно считать приблизительно одинаковыми, или же когда масса одной галактики заведомо во много раз меньше, чем другой. В первом случае, если наблюдаемые лучевые скорости галактик равны v_1 и v_2 , то лучевая скорость центра масс системы составляет $(v_1 + v_2)/2$. Во втором случае в качестве скорости центра масс можно принять скорость v_1 более массивной галактики. Но даже в этих случаях у нас не хватает информации для точной оценки масс галактик, поскольку не известна ориентация орбит относительно картинной плоскости. Единственное, что нам остается, — это использовать статистическую информацию, полученную по наблюдениям многих пар галактик, считая, что плоскости их орбит ориентированы случайным образом.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРЕМЫ ВИРИАЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ОТДЕЛЬНЫХ ГАЛАКТИК И ИХ ГРУПП

Обратимся теперь к методу определения масс отдельных галактик, который можно применить и для оценки полной массы скоплений галактик. Предположим, что имеется большое число частиц, гравитационно взаимодействующих друг с другом. Этими частицами могут быть звезды, если мы рассматриваем отдельную галактику, или галактики, когда речь идет о скоплении галактик. Предположим теперь, что система частиц находится в состоянии статистического равновесия в том смысле, в каком мы использовали этот термин в предыдущей главе. Мы считали, что изменения всех интегральных характеристик системы происходят медленно, так что они практически не изменяются за тот отрезок времени, который необходим одной частице, чтобы пересечь систему. В рамках этого предположения можно показать, что сумма (отрицательной) гравитационной потенциальной энергии и удвоенной кинетической энергии должна быть равна нулю. Это утверждение называется *теоремой вириала*; ее доказательство приведено в приложении 2. Теорему можно записать следующим образом:

$$2T + \Omega = 0, \quad (5.3)$$

где T — кинетическая, а Ω — потенциальная энергия. Выражение для кинетической энергии имеет вид

$$T = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2, \quad (5.4)$$

где суммирование производится по всем частицам (звездам или галактикам), а v_i — скорость частицы массой m_i . Можно записать это выражение иначе:

$$T = \frac{1}{2} M \langle v^2 \rangle, \quad (5.5)$$

где M — полная масса системы, а $\langle v^2 \rangle$ — соответствующее среднее

значение v_i^2 . Гравитационная потенциальная энергия определяется несколько более сложным образом. Для нее можно записать

$$\Omega = - \sum_i \sum_{j \neq i} G m_i m_j / r_{ij}, \quad (5.6)$$

где r_{ij} — расстояние между частицами с массами m_i и m_j . Для системы частиц в целом величина Ω зависит от распределения массы в ней. В случае сферической (или почти сферической) системы это выражение будет иметь вид

$$\Omega = - \alpha G M^2 / R, \quad (5.7)$$

где R — радиус системы, а α — коэффициент порядка единицы, точное значение которого зависит от пространственного распределения массы в системе. Если система однородна по плотности, то $\alpha = 3/5$, но чем больше центральная плотность системы по сравнению с ее средним значением, тем больше α . В галактике или скоплении галактик центральная плотность значительно превышает среднюю, однако, даже если она в 1000 раз больше средней, $\alpha \approx 3$.

Из выражений (5.5) и (5.7) получаем

$$M = R \langle v^2 \rangle / \alpha G. \quad (5.8)$$

Эта формула пригодна для оценки полной массы системы. С учетом того, что $\alpha \approx 1$, из формулы (5.8) следует, что средняя скорость частиц в самогравитирующей системе близка к скорости убегания из системы: для сферической системы радиуса R скорость убегания v_{esc} определяется уравнением

$$v_{esc}^2 = 2GM/R. \quad (5.9)$$

Легко видеть, что v_{esc}^2 и $\langle v^2 \rangle$ совпадают при $\alpha = 2$. Разумеется, частицы вблизи центра системы обладают скоростью, большей, а вблизи границы системы — меньшей, чем скорость убегания. Если бы средняя скорость частиц была значительно выше скорости, определяемой уравнением (5.8), то система испарилась бы, а если бы она была много ниже, то произошел бы коллапс. Формулу (5.8) можно использовать для оценки масс эллиптических галактик. Однако все три величины, входящие в нее: R , $\langle v^2 \rangle$ и α — известны лишь очень приблизительно, поэтому оценки масс крайне ненадежны. К тому же остается прежняя проблема: мы можем измерять лишь лучевые скорости звезд или галактик, поэтому величину $\langle v^2 \rangle$ приходится оценивать, полагая, что среднеквадратичные значения всех трех компонентов скоростей равны между собой. В случае сферической системы есть все основания считать это предположение верным. Хотя теорема вириала позволяет сделать лишь приблизительные оценки, это практически единственный способ оценки массы отдельных эллиптических (сферических) галактик.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС СИЛЬНО СПЛЮСНУТЫХ ГАЛАКТИК

Другой метод применим для оценки масс таких сильно сплюснутых галактик, как наша. Как мы уже отмечали, размер сферической галактики определяется условием соответствия случайных скоростей звезд силе гравитационного притяжения между ними. Именно это условие выражается уравнениями (5.3) и (5.8). В случае сплюснутых галактик теорема вириала (5.8) остается справедливой, однако следует учесть, что кинетическая энергия звезд в них определяется двумя слагаемыми. Во-первых, звезды обладают кинетической энергией, связанной с их случайными движениями, поскольку в любом элементе объема галактики звезды движутся в различных направлениях с различными скоростями. Во-вторых, звезды имеют упорядоченное движение, обусловленное вращением галактики. Как отмечалось в гл. 2, в окрестностях Солнца скорость вращения Галактики составляет около 250 км/с, тогда как случайные скорости большинства звезд не превышают десятой доли этой величины. Отсюда следует, что кинетическая энергия случайных движений составляет около 1% от кинетической энергии упорядоченного движения. Именно это обстоятельство приводит к тому, что Галактика является такой сплюснутой: в направлении, параллельном оси вращения, лишь скорости случайных движений звезд противостоят силе гравитации; круговое движение играет несравненно большую роль, чем беспорядочные движения звезд, но лишь в плоскости, перпендикулярной оси вращения.

КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС В НИХ

Теперь, если учитывать лишь упорядоченное движение звезд, связанное с вращением галактики, можно подойти к вопросу о распределении массы в сильно сплюснутых галактиках и оценке их полной массы. Итак, рассмотрим идеализированную галактику, в которой все ее составляющие — и звезды, и газ — движутся по строго круговым орбитам вокруг ее центра. Мы уже использовали такой подход в гл. 2, когда речь шла о вращении нашей Галактики и о построении ее кривой вращения — зависимости круговой скорости от расстояния от центра. В гл. 3 мы познакомились с тем, как с помощью различных методов можно получить кривые вращения удачно ориентированных близких спиральных галактик. Теперь познакомимся, как с помощью кривых вращения оценить массы нашей и других галактик. Хотя методы построения кривых вращения для нашей Галактики и других галактик сильно различаются, они приводят к качественно сходным результатам, а метод определения массы по кривой вращения одинаков для

всех галактик независимо от того, как эта кривая была построена (рис. 5.3).

Поскольку мы считаем диск галактики бесконечно тонким, примем, что орбиты всех звезд лежат в его плоскости. Допустим также, что галактика симметрична относительно оси вращения, или, говоря более конкретно, что спиральные ветви создают лишь очень небольшое отклонение распределения масс в галактике от осесимметричного. В этом случае, как мы знаем, сила, действующая на любую звезду, направлена к центру галактики (рис. 5.4) и поэтому можно написать:

$$v_{\text{circ}}^2/\tilde{\omega} = -g_{\tilde{\omega}}, \quad (5.10)$$

где $g_{\tilde{\omega}}$ — отрицательная величина, представляющая собой гравитационное ускорение вдоль оси $\tilde{\omega}$. Поле сил гравитации зависит от распределения масс в галактике, так что если нам известна его величина в любой точке галактики, то можно надеяться узнать распределение массы в ней. Пусть плотность вещества равна ρ , тогда

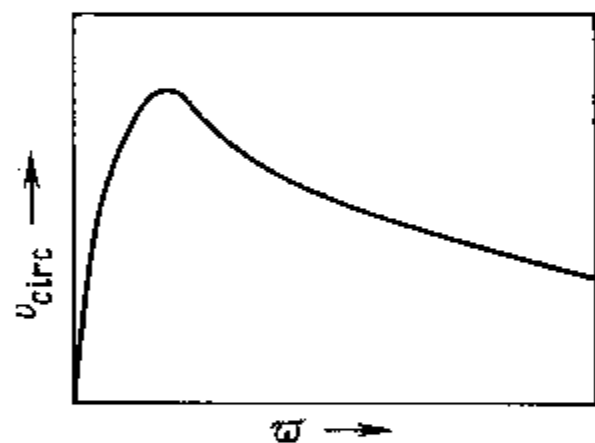


Рис. 5.3. Схематический вид кривой вращения галактики.

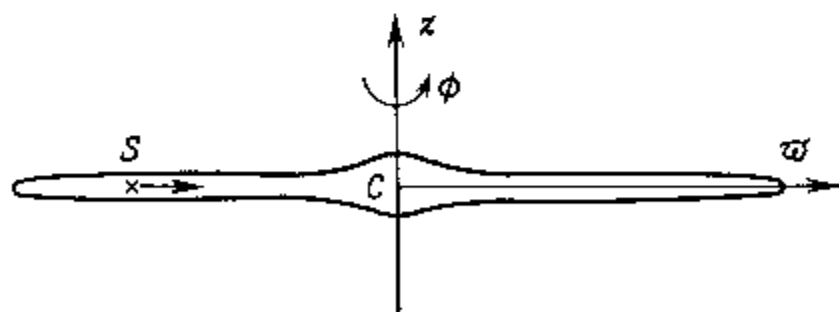


Рис. 5.4. Звезда S, расположенная в экваториальной плоскости галактики, находится под действием силы гравитации, направление которой показано стрелкой.

гравитационный потенциал определяется уравнением Пуассона

$$\nabla^2 \Phi \equiv \frac{1}{\tilde{\omega}} \frac{\partial}{\partial \tilde{\omega}} \left(\tilde{\omega} \frac{\partial \Phi}{\partial \tilde{\omega}} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = -4\pi G \rho, \quad (5.11)$$

где

$$g_{\tilde{\omega}} = \partial \Phi / \partial \tilde{\omega}, \quad g_z = \partial \Phi / \partial z. \quad (5.12)$$

Запишем уравнение (5.10) в более общем виде

$$v_{\text{circ}}^2/\tilde{\omega} = -g_{\tilde{\omega}}, \quad (5.13)$$

где v_{circ} — скорость, определяемая по кривой вращения. Нетрудно видеть, что с помощью (5.13) можно найти по известной кривой вращения величину $g_{\tilde{\omega}}$ или по крайней мере величину $g_{\tilde{\omega}}$, усредненную по толщине галактического диска. Однако это еще не дает нам достаточно информации для того, чтобы мы смогли вычислить ρ из уравнения (5.11). Для этого нужно знать не только $g_{\tilde{\omega}}$, но и g_z в различных точках галактики. Как было показано в гл. 4, можно оценить величину g_z в окрестностях Солнца, однако не известно с достаточной точностью, чему она равна для других областей нашей Галактики, не говоря уже о других галактиках, а пренебречь этой величиной нельзя. В гл. 6 будет показано, что, поскольку диск нашей Галактики очень тонок, градиент потенциала в направлении z выше, чем вдоль радиуса. Из уравнения (5.11) следует, что плотность вещества вблизи нас определяется величиной $\partial^2 \Phi / \partial z^2$. Таким образом, кривая вращения не дает нам достаточно информации для того, чтобы мы могли однозначно определить распределение плотности вещества в Галактике. Однако довольно полную информацию можно извлечь косвенным методом, который мы сейчас опишем.

ПРОСТЫЕ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС В ГАЛАКТИКАХ

Этот метод заключается в построении простых моделей распределения массы в галактиках, причем выбор модели основан на наблюдаемом внешнем виде галактики. Модель должна содержать несколько свободных параметров, которые можно подобрать таким образом, чтобы кривая вращения, рассчитанная для модели, с приемлемой точностью совпала с наблюдаемой. Простой пример: в первом приближении можно считать, что галактика, схематически представленная на рис. 5.4, состоит из двух компонентов: сферической подсистемы небольшого радиуса и очень сильно сплюснутого эллипсоида значительно большего размера. Теперь мы вправе спросить: а может ли суперпозиция подходящих сферического и эллиптического распределений массы привести к кривой вращения, согласующейся с наблюдаемой для данной галактики?

Перейдем к описанию этого метода применительно к нашей Галактике, но прежде укажем, что существует одно важное ограничение на ту информацию о массах галактик, которую можно извлечь из кривых вращения. Никогда нельзя надежно построить кривую вращения вплоть до самого «края» галактики. Даже кривая вращения нашей Галактики не очень хорошо известна для областей, находящихся дальше от центра, чем Солнце. Предположим, что кривая известна до радиуса $\tilde{\omega} = R$. Сила гравитации, действующая на звезду, находящуюся на расстоянии R от центра, обусловлена теми звездами, которые расположены ближе к центру, чем эта звезда. Для сферически симметричной галактики это утверждение абсолютно точно. Оно справедливо и для галактики, состоящей из концентрических эллипсоидальных слоев с одинаковым эксцентриситетом, каждый из которых однороден по плотности (см. приложение 3, в котором рассматривается вопрос о гравитационных полях, создаваемых телами со сферическим и эллипсоидальным распределением вещества). Хотя ни одна реальная галактика не обладает столь идеализированной структурой, в большинстве случаев вещество, находящееся в плоскости галактики за пределами радиуса R , вносит очень небольшой вклад в гравитационное поле на расстоянии R от центра. Таким образом, мы можем получить достаточно надежные результаты, оценивая массу галактики в пределах радиуса R , но анализ кривой вращения до радиуса R дает очень мало информации о распределении массы на расстояниях, больших, чем R^* . Отсюда ясно, что массы галактик, определяемые таким методом, следует рассматривать как нижние пределы истинных масс. Это очень важный вывод, поскольку недавно было выдвинуто предположение о том, что галактики, включая нашу Галактику, могут иметь массивные короны низкой плотности. Ниже мы расскажем, на основании чего было сделано такое предположение, и как можно обнаружить корону, не прибегая к помощи кривых вращения.

МАССА ГАЛАКТИКИ

Обратимся теперь к вопросу об оценке массы нашей Галактики по ее кривой вращения. Рассмотрим серию моделей, в которой каждая последующая лучше предыдущей описывает свойства реальной Галактики. Хотя в конечном счете мы придем к модели, описывающей кривую вращения с точностью, близкой к той, с которой она определена из наблюдений, мы начнем с очень «грубых» моделей, способных объяснить лишь немногие свойства наблюдаемой кривой вращения

* Говоря более строго, речь идет о массе, содержащейся внутри эллипсоидов, большая полуось которых превышает R .

(рис. 5.5). Даже грубейшие модели позволяют с приемлемой точностью оценить массу Галактики, содержащуюся в пределах солнечной орбиты радиуса R_0 , несмотря на то, что они плохо объясняют общий вид кривой вращения и, следовательно, не пригодны для построения детальной картины распределения массы. Это несколько обнадеживает, поскольку нас интересует в первую очередь полная масса галактик.

Начнем с самой примитивной модели. Известно, что значительная часть массы Галактики сосредоточена в ее ядре. Будем считать, что практически все вещество Галактики заключено в сферическом ядре, масса которого равна M_p . На расстоянии R_0 от центра (радиус орбиты Солнца) ядро создает такое же гравитационное поле, как и точечная масса. Определим теперь, какую массу M_p должно иметь ядро, чтобы можно было объяснить наблюдаемую скорость вращения Галактики в окрестностях Солнца. Мы можем записать

$$GM_p/R_0^2 = v_{\phi 0}^2/R_0. \quad (5.14)$$

Подставляя в (5.14) значения $R_0 = 10$ кпс и $v_{\phi 0} = 250$ км/с, получим

$$M_p = 1,4 \cdot 10^{11} M_{\odot}. \quad (5.15)$$

Хотя такая точечная масса дает наблюдаемое значение скорости вращения в окрестностях Солнца, эта модель очень плохо согласуется с формой кривой вращения в целом. Так, максимальная скорость вращения оказывается слишком высокой, а в окрестностях Солнца скорость вращения уменьшается с расстоянием от центра значительно

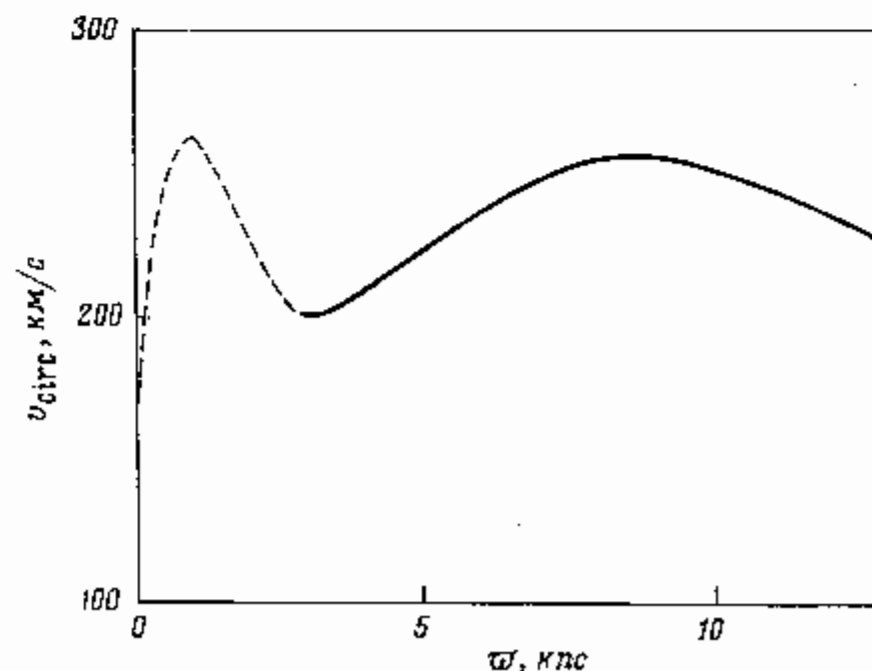


Рис. 5.5. Наблюдаемая кривая вращения Галактики (рис. 2.15).

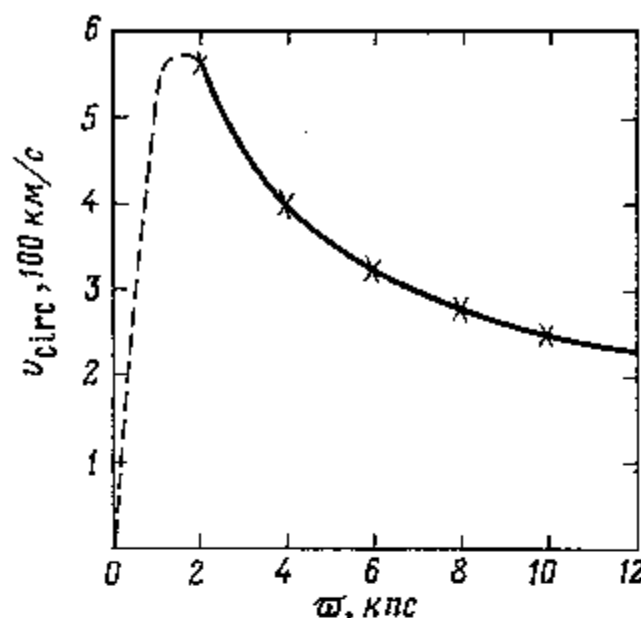


Рис. 5.6. Кривая вращения, полученная для точечной массы и дающая правильное значение круговой скорости для Солнца.

быстрее, чем это наблюдается. Для любой точки за пределами центральной массы справедливо соотношение

$$GM_p/\tilde{\omega}^2 = v_{\text{circ}}^2/\tilde{\omega}, \quad (5.16)$$

которому соответствует кривая вращения, показанная на рис. 5.6. Для окрестностей Солнца эта модель приводит к следующим значениям постоянных Оорта:

$$A = 18,75 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс}), \quad B = -6,25 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс}). \quad (5.17)$$

Они сильно отличаются от обычно принимаемых значений $A = 15 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс})$, $B = 10 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{кпс})$. Ниже мы увидим, что, несмотря на плохое согласие с кривой вращения, значение массы (5.15), по-видимому, отличается от истинного значения массы, заключенной в пределах радиуса R_0 , не более чем на 50%. Это соответствует той точности, с которой, как считается, она известна в настоящее время.

В следующей из простейших моделей Галактики также имеется точечная масса, сосредоточенная в центре, но учитывается, что значительное количество вещества находится за пределами ядра. Наблюдения спиральных галактик, подобных нашей Галактике, показывают, что их диск, судя по распределению яркости, напоминает по форме сильно сплюснутый эллипсоид (за исключением области почти сферически симметричного ядра). Поэтому мы рассмотрим модель, состоящую из центральной массы и эллипсоида. Распределение вещества в эллипсоиде сначала будем считать однородным. Эта модель, вероятно, далека от описания реальной Галактики, в которой плотность почти наверняка уменьшается с увеличением расстояния от центра. Однако она точнее, чем первая модель. Поскольку области эллипсоида за пределами



Рис. 5.7. Модель Галактики, состоящая из точечной массы (или, более реалистично, из небольшого сферического тела) и эллипсоида. Положение Солнца отмечено крестиком.

радиуса R_0 не оказывают никакого гравитационного воздействия на вещество в окрестности Солнца, мы будем считать, что большая полуось эллипсоида равна R_0 (рис. 5.7). Однако не будем забывать, что значительная доля полной массы Галактики может находиться за его пределами.

Для анализа этой модели надо знать, какое гравитационное поле создает эллипсоидальное распределение массы на расстоянии R_0 от центра. Вывод нужной формулы слишком сложен, чтобы его приводить в данной книге, поэтому мы воспользуемся готовым выражением*. Пусть уравнение сечения эллипса, показанного на рис. 5.7, имеет вид

$$(\tilde{\omega}^2/R_0^2) + [z^2/R_0^2(1 - e^2)] = 1, \quad (5.18)$$

где e — эксцентриситет, а $R_0(1 - e^2)^{1/2}$ — малая полуось эллипса. Тогда гравитационное ускорение, направленное к центру эллипсоида, на расстоянии $\tilde{\omega}$ от центра, будет равно

$$-g_{\tilde{\omega}} = \frac{3GM_{\text{sph}}}{2R_0^3 e^3} [\arcsin e - e(1 - e^2)^{1/2}] \tilde{\omega}, \quad (5.19)$$

где M_{sph} — полная масса эллипсоида. Поскольку наблюдения показывают, что спиральные галактики сильно сплюснуты, мы можем в первом приближении считать, что $e = 1$. В этом случае уравнение (5.19) принимает следующий вид:

$$-g_{\tilde{\omega}} = 3\pi GM_{\text{sph}} \tilde{\omega}/4R_0^3. \quad (5.20)$$

С учетом точечной массы в центре получим для кривой вращения Галактики в рамках данной модели следующее выражение:

$$v_{\text{circ}}^2/\tilde{\omega} = GM_p/\tilde{\omega}^2 + 3\pi GM_{\text{sph}} \tilde{\omega}/4R_0^3. \quad (5.21)$$

Теперь мы можем подобрать кривую вращения, определяемую уравнением (5.21), которая лучше всего соответствует наблюдаемой кривой вращения. Легко убедиться в том, что никакой выбор величин M_p и M_{sph} не позволяет полностью воспроизвести наблюдаемую кривую. Поскольку (5.21) содержит два свободных параметра,

* Гравитационные поля, создаваемые эллипсоидами, рассматриваются, например, в книге W. D. MacMillan. The Theory of the Potential, Dover Publ., New York. [Советский читатель может обратиться, например, к книге Г. Н. Дубошина «Теория притяжения». — М.: Физматгиз, 1961. — Ред.]

мы можем выбрать их таким образом, чтобы они объясняли какие-либо два свойства наблюдаемой кривой вращения. Проще всего подобрать эти параметры так, чтобы они удовлетворяли постоянным Оорта (A и B). Этим мы сейчас и займемся. Наилучшего согласия с общим видом кривой вращения можно было бы добиться, потребовав, чтобы расчетная кривая вращения совпала с наблюдаемой в двух точках, причем совсем не обязательно, чтобы в одной из них было Солнце. Из уравнения (5.21) получаем

$$v_{\phi 0}^2 = GM_p/R_0 + 3\pi GM_{sph}/4R_0, \quad (5.22)$$

$$v_{\phi 0} (dv_{circ}/d\tilde{\omega})_{R_0} = -GM_p/2R_0^2 + 3\pi GM_{sph}/4R_0^2. \quad (5.23)$$

Используя выражения, определяющие постоянные Оорта A и B (2.24) и (2.25), мы приходим к следующим уравнениям:

$$(A - B)^2 = GM_p/R_0^3 + 3\pi GM_{sph}/4R_0^3, \quad (5.24)$$

$$-(A - B)(A + B) = -GM_p/2R_0^3 + 3\pi GM_{sph}/4R_0^3. \quad (5.25)$$

Подставив в уравнения (5.24) и (5.25) наблюдаемые значения постоянных Оорта $A = 15$ км/(с·кпс), $B = -10$ км/(с·кпс), получим

$$M_p = 1,16 \cdot 10^{11} M_{\odot}, \quad (5.26)$$

$$M_{sph} = 0,12 \cdot 10^{11} M_{\odot}. \quad (5.27)$$

Таким образом, полная масса, заключенная в пределах R_0 , равна

$$M = 1,28 \cdot 10^{11} M_{\odot}. \quad (5.28)$$

Итак, эта оценка массы лишь немного отличается от оценки, сделанной в рамках модели с центральной точечной массой. Как видно на рис. 5.8, кривые вращения для этих моделей также различаются

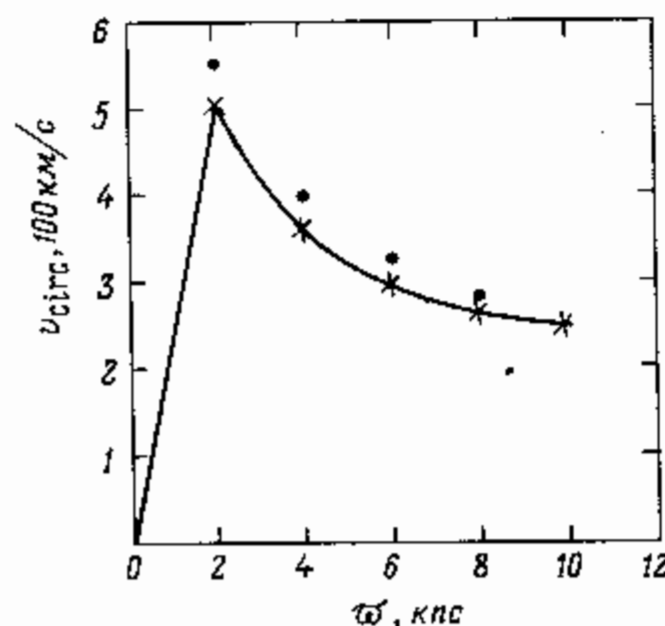


Рис. 5.8. Кривая вращения для модели, состоящей из точечной массы и однородного эллипсоида, дающая правильные значения постоянных Оорта. Темные кружки отмечают положение кривой, приведенной на рис. 5.6.

не очень сильно. При построении кривой вращения для однородного эллипсоида принималось, что в центре Галактики вещество сконцентрировано в шар радиусом 2 кпс постоянной плотности. Кривая вращения (5.22) не воспроизводит многие детали наблюдаемой кривой. Так, например, она имеет только один максимум, и, хотя мы подобрали параметры кривой таким образом, чтобы она давала правильное значение круговой скорости в окрестностях Солнца, круговые скорости на расстояниях, значительно меньших R_0 , завышены.

МОДЕЛЬ ШМИДТА ДЛЯ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

Дальнейшее усовершенствование этой модели было предложено Шмидтом. Оно заключалось в замене однородного эллипсоидального распределения вещества на неоднородное. Хотя Шмидт все же оставил в своей модели точечную центральную массу, она играет сравнительно небольшую роль. По-видимому, это объясняется тем, что в модели Шмидта, допускающей существование высокой плотности вещества с эллипсоидальным распределением массы в центре Галактики (что вполне правдоподобно), получилась очень сильная концентрация массы Галактики к центру. Приняв, что внутри эллипсоида плотность не остается постоянной, Шмидт тем не менее не считал, что эксцентриситет $e = 1$; он оценивал e , сопоставляя свои расчеты с наблюдениями. Однако, как мы увидим ниже, полученное им значение e очень близко к единице.

Чтобы скорость вращения в данной точке по-прежнему определялась массой, заключенной внутри эллипсоида, проходящего через эту точку, Шмидт считал плотность вещества постоянной в пределах концентрических слоев с одинаковыми эксцентриситетами (рис. 5.9). Если α — большая полуось одного из эллипсоидов, то плотность вещества можно выразить как функцию $\rho(\alpha)$, а масса, заключенная

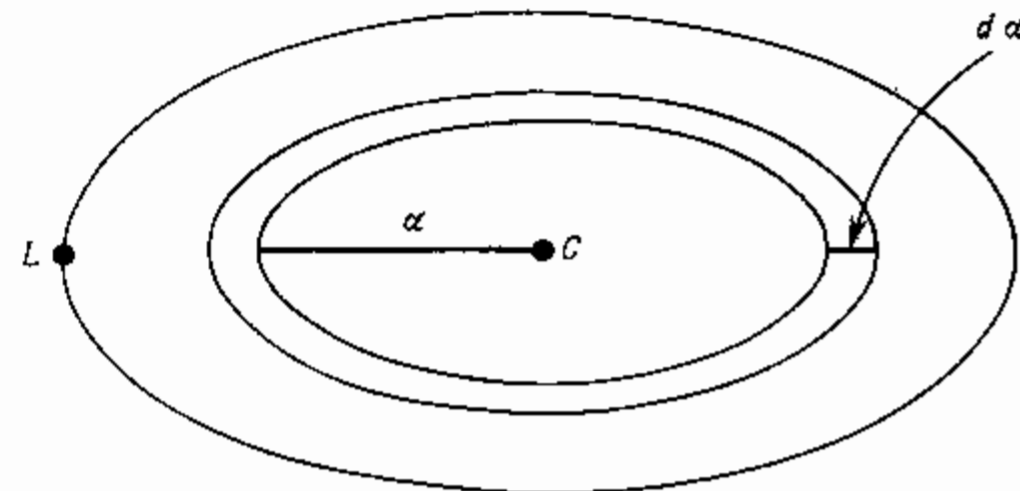


Рис. 5.9.

внутри данного эллипсоида, записывается как $M(\alpha)$. Еще раз приведем без вывода выражение для результирующего гравитационного ускорения. Гравитационное ускорение, создаваемое совокупностью эллипсоидальных слоев в точке, находящейся в их экваториальной плоскости, равно

$$-g_{\tilde{\omega}} = 4\pi G(1 - e^2)^{1/2} \int_0^{\tilde{\omega}} \frac{\rho(\alpha)\alpha^2 d\alpha}{\tilde{\omega}(\tilde{\omega}^2 - \alpha^2 e^2)^{1/2}} = G \int_0^{\tilde{\omega}} \frac{dM(\alpha)}{\tilde{\omega}(\tilde{\omega}^2 - \alpha^2 e^2)^{1/2}}. \quad (5.29)$$

Теперь можно рассмотреть произвольную функцию $\rho(\alpha)$. Удобно представить $\rho(\alpha)$ в виде разложения в ряд по степеням α и использовать небольшое число членов ряда, чтобы получить кривую вращения, близкую к наблюдаемой. На первый взгляд кажется, что следует брать только члены ряда, содержащие величину α в положительной степени, поскольку отрицательные степени α приводят к бесконечной плотности при $\alpha = 0$, т. е. в центре Галактики. Однако если мы не будем ставить своей целью объяснить наблюдаемую кривую вращения вблизи самого центра, где она в любом случае известна не очень хорошо, то ничто не мешает использовать и члены, содержащие α в отрицательной степени, — лишь бы это не приводило к бесконечному значению полной массы. Такой ряд можно записать в следующем виде:

$$\rho(\alpha) = c_{-2}\alpha^{-2} + c_{-1}\alpha^{-1} + c_0 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + \dots, \quad (5.30)$$

где c — постоянные величины. Теперь можно задать следующий вопрос: что получится, если какой-либо член ряда $c_n\alpha^n$ подставить в правую часть (5.29) и вычислить соответствующий вклад в $g_{\tilde{\omega}}$? Прежде всего нетрудно убедиться, что подынтегральное выражение не обращается в бесконечность в точке $\alpha = 0$, если $n \geq -2$, так что можно использовать ряд (5.30). Для любого значения n вклад соответствующего члена ряда в величину $-g_{\tilde{\omega}}$ составит

$$I_n = 4\pi G(1 - e^2)^{1/2} \int_0^{\tilde{\omega}} \frac{c_n \alpha^{n+2} d\alpha}{\tilde{\omega}(\tilde{\omega}^2 - \alpha^2 e^2)^{1/2}}. \quad (5.31)$$

Произведем замену переменных: пусть $\alpha e = \tilde{\omega} \sin \theta$. Тогда $(\tilde{\omega}^2 - \alpha^2 e^2)^{1/2} = \tilde{\omega} \cos \theta$ и $d\alpha = \tilde{\omega} \cos \theta d\theta / e$; отсюда

$$I_n = [4\pi G(1 - e^2)^{1/2} c_n \tilde{\omega}^{n+1} / e^{n+3}] \int_0^{\arcsin e} \sin^{n+2} \theta d\theta. \quad (5.32)$$

Этот интеграл берется непосредственно, если представить I_n и $-g_{\tilde{\omega}}$ в виде

$$I_n = d_n \tilde{\omega}^{n+1}, \quad (5.33)$$

$$-g_{\tilde{\omega}} = (d_{-2}/\tilde{\omega}) + d_{-1} + d_0 \tilde{\omega} + \dots \quad (5.34)$$

Круговую скорость находим по $g_{\tilde{\omega}}$ обычным способом. С учетом существования центральной точечной массы M_p получим

$$v_{\text{circ}}^2 = (GM_p/\tilde{\omega}) + d_{-2} + d_{-1}\tilde{\omega} + d_0\tilde{\omega}^2. \quad (5.35)$$

Эта формула считается справедливой для областей за пределами центральной концентрации массы.

Теперь можно подобрать значения постоянных параметров M_p, d_{-2}, \dots , такие, чтобы расчетная кривая вращения воспроизводила как можно лучше форму наблюдаемой кривой. Шмидт показал, что с учетом точности, с которой известна наблюдаемая кривая, для ее воспроизведения достаточно знать три постоянные: M_p, d_{-1} и d_1 . Это всего на один параметр больше, чем в предыдущей модели, несмотря на то что в моделях используются неодинаковые члены разложения в степенной ряд по $\tilde{\omega}$. Сопоставляя расчетную и наблюдаемую кривые вращения, находим величину M_p . Она оказывается очень небольшой:

$$M_p = 0,075 \cdot 10^{11} M_{\odot}. \quad (5.36)$$

По величинам d_{-1} и d_1 мы не можем непосредственно получить значения c_{-1} и c_1 , а следовательно, и вносимый за счет их вклад в массу галактики, поскольку, как видно из уравнений (5.32) и (5.33), они связаны через эксцентриситет e . Для его оценки Шмидт воспользовался известной плотностью вещества в окрестностях Солнца. Как будет показано в следующей главе, эта плотность приблизительно равна $0,15 M_{\odot}/\text{пс}^3$. А зная $\rho(\alpha = R_0)$, можно найти эксцентриситет, который оказался равным 0,9988. Как и ожидалось, его значение близко к единице, что соответствует такой форме эллипсоида, при которой длина малой полуоси составляет 5% от большой полуоси. Для приведенного значения эксцентриситета масса сфероида составляет

$$M_{\text{sph}} = 0,84 \cdot 10^{11} M_{\odot}, \quad (5.37)$$

а полная масса вещества внутри эллипсоида с большой полуосью R_0 равна

$$M = 0,92 \cdot 10^{11} M_{\odot}. \quad (5.38)$$

Это значение еще меньше, чем (5.28), т. е. каждое усовершенствование модели Галактики приводит к уменьшению оценки массы. Однако нет никакого основания считать, что последующая более сложная модель приведет к еще меньшему значению массы. Было бы удивительно, если бы оказалось, что масса, заключенная в пределах солнечной орбиты, сильно отличается от $10^{11} M_{\odot}$, если только принятые значения A, B и R_0 близки к действительным.

Чтобы оценить массу, находящуюся за пределами эллипсоида с большой полуосью R_0 , Шмидт использовал то немногое, что известно о кривой вращения за пределами орбиты Солнца. Его результаты следует считать менее надежными, чем описанные выше. Интересно, что для массы внешней области Галактики Шмидт получил значение,

почти совпадающее с (5.38). Хотя плотность вещества очень быстро падает с увеличением расстояния от центра, оно занимает очень большой объем. Таким образом, Шмидт нашел, что полная масса Галактики приблизительно равна удвоенной массе, содержащейся в пределах R_0 . Результаты других исследователей согласуются с оценками Шмидта, поэтому принято, что полная масса Галактики лежит в пределах $1,5 \cdot 10^{11} - 2,0 \cdot 10^{11} M_\odot$. Как мы уже упоминали, описанный метод оценки массы нашей Галактики используется и для оценки масс других спиральных галактик.

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ МАССИВНЫЕ КОРОНЫ ГАЛАКТИК?

Хотя принято считать, что крупные спиральные галактики имеют массы порядка $10^{11} M_\odot$ или в несколько раз больше, были высказаны предположения, что их масса значительно выше. Мы уже упоминали, что вещество, находящееся за пределами орбиты Солнца и имеющее сферическое или эллипсоидальное распределение, не оказывает гравитационного воздействия на вещество в окрестностях Солнца. Поэтому наблюдаемая кривая вращения не исключает существования массивной короны. Что же заставило предположить, что существует массивная корона, и в каких наблюдениях ее можно обнаружить? Известны по крайней мере три независимых аргумента в пользу того, что массы галактик значительно больше, чем принято считать. Первый аргумент связан с проблемой «скрытой массы». О ней мы упоминали в гл. 3, и вернемся к ней в гл. 8. Оценки масс отдельных галактик в группах или скоплениях показывают, что если записать для скопления теорему вириала в форме (5.8)

$$M = R \langle v^2 \rangle / \alpha G, \quad (5.8)$$

то окажется, что правая и левая части этого уравнения заметно отличаются. Масса, определенная по теореме вириала, во много раз превышает массу, измеренную непосредственно. Поэтому было выдвинуто предположение, что скопления содержат «скрытую массу». Часть ненаблюдаемого вещества может находиться в пространстве между галактиками. Однако расхождение между расчетной и наблюдаемой массами было бы не столь велико, если бы массы галактик оказались больше, чем обычно считается.

Два других аргумента более сложны, и мы не будем рассматривать их подробно, хотя на одном из них мы остановимся в гл. 7. Этот аргумент связан с проблемами происхождения химических элементов и химической эволюции Галактики. Известно, что очень старые звезды Галактики содержат очень мало химических элементов, более тяжелых, чем водород и гелий. Согласно космологической теории расширяющейся Вселенной, в начальной стадии расширения Вселенная вообще не содержала тяжелых элементов. Хотя наблюдаемое низкое содержание тяжелых элементов в старых звездах находится в каче-

ственном согласии с космологической теорией, остается нерешенной проблема, откуда же взялись тяжелые элементы в самых старых звездах. Либо они уже присутствовали в Галактике при ее образовании, либо появились на стадии ее рождения. В последнем случае они могли возникнуть при взрыве массивного тела в центре Галактики. Возможно также, что начальный период звездообразования проходил в более массивной и более протяженной Галактике, занимающей больший объем, чем современные гало, диск и ядро. Эти области нашей Галактики были в то время еще газовыми, и обогащались тяжелыми элементами за счет ядерных реакций в звездах первого поколения. В гл. 7 и 8 мы рассмотрим эту проблему более подробно.

Наконец, последний аргумент в пользу существования массивных корон чисто теоретический. Наша Галактика (как и другие спиральные галактики) — сильно сплюснутая система. Можно задать вопрос, будет ли такая плоская система устойчивой? Если наблюдаемое распределение вещества в диске подвергнется случайному возмущению, то вернется ли диск к своей первоначальной форме и прежнему распределению вещества, или же он будет искажаться все сильнее, пока не приобретет новую, совершенно иную форму? Многочисленные расчеты показали, что очень сплюснутые галактики, подобные нашей, должны быть неустойчивы, однако неустойчивость будет подавлена, если полная масса галактик значительно больше, чем обычно считают, и если галактики обладают массивной приблизительно сферически симметричной короной. Этот аргумент является скорее предположением, чем выводом, поскольку вычисления показывают лишь неустойчивость диска к небольшим возмущениям, но не предсказывают, к чему приводит рост неустойчивости.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МАССИВНЫХ КОРОН

Есть ли наблюдения, которые свидетельствуют о существовании массивных корон? Прежде всего следует отметить, что, хотя совершенно невозможно обнаружить короны по гравитационному воздействию на внутренние области галактик, они были бы доступны изучению, если бы излучали свет. В некоторых моделях образования и эволюции галактик предполагается, что большая часть вещества короны превратилась в массивные звезды, которые уже давно проэволюционировали, и к настоящему времени угасли. В таком случае у нас нет надежды их обнаружить, так что Галактика могла бы обладать массивной короной, состоящей главным образом из черных дыр.

Предположим теперь, что распределение по массам звезд первого поколения было аналогично современному. Есть ли тогда надежда обнаружить звезды короны? Для других галактик вопрос можно сформулировать так: доступно ли наблюдениям слабое свечение на больших расстояниях от их центра, являющееся продолжением све-

чения самих галактик и свидетельствующее о присутствии протяженных корон? Обнаружение такого свечения в принципе возможно, и тогда это означало бы прямую регистрацию короны. Однако протяженная корона может содержать очень много нормальных звезд, не способных создать достаточно высокую поверхностную яркость, которую можно было бы измерить.

В случае нашей Галактики ситуация несколько иная. Если Галактика действительно обладает протяженной короной, то звезды короны не остаются в ней всю жизнь. Как и быстрые звезды, принадлежащие к сферической составляющей, они, двигаясь по своим орбитам, должны периодически пересекать диск Галактики. Поэтому в любой момент времени в окрестности Солнца должно находиться несколько звезд короны, причём эти звезды будут обладать очень высокими скоростями. Есть смысл провести поиск таких звезд в окрестностях Солнца. Для них должно быть характерно очень низкое содержание тяжелых элементов, однако это удастся проверить лишь в том случае, если звезды достаточно ярки, чтобы можно было получить хороший спектр. Поиски звезд с очень большими скоростями, принадлежащих к населению короны, уже предпринимались, но безрезультатно. Поэтому некоторые астрономы склоняются к тому, что уже сейчас мы располагаем очевидным свидетельством отсутствия у нашей Галактики массивной короны, состоящей из нормальных звезд. Как отмечалось выше, это не исключает возможности существования короны, содержащей главным образом угасшие звезды*. Ведь черные дыры, принадлежащие к такой короне, мы бы не обнаружили и в окрестности Солнца!

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 5

В этой главе мы описали несколько методов определения массы галактик. Сначала мы познакомились с методом оценки масс двойных галактик по изучению их относительного движения. Мы отметили, что поскольку ориентация орбит относительно картинной плоскости отдельно взятых пар галактик не известна, то в этом случае мы получаем информацию о массах галактик лишь статистического характера. Далее мы остановились на том, как можно использовать теорему вириала для оценки масс отдельных эллиптических галактик и полных масс скоплений галактик. Полная масса скоплений часто оказывается значительно больше, чем сумма масс отдельных галактик скопления. Это несоответствие получило название вириального парадокса.

Большая часть главы была посвящена вопросу определения масс сильно сплюснутых галактик по их кривым вращения на примере нашей

* В последнее время кажется очень перспективной идея корон галактик, состоящих из нейтрино с отличной от нуля массой покоя. См. предисловие редактора перевода. — Прим. ред.

Галактики. Предположение о том, что масса галактик распределена в них приблизительно так же, как и яркость, позволяет достаточно точно определить массу, заключенную в области, для которой хорошо известна кривая вращения. Возможно, однако, что половина полной массы нашей Галактики сосредоточена в ее внешней области, за пределами эллипсоида с большой полуосью, равной расстоянию от Солнца до центра Галактики, т. е. там, где кривая вращения известна плохо.

Глава заканчивается обсуждением аргументов в пользу существования у галактик очень массивных корон низкой плотности. Есть несколько независимых аргументов. К ним относятся: вириальный парадокс, предположение о неустойчивости сплюснутых галактик, возникающей в том случае, если они не обладают массивными коронами и, наконец, некоторые соображения, касающиеся образования и ранней стадии эволюции галактик. Пока не установлено, существуют ли массивные короны. Однако для нашей Галактики наличие такой короны, состоящей из нормальных звезд, подобных звездам диска, представляется маловероятным.

ВВЕДЕНИЕ

Мы не будем детально описывать физические свойства межзвездной среды (газа, пыли, космических лучей, магнитного поля) в нашей и других галактиках; для этого потребовалась бы отдельная книга. Но есть целый ряд причин, по которым необходимо и желательно остановиться на некоторых ее свойствах. Во-первых, как мы считаем, галактики первоначально состояли только из газа, и поэтому эволюция галактики — это прежде всего процесс превращения газа в звезды с последующей эволюцией звезд. Во-вторых, даже если в форме газа содержится всего 5% полной массы галактики (как в случае нашей Галактики), без учета присутствия газа совершенно невозможно исследовать ее структуру. В этой и двух последующих главах речь пойдет о газовой составляющей галактик.

Мы начнем с анализа современной структуры газового диска Галактики, а также с некоторых замечаний относительно газовой составляющей других галактик и возможных свойств газового диска в далеком прошлом. В гл. 7 мы опишем химическую эволюцию галактик, о которой мы знаем из анализа химического состава звезд различного возраста и современного химического состава межзвездного газа. Эти проблемы кратко рассматривались в книге «Химические элементы». Здесь мы подходим к ним с несколько иной точки зрения, учитывая при этом достижения последних лет. Наконец, в гл. 8 мы коснемся проблемы образования галактик и заключительных стадий их эволюции. Порядок следования материала в этих трех главах не очень логичен. Казалось бы, следует начать с образования галактик, а затем рассмотреть их эволюцию до современного состояния. Однако мы предпочли обратный порядок, поскольку о свойствах, которыми обладают галактики в современную эпоху, известно значительно больше, чем об их эволюции в далеком прошлом или их образовании.

В гл. 2 и 3 отмечалось, что галактики наряду со звездами содержат межзвездный газ и пыль и что по сравнению с эллиптическими в спиральных и неправильных галактиках на долю газа приходится большая доля массы. В гл. 5 мы использовали некоторые результаты наблюдений газа при анализе связи, существующей между кривой вращения галактики и ее массой. Как упоминалось выше, в спиральных галактиках большая часть газа сконцентрирована в очень тонкий диск, толщина которого сравнима с толщиной диска, образованного яркими звездами. Конечно, мы объясняем сильную сплюснутость как газового, так и звездного диска его вращением, хотя, как мы скоро убедимся, из этого не следует, что толщина газового диска обязательно

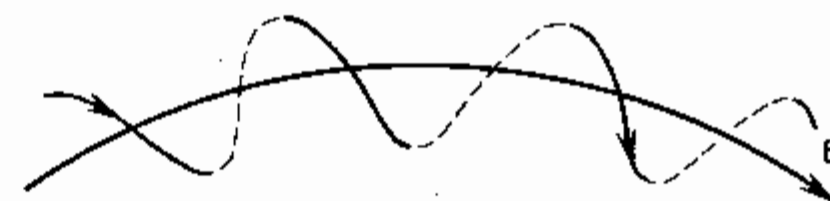


Рис. 6.1. Движение по винтовой траектории частиц космических лучей вдоль магнитной силовой линии.

должна быть такой же, как и звездного. Поэтому выясним, каковы факторы, определяющие толщину газового диска. Для большей конкретности мы будем говорить о нашей Галактике и прежде всего о той области ее диска, в которой находится Солнце.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Прежде всего напомним, что входит в состав Галактики помимо звезд и газа. В Галактике в окрестностях Солнца мы наблюдаем высокоэнергичные частицы космических лучей. Поток их невелик, но плотность кинетической энергии (т. е. энергии, содержащейся в единице объема) сравнима с плотностью энергии движения межзвездного газа. Хотя масса газа значительно больше, чем космических лучей, он движется несравненно медленнее. Скорость космических лучей лишь немного не дотягивает до скорости света, поэтому они могли бы покинуть Галактику менее чем за 10^5 лет, если бы этому ничто не препятствовало. А препятствием является межзвездное магнитное поле. Ниже мы будем использовать понятие *магнитной индукции* (плотности магнитного потока) вместо часто употребляемого понятия *напряженности магнитного поля*. Типичное значение магнитной индукции составляет $3 \cdot 10^{-10}$ Т (тесла)*. Поскольку частицы космических лучей обладают электрическим зарядом, они вынуждены двигаться по винтовым траекториям относительно магнитных силовых линий (рис. 6.1). Поэтому можно ожидать, что они не будут сразу покидать Галактику, если только силовые линии не выходят из нее**. Магнитные поля возникают в присутствии намагниченных тел, либо генерируются электрическими токами. За существование магнитного поля

* Для сравнения укажем, что магнитная индукция у поверхности Земли составляет около 10^{-4} Т.

** Линия магнитной индукции в любой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции в этой точке. В статическом поле линии неподвижны и, поскольку в природе нет магнитных зарядов, всегда замкнуты. Линии магнитной индукции можно ввести и в случае переменного магнитного поля для любого момента времени. Ниже мы будем называть линии магнитной индукции силовыми линиями магнитного поля.

Галактики ответственны электрические токи. Поскольку токи связаны с относительным движением разноименно заряженных частиц межзвездного газа (который частично ионизован) или космических лучей, может показаться странным, что мы рассматриваем магнитное поле как независимое образование. По этому поводу можно сделать два замечания. Во-первых, для образования наблюдаемого магнитного поля достаточно совершенно незначительного относительного перемещения положительных и отрицательных зарядов. Типичная концентрация межзвездного газа составляет 10^6 м^{-3} . Даже если ионизована лишь небольшая доля атомов, то концентрация заряженных частиц может превышать 10^4 м^{-3} . Если магнитная индукция B заметно меняется на отрезке длиной L , то это изменение должно быть связано с плотностью тока j , концентрацией n и относительной скоростью v заряженных частиц следующим соотношением:

$$B/L \approx \mu_0 j = \mu_0 n e v. \quad (6.1)$$

Здесь μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, а e — заряд электрона. Если магнитная индукция равна $3 \cdot 10^{-10} \text{ Т}$, а характерное расстояние, на котором она изменяется, 100 пс (эти величины типичны для межзвездного крупномасштабного магнитного поля), то относительная скорость положительно и отрицательно заряженных частиц должна составлять всего около $5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$. Эта скорость пренебрежимо мала как по сравнению со скоростью теплового движения частиц межзвездного газа, так и по сравнению со скоростью межзвездных облаков газа, поскольку их типичные значения составляют $10^3 - 10^4 \text{ м/с}$. Скорость заряженных частиц останется совершенно незначительной даже в том случае, если характерное расстояние изменения магнитной индукции L окажется на много порядков меньше.

ВРЕМЯ ЗАТУХАНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Второе замечание заключается в следующем. Если существует электрический ток, генерирующий магнитное поле, то его магнитная индукция может понизиться или оно может вообще исчезнуть, так как частицы — носители тока, сталкиваясь с другими частицами, уменьшают свою относительную скорость, в результате чего понижается сила тока. Иными словами, токи затухают из-за конечной электрической проводимости среды η . Можно показать, что время затухания токов τ_D для которых характерное расстояние существенного изменения поля равно L , определяется приближенным соотношением

$$\tau_D \approx L^2/\eta. \quad (6.2)$$

Поскольку межзвездная среда занимает большой объем пространства, часто оказывается, что время τ_D значительно превышает предполагаемый возраст Галактики. Времена затухания магнитных полей в некоторых космических объектах приведены в табл. 6.1. Крупномасштабное

Таблица 6.1

Приближенные времена затухания космических магнитных полей

Время затухания сильно зависит от степени ионизации вещества. В недрах звезд и в горячем межзвездном газе вещество практически полностью ионизовано. Большое различие между временами затухания поля в холодном межзвездном газе и газовых облаках связано с тем, что, как принималось при расчетах, космические лучи поддерживают в межзвездном газе значительно более высокий уровень ионизации, чем можно было бы ожидать при данной температуре среды. Значение для Земли получено в предположении существования жидкого металлического ядра

Объект	$L, \text{ м}$	$T, \text{ К}$	$n, \text{ м}^{-3}$	$\tau_D, \text{ годы}$
Недра звезд	10^8	10^6	10^3	$2 \cdot 10^9$
Горячий межзвездный газ	10^{17}	10^4	10^4	$2 \cdot 10^{24}$
Холодный межзвездный газ	10^{18}	10^2	10^6	10^{13}
Холодное облако газа	10^{17}	10^2	10^8	$3 \cdot 10^8$
Земля	10^6	—	—	$2 \cdot 10^4$

магнитное поле в межзвездной среде затухает за достаточно короткое время лишь в том случае, если степень ионизации вещества очень низка. В первую очередь низкая степень ионизации имеет место в плотных облаках газа, время жизни которых само по себе невелико. Иное дело звезды. В течение их жизни магнитные поля могут сохраняться, а могут полностью затухать. Магнитное поле Земли в течение последних $4,5 \cdot 10^9$ лет, по-видимому, не было в состоянии свободного затухания, а постоянно генерировалось.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ДВИЖУЩЕЙСЯ СРЕДОЙ

Если в движущейся среде (жидкости или газе) имеется магнитное поле с большим временем затухания, то можно считать, что оно всегда существует в этой среде. Это не означает, однако, что магнитная индукция останется в этом случае неизменной. Дело в том, что силовые линии магнитного поля тесно связаны с проводящей средой (вморожены в нее), и если среда движется, то они увлекаются ею. Величиной, сохраняющейся при движении хорошо проводящей среды, является поток магнитной индукции. Рис. 6.2 иллюстрирует это утверждение.

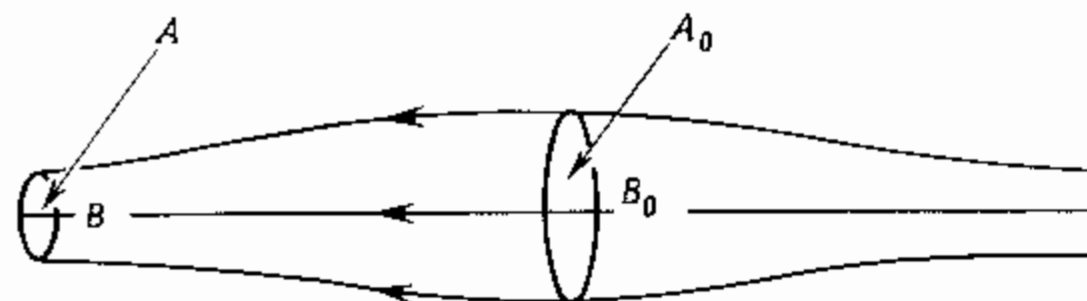


Рис. 6.2. Сохранение магнитного потока. Стрелки направлены вдоль магнитных силовых линий. $B_0 A_0 = BA$.

Поток индукции через малую площадку A , ограниченную размером потока частиц среды, равен BA . Если частицы движутся таким образом, что площадь A уменьшается, то B возрастает, и обратно*.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ДИСКЕ ГАЛАКТИКИ

После этого небольшого отступления, касающегося свойств магнитных полей в проводящих средах, вернемся к межзвездной среде. Будем считать, что межзвездное магнитное поле существует практически независимо от других составляющих. Как мы уже отмечали, магнитное поле — это единственное, что удерживает в Галактике космические лучи, движущиеся с субсветовой скоростью. Космические лучи в свою очередь, действуя на магнитное поле как жидкость с высокой электропроводностью, стремятся «утащить» с собой из Галактики силовые линии магнитного поля. Однако магнитное поле заморожено в межзвездный газ и создается токами, текущими в нем, поэтому оно может покинуть Галактику только вместе с газом. Если бы в Галактике внезапно образовалось достаточно большое количество космических лучей, то действительно могла бы произойти их утечка. Нечто похожее происходит при взрывах в других галактиках, о которых мы упоминали в гл. 3.

В диске Галактики действует и другая сила, играющая важную роль. Каждый элемент газа притягивается к плоскости симметрии Галактики гравитационным полем как звезд, так и остального газа. Если бы не существовало магнитного поля и космических лучей, то толщина газового диска определялась бы из условия соответствия случайных

* Эти представления о взаимодействии проводящих жидкостей с магнитным полем сначала были разработаны теоретически, но вскоре проверены экспериментально в опытах с ртутью. Очень трудно перемешивать ртуть, помещенную между полюсами мощного электромагнита, а когда жидкость приведена в движение, то индукция магнитного поля меняется так, как предсказывает теория.

скоростей частиц газа силе гравитационного притяжения звезд и газа — точно так же, как толщина звездного диска определяется из условия соответствия случайных скоростей звезд силе их взаимного гравитационного притяжения (гл. 4). Поскольку космические лучи связаны посредством магнитного поля с газом, они стремятся «оттянуть» газ от плоскости симметрии Галактики, и в результате газовый диск несколько расплывается. И еще один фактор может играть важную роль. Пока не ясно, существует ли вокруг Галактики межгалактическая среда достаточно высокой плотности. Если она существует, то она должна оказывать давление на внешние области галактического газового диска, стремясь сделать его тоньше, чем он был бы в отсутствие межгалактической среды.

ЭВОЛЮЦИЯ ДИСКА ГАЛАКТИКИ

Рассматривая газовый диск в любой момент его истории, мы можем исходить из упомянутого выше условия соответствия между скоростями хаотического движения газа и гравитационным полем. Остановимся кратко на применимости этого условия к окрестностям Солнца в современную эпоху. Но сначала сделаем ряд замечаний относительно того, как оно выполнялось в процессе эволюции Галактики, при которой происходил обмен веществом между различными составляющими диска. К примеру, из межзвездного газа рождаются звезды, и в то же время есть ряд процессов как взрывного, так и невзрывного характера, приводящих к потере вещества существующими звездами и возвращению его в межзвездную среду. Поскольку вещество, выброшенное звездами, обладает, как правило, значительно большей кинетической энергией в расчете на единицу массы, чем обычный межзвездный газ, образование звезд и потеря ими вещества в итоге увеличивают кинетическую энергию единицы массы межзвездного газа. Это должно приводить к возрастанию толщины газового диска. Однако существует много других конкурирующих эффектов, схематически представленных на рис. 6.3. От их взаимодействия и зависит, как будет меняться толщина газового диска со временем. Наблюдаемое распределение числа звезд в зависимости от расстояния до галактической плоскости, рассмотренное в гл. 2 (табл. 2.3), позволяет нам извлечь информацию о толщине газового диска в эпоху образования этих звезд. Мы можем сопоставить результаты наблюдений с теоретическими представлениями о том, как должна была меняться толщина диска со временем. Результаты, однако, не вполне однозначны. Дело в том, что звезды, редко сталкиваясь друг с другом, гораздо чаще сталкиваются с облаками межзвездного газа, значительно превосходящими их по размеру и массе. Типичным результатом такого столкновения должна быть передача кинетической энергии от более массивного облака к менее массивной звезде, происходящая по крайней мере до тех пор, пока средние кинетические энергии звезд и облаков



Рис. 6.3. Физические процессы, связывающие различные составляющие Галактики.

не сравниваются. Аналогичный процесс передачи энергии может быть связан с кратковременным изменением гравитационного поля, действующего на звезду при ее прохождении через спиральные ветви. Это означает, что старые звезды могут образовывать диск большей толщины, чем тот, который они занимали после своего рождения. В настоящее время нет четких свидетельств того, что толщина диска значительно изменилась с тех пор, как основная масса Галактики оказалась заключенной в звездах.

РАВНОВЕСИЕ СИСТЕМЫ ГАЗ – КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ – МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Рассмотрим вопрос о структуре газового диска Галактики несколько подробнее. Поскольку эффективная толщина диска составляет немногим менее 1% его радиуса, свойства диска значительно медленнее меняются в радиальном направлении, чем перпендикулярно его плоскости. Это означает, что в первом приближении можно рассматривать диск как плоскопараллельную систему бесконечной протяженности в направлении, перпендикулярном направлению его минимальной толщины. Поэтому мы опустим ту часть уравнения равновесия диска, которая связывает радиальную составляющую гравитационной силы со скоростью вращения (гл. 5). Ограничимся анализом уравнения равновесия по z -координате, выбрав для этого систему отсчета, вращающуюся с локальной круговой скоростью $v_{\phi 0}$. Хотя Галактика вращается дифференциально (гл. 2), мы уже убедились в том, что время между

последовательными прохождением звезды или газового облака через диск в несколько раз меньше периода вращения Галактики. Это означает, что, анализируя структуру диска по z -координате, мы можем в первом приближении пренебречь дифференциальным характером ее вращения.

Выберем теперь небольшой элемент вещества в таком бесконечном диске и найдем условие равенства действующих на него сил, предполагая, что элемент находится в состоянии равновесия. Рассматриваемая система состоит из газа, космических лучей и магнитного поля, а звезды будем считать лишь источником силы гравитационного притяжения, действующей на газ. На элемент вещества толщиной δz и площадью δS , находящийся на расстоянии z от плоскости симметрии Галактики (рис. 6.4), действует сила гравитации $\rho \delta S \delta z g_z$, где ρ — плотность газа и космических лучей, а g_z — составляющая гравитационного ускорения, перпендикулярная плоскости симметрии Галактики. Если E_{cr} — плотность энергии космических лучей (включая энергию, соответствующую их массе покоя), то, согласно соотношению Эйнштейна между массой и энергией, плотность космических лучей равна E_{cr}/c^2 . Как мы увидим ниже, наблюдаемое значение E_{cr} близко к $\rho_{gas} \langle v_{gas}^2 \rangle$, где ρ_{gas} — плотность газа, а $\langle v_{gas}^2 \rangle$ — среднеквадратичное значение его скорости. Поскольку $\langle v_{gas}^2 \rangle \ll c^2$, то $\rho_{cr} \ll \rho_{gas}$, поэтому можно пренебречь плотностью космических лучей. Таким образом, сила гравитации, действующая на элемент газа, равна

$$\rho_{gas} g_z \delta z \delta S. \quad (6.3)$$

Газ и космические лучи можно рассматривать как жидкости, оказывающие давление на верхнюю и нижнюю грани элемента. Результирующая сила, создаваемая обоими компонентами среды, равна

$$[P_{gas}(z + \delta z) + P_{cr}(z + \delta z) - P_{gas}(z) - P_{cr}(z)] \delta S, \quad (6.4)$$

где P_{gas} и P_{cr} — давления, создаваемые газом и космическими лучами соответственно. Сила, с которой действует на единицу площади

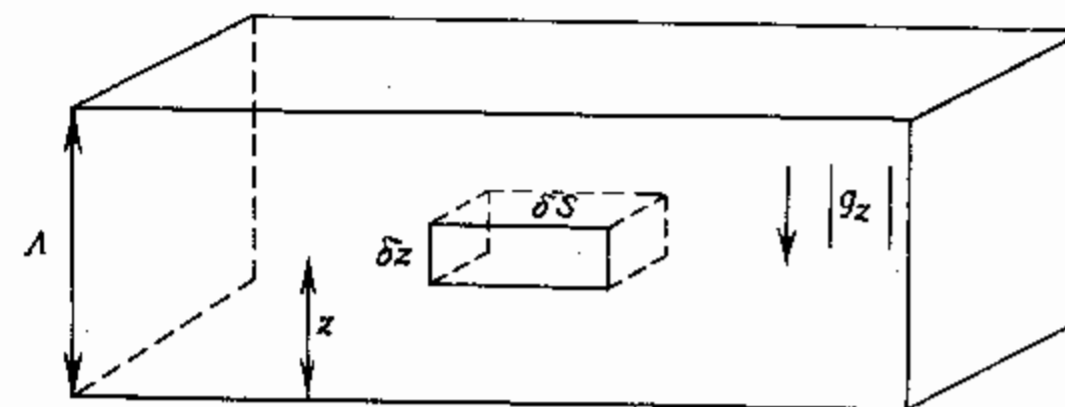


Рис. 6.4.

магнитное поле, в общем случае гораздо сложнее, чем обычная сила давления. Ее можно приближенно выразить через давление P_{mag} лишь в том случае, если магнитные силовые линии строго горизонтальны и в направлении z поле меняется значительно быстрее, чем в других направлениях. Хотя магнитное поле Галактики и не является строго горизонтальным, наблюдения (например, наблюдения межзвездной поляризации света, о которых шла речь на стр. 62) показывают, что его силовые линии в основном параллельны плоскости Галактики. Поэтому разумно ввести в уравнение (6.4) еще один член

$$[P_{\text{mag}}(z + \delta z) - P_{\text{mag}}(z)] \delta S, \quad (6.5)$$

который учитывает силу, создаваемую магнитным полем. Приравнявая результирующее значение силы, обусловленной давлениями различных компонентов, силе гравитации, получаем

$$\frac{dP}{dz} = \frac{dP_{\text{gas}}}{dz} + \frac{dP_{\text{cr}}}{dz} + \frac{dP_{\text{mag}}}{dz} = \rho_{\text{gas}} g_z. \quad (6.6)$$

Здесь g_z — отрицательная величина, поскольку гравитационное поле (его z -компонент) направлено к плоскости симметрии Галактики.

Прежде чем перейти к обсуждению полученного уравнения, убедимся в том, что диск Галактики действительно находится в состоянии равновесия. К этому выводу можно прийти из самых общих соображений. Как было показано в гл. 4, вещество диска упало бы на его плоскость симметрии всего за $2 \cdot 10^7$ лет, если бы ничто не препятствовало такому падению. Это означает, что если бы силы гравитации не были приблизительно уравновешены градиентом давления, то можно было бы ожидать, что диск за такое время существенно изменил бы свою толщину. Указанное время значительно короче всех других характерных времен эволюции Галактики (например, оно короче периода вращения Галактики, времени эволюции большинства звезд и, следовательно, характерного времени химической эволюции Галактики). Отсюда ясно, что галактический диск в первом приближении находится в равновесии. Подчеркнем, что отдельно взятые звезды и газовые облака, принадлежащие к диску, могут сравнительно свободно совершать колебания, проходя сквозь него. Равновесие системы следует понимать в том смысле, что, хотя отдельные ее компоненты и совершают колебания, их распределение в пространстве остается стационарным.

СВОЙСТВА МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ СОЛНЦА

Вернемся теперь к уравнению (6.6). Нельзя найти его строгое решение, однако можно попытаться показать, что наблюдаемые значения входящих в него величин совместимы с предположением о равновесии диска. Поскольку значения этих величин известны не очень

точно, мы не будем рассматривать уравнение (6.6) как абсолютно строго выполняющееся. Рассмотрим сначала, какой вид имеют отдельные члены, входящие в (6.6). Газ в Галактике распределен по диску неоднородно. Помимо концентрации в области спиральных рукавов, о которой речь пойдет ниже, газ частично находится в форме облаков, образуемых главным образом нейтральным газом с температурой порядка 50–100 К, а частично — в форме ионизованной среды значительно меньшей плотности с температурой около 10^4 К. Имеется, по-видимому, и еще более разреженный газ с температурой около 10^6 К. Нейтральный газ легче всего наблюдать по излучению водорода на длине волны 21 см (гл. 2). Совершенно очевидно, что этому методу доступен не весь газ. Наблюдения показывают, что типичное облако имеет массу, при которой его собственная сила гравитации недостаточна для того, чтобы удержать облако от расширения, т. е. она не может противодействовать внутреннему давлению. Если бы не существовало горячей межоблачной среды, оказывающей на облако давление, сравнимое с его внутренним давлением, то такое облако свободно расширилось бы и рассеялось. Поэтому принято считать, что, несмотря на нерегулярный характер распределения плотности в диске, тепловое давление среды в нем достаточно однородно. Мы можем записать для давления газа

$$P_{\text{gas}} = \rho_{\text{gas}} \langle v_{\text{gas}}^2 \rangle / 3, \quad (6.7)$$

где ρ_{gas} и $\langle v_{\text{gas}}^2 \rangle$ были определены выше, причем $\langle v_{\text{gas}}^2 \rangle$ можно отнести к скоростям случайных движений холодных облаков газа, поскольку их движение дает наибольший вклад в давление среды.

Прямые наблюдения космических лучей возможны лишь на Земле и в ее непосредственных окрестностях, хотя, как говорилось на стр. 63, радиоизлучение, принимаемое от других областей Галактики, возникает при движении находящихся там электронов космических лучей по винтовым траекториям в магнитном поле. С учетом эффектов, связанных с движением космических лучей в магнитных полях Солнца и Земли, можно сделать вывод, что их потоки, приходящие к Земле с любого направления, одинаковы. Это определенно свидетельствует об их нелокальном происхождении. По-видимому, электроны рождаются в различных областях Галактики, поэтому разумно предположить, что их плотность вблизи Земли типична и для других областей диска. В любом случае, учитывая, что частицы космических лучей движутся с релятивистскими скоростями, мы можем записать для них уравнение, справедливое для любой релятивистской системы

$$P_{\text{cr}} = E_{\text{cr}} / 3. \quad (6.8)$$

Наконец, если силу, действующую со стороны магнитного поля на единицу площади, описывать как давление, то ее можно представить в виде

$$P_{\text{mag}} = B^2 / 2\mu_0, \quad (6.9)$$

где B , как и раньше, магнитная индукция, а μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Если принять полутолщину диска Галактики равной Λ (рис. 6.4) и не учитывать внешнее давление, оказываемое на границу диска, то градиент давления, входящий в левую часть (6.6), можно считать примерно равным разности давлений между внешней границей и плоскостью симметрии диска, деленной на Λ :

$$-(P_{\text{gas}} + P_{\text{cr}} + P_{\text{mag}})_z = 0/\Lambda. \quad (6.10)$$

Это выражение в первом приближении должно быть равно градиенту давления на половине расстояния между плоскостью симметрии диска и его границей. Мы можем приравнять его силе гравитации, действующей на этом же уровне:

$$-(P_{\text{gas}} + P_{\text{cr}} + P_{\text{mag}})_z = 0/\Lambda = (\rho_{\text{gas}} g_z)_{z=\Lambda/2}. \quad (6.11)$$

Примем для всех величин, входящих в это уравнение, приближенные значения, известные из наблюдений. Подставив их в обе части уравнения (6.11), можно проверить, действительно ли они примерно равны.

ПРЕДЕЛ ООРТА

Но прежде вернемся к незаконченному обсуждению вопроса, затронутого в конце гл. 4. В гл. 4 речь шла об оценке величины g_z в диске Галактики по наблюдениям скоростей звезд. Мы указывали, что если g_z известно, то можно оценить и плотность среды, создающей гравитационное поле. Предполагая, что градиент потенциала перпендикулярно диску значительно больше, чем в радиальном направлении, мы можем упростить уравнение Пуассона, записав его в следующем виде:

$$d^2\Phi/dz^2 = -4\pi G\rho, \quad (6.12)$$

где ρ включает плотность звезд. Наблюдения показывают, что вблизи плоскости симметрии Галактики

$$g_z = -\lambda z, \quad (6.13)$$

где $\lambda \approx 10^{-29} \text{ с}^{-2}$. С учетом того что $g_z = d\Phi/dz$, из совместного решения уравнений (6.12) и (6.13) можно получить значение ρ вблизи плоскости симметрии диска:

$$\rho \approx 0,15 M_{\odot}/\text{пс}^3. \quad \text{ср 137} \quad (6.14)$$

Это значение, уже использовавшееся в гл. 5, называется *пределом Оорта*.

Полученная оценка плотности представляет большой интерес, поскольку ее можно сопоставить с непосредственно измеренным значением плотности среды в той же области. Если плотность наблюдаемой среды меньше предела Оорта, то это означает, что в окрест-

ностях Солнца существует скрытая масса, а если больше — то наоборот, есть трудно объяснимый избыток вещества. Фактически наблюдения всегда приводили к оценкам плотности ниже предела Оорта. Когда только начиналось изучение этой проблемы, наблюдения могли объяснить лишь половину требуемой плотности. С тех пор были обнаружены слабые звезды и газ (главным образом молекулярный водород). В настоящее время наилучшие оценки плотностей звезд и газа составляют

$$\rho_s \approx 0,064 M_{\odot}/\text{пс}^3, \quad \rho_{\text{gas}} \approx 0,024 M_{\odot}/\text{пс}^3. \quad (6.15)$$

Остальная часть плотности, относящаяся к ненаблюдаемому веществу, может быть обусловлена присутствием очень слабых или угасших звезд или же не обнаруженных еще масс газа. Следует отметить, что относительное количество вещества, заключенного в газе и звездах, которое следует из (6.15), не противоречит полученным ранее оценкам отношения массы газа и звезд в Галактике в целом. В области ядра, где содержится значительная доля полной массы Галактики, относительное содержание газа ниже, поэтому доля массы, приходящаяся на газ, в окрестностях Солнца выше, чем в среднем в Галактике.

Вернемся теперь к уравнению (6.11) и рассмотрим наблюдаемые значения содержащихся в нем величин. Мы уже говорили о том, что магнитная индукция примерно равна $3 \cdot 10^{-10} \text{ Т}$, хотя это значение меняется от одной области к другой. Из формулы (6.9) получаем

$$P_{\text{mag}} \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ Н/м}^2. \quad (6.16)$$

Плотность энергии космических лучей в окрестностях Земли составляет примерно 10^6 эВ/м^3 , или $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/м}^3$. Этому значению соответствует

$$P_{\text{cr}} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ Н/м}^2. \quad (6.17)$$

Итак, давления магнитного поля и космических лучей приблизительно равны. Это обстоятельство мы обсудим ниже. Наконец, случайные скорости облаков газа составляют около 10 км/с , это значение вместе с оценками плотности (6.15) дает

$$P_{\text{gas}} \approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ Н/м}^2, \quad (6.18)$$

что близко к значениям двух других давлений. Очевидно, что все эти давления равны друг другу в пределах точности, с которой они известны. Полутолщина газового диска составляет около 100 пс , или $3 \cdot 10^{18} \text{ м}$, отсюда левая часть уравнения (6.11) равна $5 \cdot 10^{-32} \text{ Н/м}^3$. Что касается правой части уравнения, то при ее оценке будем исходить из следующего. Из уравнений (6.12) и (6.13) следует, что g_z падает с ростом z значительно быстрее, чем ρ_{gas} (здесь предполагается, что $\rho \sim \rho_{\text{gas}}$ — *Перев.*), — если бы между g_z и z была строго линейная зависимость, то ρ было бы постоянным. Мы не сделаем большой ошибки, если используем значение ρ_{gas} для плоскости симметрии Галактики,

а значение g_z возьмем для $z = 50$ пс. Тогда правая часть (6.11) окажется равной приблизительно $3 \cdot 10^{-32}$ Н/м³. Правая часть не в точности равна левой, однако согласие следует считать очень хорошим, если принять во внимание грубость наших оценок и то, что ни одна из величин, входящих в уравнение, не известна с достаточной точностью. Хотя подобные оценки не могут доказать, что диск находится в состоянии равновесия, они не дают основания отказаться от нашего предположения о его равновесном состоянии, сделанного на стр. 150.

На стр. 147 мы уже затрагивали вопрос о возможном изменении толщины диска со временем. Теперь мы можем сделать еще несколько замечаний, имеющих более конкретный характер. Рассмотрим уравнение (6.11), записанное в другой форме:

$$\Lambda \approx [\langle v_{\text{gas}}^2 \rangle / 3 + (P_{\text{cr}} + P_{\text{mag}}) / \rho_{\text{gas}}]_{z=0} / g_z|_{\Lambda/2}. \quad (6.19)$$

Из этого уравнения легко видеть, что, поскольку g_z не меняется со временем (если только Галактика не теряет и не приобретает массу), толщина газового диска увеличивается либо с возрастанием $\langle v_{\text{gas}}^2 \rangle$, либо с уменьшением ρ_{gas} при условии, что параметры магнитного поля и космических лучей остаются теми же. Уменьшение $\langle v_{\text{gas}}^2 \rangle$, которое может быть вызвано охлаждением газа или передачей энергии звездам при столкновении звезд с газовыми облаками, напротив, приводит к тому, что газовый слой становится тоньше. Роль, которую играют космические лучи или магнитное поле, если их рассматривать по отдельности, совершенно ясна. Но если все величины меняются одновременно, то результат не столь очевиден; в прошлом в Галактике, конечно, происходили именно такие изменения.

ГАЛО ГАЛАКТИКИ И МЕЖГАЛАКТИЧЕСКАЯ СРЕДА

Сделаем еще одно замечание, касающееся равновесного состояния газового диска. Переходя от уравнения (6.6) к уравнению (6.11), мы считали, что давление на внешней границе диска очень мало. Это предположение может оказаться неверным. Галактика, возможно, окружена межгалактической средой, оказывающей значительное давление. Существующие наблюдения гало Галактики не исключают возможности того, что в нем присутствует газ очень низкой плотности, но очень высокой температуры ($\sim 10^6$ К), давление которого на уровне $z = \Lambda$ следует учесть в уравнении (6.11). Результаты радионаблюдений, о которых мы упомянем ниже, также указывают на существование космических лучей и магнитных полей за пределами тонкого газового диска. Несовпадение численных значений правой и левой частей уравнения (6.11) частично компенсировалось бы учетом давления горячего газа гало, поскольку оно уменьшает (по модулю) левую часть уравнения: давление газа гало при $z = \Lambda$ вычитается из нее. Однако, как мы уже отмечали, необходимость учета внешнего давления не очевидна.

ПРИБЛИЗИТЕЛЬНОЕ РАВЕНСТВО ДАВЛЕНИЙ ГАЗА, КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Сделаем теперь несколько замечаний качественного характера относительно равенства давлений газа, космических лучей и магнитного поля. Является ли их приблизительное равенство случайным совпадением, или же в нем следует усматривать более глубокий смысл? Обратимся сначала к космическим лучам. Они связаны с Галактикой посредством магнитного поля, но полностью ли они удерживаются в ней? Космические лучи, как мы считаем, генерируются непрерывно, и источниками их являются, по-видимому, вспышки *сверхновых* или продолжающаяся активность *пульсаров* — остатков этих звездных взрывов. Частица космических лучей, разогнанная до высокой энергии, будет двигаться в Галактике, время от времени сталкиваясь с частицами межзвездного газа. В результате таких столкновений атомные ядра, входящие в состав космических лучей, могут либо потерять свою скорость, либо распасться на менее массивные ядра. Наиболее важным процессом является превращение массивных ядер в легкие, и наблюдаемый химический состав космических лучей дает нам информацию о количестве распадов, а следовательно, и о среднем возрасте частиц космических лучей. Эта проблема обсуждалась в гл. 4 книги «Химические элементы». Там говорилось о том, что возраст космических лучей в окрестностях Солнца не превышает 10^7 лет, откуда следует, что космические лучи не являются «вечными узниками» Галактики.

УТЕЧКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ИЗ ГАЛАКТИКИ

Если космические лучи действительно покидают Галактику, то нужно узнать, в чем причина этого. Хотя теория космических лучей еще не завершена, общая идея сводится к следующему: космические лучи удерживаются в Галактике магнитным полем. Очевидно, что такой механизм способен удерживать частицы лишь до тех пор, пока плотность энергии космических лучей значительно меньше плотности энергии магнитного поля. При этом магнитное поле можно рассматривать как сосуд с жесткими стенками, которые космические лучи не могут разрушить. Ситуация, очевидно, изменится, если плотность энергии космических лучей станет слишком большой. В этом случае можно ожидать, что магнитные стенки разрушатся или по крайней мере «дадут течь».

С несколько сходной проблемой ученые столкнулись в экспериментах по осуществлению управляемой термоядерной реакции в лаборатории. Сначала считалось, что очень горячий ионизованный газ будет удерживаться магнитным полем и не будет входить в соприкосновение со стенками камеры. Не составило труда спроектировать *магнитные бутылки*, представляющие собой равновесные конфигурации горячего газа, удерживаемого магнитным полем. Однако эксперимент показал,

что в большинстве случаев они оказались очень неустойчивыми и прежде всего в тех случаях, когда давление удерживаемого газа было сопоставимо с давлением магнитного поля. Не исключено, что система космические лучи — магнитное поле Галактики подвержена аналогичным типам неустойчивости, особенно тогда, когда в некоторой области Галактики плотность энергии космических лучей сравнима с плотностью энергии магнитного поля. Это могло бы объяснить приближенное равенство, наблюдаемое между давлениями магнитного поля и космических лучей. Если бы все космические лучи, возникшие за время существования Галактики, сохранились в ней до настоящего времени, то давление космических лучей было бы на несколько порядков величины больше давления магнитного поля. В действительности, когда давление космических лучей становится слишком высоким, они покидают Галактику. Если причиной утечки космических лучей из Галактики являются неустойчивости, то, по-видимому, последовательность развивающихся локальных неустойчивостей приводит к диффузии космических лучей от плоскости симметрии диска к его периферии. В таком случае средний возраст космических лучей вблизи краев диска должен быть значительно больше, чем в окрестностях Солнца. У нас нет непосредственных данных об этом, поскольку мы можем определять химический состав лишь тех космических лучей, которые достигают Земли. Если в результате развития неустойчивостей космические лучи вылетают в гало, то становится понятным происхождение радиоизлучения, о котором мы говорили на стр. 154, — радиоизлучения, возникающего в области большей толщины, чем главный газовый диск.

ПРОСТЕЙШАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ГАЗ — КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ — МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Для наглядности рассмотрим одну из неустойчивостей, которая допускает простое и наглядное описание. Пусть силовые линии магнитного поля параллельны плоскости диска, как показано на рис. 6.5, а. И межзвездный газ, и космические лучи связаны с магнитным полем. Предположим теперь, что силовые линии магнитного поля несколько

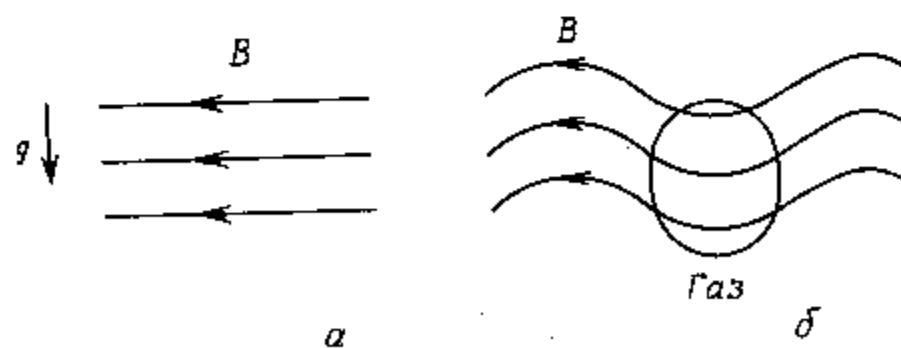


Рис. 6.5. Простой тип неустойчивости системы, образуемой магнитным полем и газом.

деформированы, как показано на рис. 6.5, б. В результате такого искажения межзвездный газ под действием сил гравитации будет стекать в самую «низкую» область магнитного поля. В отличие от газа частицы космических лучей не подвержены заметному влиянию сил гравитации, поэтому они по-прежнему будут приблизительно равномерно распределены вдоль силовых линий магнитного поля. В результате в верхней части пучка силовых линий, там, где количество газа уменьшилось, космические лучи будут стремиться «всплывать». Это, очевидно, означает, что начальное возмущение будет усиливаться. Детальные расчеты подтверждают существование неустойчивости такого типа. Конечно, существуют и другие более сложные типы неустойчивостей, которые мы здесь не будем описывать и которые, возможно, действуют более эффективно, позволяя космическим лучам покидать область диска, занимаемую газом.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Обратимся теперь к вопросу о приблизительном равенстве давлений газа и магнитного поля. Здесь также придется ограничиться очень схематичным описанием: детальное обсуждение было бы слишком сложным, к тому же до сих пор еще не разработано удовлетворительной теории. В начале настоящей главы мы отметили, что магнитное поле Галактики, по-видимому, затухает, однако магнитная индукция зависит от движения среды: оно изменяет магнитную индукцию, но оставляет неизменным магнитный поток. Движение среды в принципе может привести как к увеличению, так и к уменьшению магнитной индукции (чтобы убедиться в этом, достаточно сначала представить себе, что среда определенным образом движется, а затем спросить, что произойдет, если движение сменится на обратное). Однако если первоначальное магнитное поле имело простую структуру, то в большинстве случаев движение среды будет стремиться увеличить магнитную индукцию (рис. 6.6). Поэтому представляется вполне вероятным, что за минувшую историю Галактики в среднем магнитная индукция возросла благодаря движениям газа. Если среда находится в непрерывном движении, то процесс увеличения магнитной индукции может продолжаться бесконечно или по крайней мере до тех пор, пока эти движения не исказят магнитное поле настолько, что характерная длина L , на которой оно значительно меняется, станет достаточно малой и время затухания поля τ_D , определяемое формулой (6.2), окажется меньше других характерных времен эволюции Галактики. В системе описываемого типа действует, однако, и другой важный эффект. Если магнитная индукция увеличивается, то магнитные силы могут возрасти настолько, что поле будет само влиять на движение среды.

Отсюда напрашивается вывод, что среда может исказить силовые линии магнитного поля лишь тогда, когда энергия ее движения

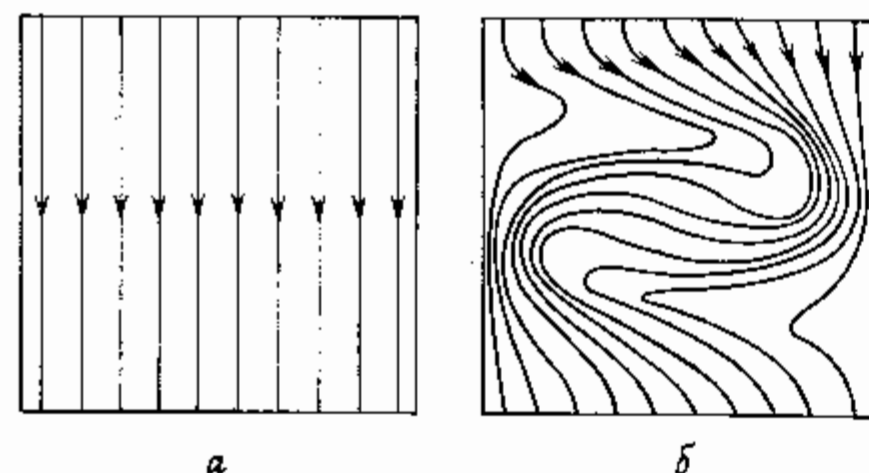


Рис. 6.6. Эффект движения жидкости в магнитном поле. При простом вихревом типе движения первоначально прямолинейные магнитные силовые линии (а), превращаются в искривленные линии (б). В тех областях, где силовые линии находятся ближе всего друг к другу, магнитная индукция значительно возрастает. Среднее значение магнитной индукции также увеличивается.

значительно превышает энергию магнитного поля. Когда эти энергии становятся сравнимыми по величине, поле будет сопротивляться дальнейшему искажению и усилению. Этим можно объяснить приблизительное равенство газового и магнитного давлений в диске при условии, что газовые облака многократно пересекли диск за время существования Галактики. Этот аргумент, предложенный для объяснения *равнораспределения энергий* движения среды и магнитного поля, не очень хорошо обоснован, но его пытаются использовать для решения многих проблем в астрофизике, включая и такие, к которым он совершенно неприменим. Встречаются, например, такие ситуации, когда энергия движения среды меньше, чем энергия магнитного поля, и тем не менее среда все же может искажать его силовые линии. В таких случаях существует механизм, поддерживающий движение среды, энергия которого превосходит как энергию среды, так и энергию магнитного поля, и который не позволяет магнитному полю затормозить движение среды.

Подчеркнем, что описанные выше взаимодействия между тремя компонентами межзвездной среды: космическими лучами, магнитным полем и межзвездным газом — следовало бы рассматривать не по отдельности, а в совокупности.

ОБРАЗОВАНИЕ ЗВЕЗД

В заключение настоящей главы мы сделаем ряд замечаний по поводу другой очень сложной проблемы — образования звезд. Чтобы межзвездный газ мог превратиться в звезды, его средняя плотность должна возрасти примерно в 10^{24} раз. А чтобы сжатие данной области

межзвездного газа привело к образованию звезд, его гравитационная потенциальная энергия должна превосходить кинетическую энергию (внутренних движений). Межзвездная среда обычно не находится в таком состоянии, при котором может начаться ее гравитационное сжатие. В противном случае процесс образования звезд был бы очень эффективным, и скорее всего, к настоящему времени вообще не осталось бы межзвездного газа. Звездообразование, очевидно, было очень эффективным, когда галактики только сформировались. Для нашей Галактики справедливость такого вывода станет ясной из следующей главы. Считается, что именно вследствие эффективного процесса звездообразования в начале эволюции в эллиптических галактиках к настоящему времени осталось мало газа. В спиральной галактике, подобной нашей, где после фазы активного звездообразования значительная доля массы осталась в форме газа, рождение звезд в настоящее время может происходить лишь в том случае, если в результате какого-либо процесса увеличивается средняя плотность и (или) уменьшается средняя дисперсия скоростей в данной области межзвездного газа. Фактически увеличение плотности должно сопровождаться уменьшением кинетической энергии случайных движений, поскольку с ростом плотности становятся более эффективными процессы охлаждения газа.

Один из предложенных процессов увеличения плотности газа связан с наблюдаемыми столкновениями межзвездных облаков. Эти облака не являются гравитационно связанными, и их существование в течение достаточно длительного времени объясняется тем, что они окружены горячей межоблачной средой, препятствующей их расширению. Сталкиваясь между собой, облака могут сливаться, что в конце концов приведет к образованию облаков достаточно большой массы, в которых силы гравитации преобладают над всеми другими силами. Хотя такой процесс может играть важную роль в звездообразовании, в настоящее время принято считать, что в спиральных галактиках действует еще один более важный фактор.

СПИРАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

В гл. 3 мы упомянули о том, что спиральная структура галактики связана с распространением волны плотности, так что вещество, входящее в состав спирального рукава, все время обновляется. К таким представлениям привел тот факт, что галактики вращаются не как твердое тело, а их угловая скорость меняется вдоль радиуса, поэтому спиральная структура, образуемая фиксированным набором частиц, изменилась бы до неузнаваемости за несколько оборотов. Вот почему возникла идея, что по галактике движется спиральная волна, причем так, что общий вид галактики сохраняется в основных чертах в течение многих оборотов, хотя вещество в спиральном рукаве непрерывно обновляется.

Согласно этим представлениям, при прохождении спиральной волны через газ плотность его увеличивается. Этот процесс может привести к тому, что в части газа начнется гравитационное сжатие. Однако грубые оценки показывают, что это сжатие вряд ли приводит непосредственно к образованию отдельных звезд. Гравитационный коллапс газового облака массой M , радиусом R и среднеквадратичной скоростью частиц $\langle v^2 \rangle$ может произойти в том случае, если $GM^2/R \geq M \langle v^2 \rangle$. Перепишем это выражение в более удобной форме: исключим R , представив его через плотность ρ . Пренебрегая множителями, значения которых мало отличаются от единицы, получим

$$M \geq \langle v^2 \rangle^{3/2} / G^{3/2} \rho^{1/2}. \quad (6.20)$$

Для типичных значений плотности межзвездного газа и скоростей случайных движений внутри облаков найдем $M \geq 10^3 M_\odot$. Маловероятно, чтобы в спиральной волне плотность газа увеличивалась и (или) температура понижалась настолько, чтобы величина M уменьшилась до типичного значения массы звезды, равного M_\odot . Однако, как можно видеть из (6.20), если гравитационное сжатие началось и ρ возрастает, то значение массы облака, при котором оно остается гравитационно связанным, уменьшается. Принято считать, что в результате этого сжимающегося облака разбивается на облака меньших масс, которые продолжают сжатие. Этот процесс идет до тех пор, пока в конечном счете не возникнет большое число объектов со звездными массами. Таким образом, звездообразование происходит путем *последовательной фрагментации* облака, поэтому большинство звезд должны возникать в скоплениях, а не изолированно.

Вывод, что звездообразование связано со спиральной структурой, которая обусловлена действием волнового процесса, надежно аргументирован. Прежде всего отметим следующее: массивные звезды главной последовательности, которые, несомненно, являются молодыми, расположены как в нашей, так и в других спиральных галактиках, главным образом в спиральных рукавах. В этом легче всего убедиться, наблюдая ближайшие яркие спиральные галактики, в которых мы можем исследовать все элементы спиральной структуры. У нас нет оснований считать, что звезды больших и малых масс образуются различным путем. В таком случае наблюдаемая концентрация молодых массивных звезд в спиральных рукавах свидетельствует о том, что спиральные рукава — это основные области рождения звезд. Мы уже говорили, что спиральная волна плотности движется по галактике, так что звездообразование может происходить последовательно во всех областях галактического диска. Наиболее массивные звезды имеют настолько короткую продолжительность жизни, что к тому времени, когда их светимость сильно уменьшится, спиральный узор едва изменит свое положение. Поэтому они наблюдаются только внутри спиральных рукавов. Звезды несколько меньшей массы сохраняют высокую светимость в течение времени, составляющего ощутимую долю периода

вращения спиральной волны плотности. Следовательно, такие звезды можно наблюдать не только внутри спиральных рукавов, но и в прилегающих областях позади них, где еще недавно находились области звездообразования. Продолжительность существования на главной последовательности менее массивных звезд, таких, как Солнце, составляет много периодов обращения спирального узора. Такие звезды должны наблюдаться всюду в диске, причем их положение никак не связано с положением спиральных рукавов. Наблюдаемое распределение звезд различных спектральных классов и, следовательно, различной продолжительности жизни в общих чертах хорошо согласуется с этими предсказаниями, особенно если учесть, что сжатие газа в спиральных волнах плотности, по-видимому, не является единственной причиной звездообразования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 6

Эта глава посвящена динамическим свойствам различных компонентов Галактики (кроме звездного компонента). В частности, мы рассматривали строение диска в окрестности Солнца. Мы показали, что электропроводность межзвездного газа настолько высока, что магнитное поле Галактики, по-видимому, не затухает, и поэтому его можно рассматривать как постоянно существующий важный компонент Галактики. Магнитное поле сильно связано с двумя другими важными компонентами межзвездной среды: газом и космическими лучами. Электрически заряженные частицы независимо от того, принадлежат ли они к потоку космических лучей или к ионизированной составляющей межзвездного газа, вынуждены двигаться по винтовым траекториям вдоль силовых линий магнитного поля. Космические лучи нельзя удерживать в Галактике гравитационным полем, создаваемым звездами и газом, они удерживаются магнитным полем. В свою очередь космические лучи стремятся «вытолкнуть» магнитное поле из Галактики. Магнитное поле «вморожено» в газ, на который действует гравитационное поле звезд. Толщина галактического диска должна определяться равновесием между этими различными силами, и мы показали, что наблюдаемая толщина газового диска Галактики вблизи Солнца согласуется с этими представлениями.

Анализ условия равновесия газового диска Галактики можно выполнить для любых значений плотности кинетической энергии газа, энергии магнитного поля и космических лучей. Однако наблюдения указывают на то, что в окрестностях Солнца плотности энергии всех трех составляющих приблизительно равны. Утверждается, что это равномерное распределение энергий, по-видимому, не является случайным. Вероятнее всего, магнитное поле не может предотвратить утечку космических лучей, если плотность их энергии в данном месте превышает плотность энергии магнитного поля. При непрерывной гене-

рации космических лучей их плотность может возрастать лишь до тех пор, пока не будет достигнуто равнораспределение энергий. Поскольку при своем движении через диск Галактики облака межзвездного газа искажают силовые линии магнитного поля, это может привести к увеличению среднего значения магнитной индукции. Однако если плотность энергии магнитного поля сравнима или больше, чем плотность кинетической энергии газа, то поле само способно влиять на движение газа. Мы еще далеки от полного понимания причин равнораспределения плотностей энергий и не можем прямыми методами узнать о том, имеет ли оно место в других областях диска.

В конце главы мы кратко рассмотрели проблемы звездообразования. Предполагается, что увеличение плотности газа в спиральной волне является основным фактором, стимулирующим в настоящее время звездообразование в нашей и других спиральных галактиках. Отмечалось также, что звездообразование, по всей видимости, происходит путем последовательной фрагментации облака газа с массой, характерной для звездного скопления, а не путем непосредственного сжатия газа в отдельные звезды.

Глава 7

Химическая эволюция галактик

ВВЕДЕНИЕ

Изучение химического состава звезд в нашей Галактике показывает, что он меняется от звезды к звезде, причем неслучайным образом. В частности, существует корреляция между

- а) химическим составом звезд и их возрастом,
- б) химическим составом звезд и их положением в Галактике, точнее, положением области, в которой они образовались.

Это означает, что самые старые звезды и звезды, возникшие в гало Галактики, содержат гораздо меньше тяжелых элементов, чем самые молодые звезды и звезды, родившиеся в диске Галактики. Не совсем ясно, можно ли свести эти две корреляции к одной. В пределах той точности, с которой известны возрасты звезд, допустимо предположение, что все звезды гало старше всех звезд диска, и низкое содержание тяжелых элементов в них зависит от того, в какую эпоху они возникли. Однако есть ряд указаний на то, что звезды одинакового возраста, принадлежащие к гало, сильно отличаются друг от друга содержанием тяжелых элементов, причем звезды, родившиеся дальше всего от центра Галактики, наиболее бедны тяжелыми элементами. Ниже мы увидим, что содержание тяжелых элементов в Галактике, по-видимому, очень быстро возросло вскоре после ее образования, поэтому оценки возрастов звезд не достаточно точны, чтобы решить, является ли время образования звезд основным фактором, определяющим их химический состав, или же всегда имели место заметные вариации химического состава в зависимости от положения в Галактике.

Мы знаем, что самые молодые звезды богаче тяжелыми элементами, чем самые старые, и что ядерные реакции в звездах, которые приводят к превращению легких элементов в тяжелые, — вероятно, единственный возможный источник энергии большинства звезд; поэтому разумно предположить, что для начального химического состава Галактики был характерен дефицит тяжелых элементов и что наблюдаемые ныне тяжелые элементы образованы первыми поколениями звезд. Они были выброшены из звезд в межзвездную среду, а затем вошли в состав звезд следующих поколений. Основные представления о химической эволюции описаны в книге «Химические элементы» и подробнее всего в ее гл. 7. Однако с 1972 г., т. е. с тех пор как эта книга вышла в свет, был достигнут значительный прогресс. Чтобы настоящей книгой можно было пользоваться независимо, мы будем по мере необходимости кратко повторять выводы, содержащиеся в книге «Химические элементы». Работы, описанные в этой главе, были главным

образом выполнены после 1972 г. Нам будут интересовать прежде всего не точные сведения о химическом составе звезд или межзвездного газа, а ответы на следующие три вопроса:

1. Как меняется со временем полное содержание газа в галактике?
2. Как меняется со временем средний химический состав межзвездного газа?
3. Есть ли в настоящее время значительные пространственные вариации химического состава газа?

Наши рассуждения будут в большинстве случаев относиться к Галактике, поскольку для нее получена наиболее детальная информация, однако мы сделаем ряд замечаний и относительно галактик других типов. Важную информацию, касающуюся второго и третьего вопросов, даст изучение вариаций химического состава от звезды к звезде. Начнем с изложения ряда основных принципов. Будем считать, что на протяжении всей истории нашей Галактики звезды возникали из межзвездного газа. Одновременно звезды пополняли межзвездную среду за счет потерь вещества в результате взрывов или спокойного истечения. Поскольку масса, теряемая звездой, меньше или равна ее полной массе (в большинстве случаев она значительно меньше), в конечном счете любое сформировавшееся поколение звезд должно приводить к уменьшению массы межзвездного вещества; потери могли бы компенсироваться только аккрецией вещества из межгалактического пространства, которая вызывала бы увеличение полной массы Галактики. В конце концов масса, теряемая межзвездной средой, по-видимому, оказывается заключенной в плотных остатках звезд, которые можно разделить на три типа: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Хотя масса межзвездного вещества неизбежно должна уменьшаться, нигде не следует, что ее уменьшение происходит монотонно. Это легко понять, если рассмотреть следующий крайний случай: если бы с самого начала вся масса Галактики перешла в звезды, то межзвездного вещества не стало бы, однако его запасы могли бы частично восстановиться вследствие потери вещества звездами первого поколения. С помощью подобных рассуждений можно показать, что, даже если эволюция одного поколения звезд приводит в конечном счете к увеличению относительного содержания тяжелых элементов в межзвездной среде, доля массы, приходящаяся на тяжелые элементы, не обязательно должна возрастать монотонно. Ниже мы приведем обоснование этого замечания.

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ, КАСАЮЩИЕСЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Обсуждение изменения количества газа и эволюции химического состава галактик затрагивает несколько проблем. К ним относятся следующие:

1. Какой процесс приводит к образованию звезд? Каково распределение по массам образовавшихся звезд?

2. Какая доля массы данного поколения звезд возвращается в межзвездную среду, и за какое время происходит возврат вещества?

3. В какой мере вещество, теряемое звездами, перемешивается с существующим межзвездным газом?

Прокомментируем каждый из этих вопросов по порядку.

1. Распределение звезд по массам обычно описывается *начальной функцией масс* $f(M)$. Она вводится таким образом, чтобы число возникших звезд с массами между M и $M + \delta M$ было пропорционально

$$f(M) \delta M. \quad (7.1)$$

Для молодых звезд, наблюдающихся в окрестностях Солнца, функция $f(M)$ приближенно описывается *функцией Солнтера*:

$$f(M) \propto M^{-2.35}, \quad (7.2)$$

неясно однако, почему она имеет именно такой вид, и можно ли считать ее универсальной. Как мы увидим ниже, есть некоторые основания полагать, что распределение по массам звезд первого поколения нашей Галактики не описывалось функцией Солнтера.

При рассмотрении упрощенной картины галактической эволюции обычно считают, что темп звездообразования определяется плотностью ρ межзвездного газа. Ясно, однако, что даже в том случае, если бы звезды возникали самопроизвольно, такое предположение было бы слишком большим упрощением. Можно ожидать, что темпы звездообразования зависят от температуры T и химического состава газа. К тому же известно, что на образование гравитационно связанных конденсаций могут влиять как вращение, так и магнитные поля. Хотя наблюдения показывают, что звезды образуются там, где плотность газа особенно велика (что неудивительно), причем темпы звездообразования приблизительно пропорциональны квадрату плотности газа, такой упрощенный подход может служить лишь очень грубым описанием реально происходящих явлений. Действительно, как мы знаем из предыдущей главы, имеются надежно установленные факты, свидетельствующие о том, что звезды не возникают самопроизвольно там, где плотность наиболее высока. Чтобы газ пришел в такое состояние, при котором он будет сжиматься и фрагментировать, необходимо действие особых факторов. В частности, мы подчеркивали, что ключевую роль здесь, по-видимому, играет сжатие газа в спиральных волнах плотности.

2. Чтобы установить, какова скорость возвращения газа в межзвездную среду в результате потерь вещества звездами, мы должны знать, как происходит эволюция звезд различных масс и каковы полные потери вещества за все время существования звезды. Необходимо также знать, когда эта потеря вещества происходит. Последнее играет решающую роль, если мы хотим получить правильное пред-

ставление не только о массе, но и о химическом составе выброшенного газа. Как объяснялось в книге «Химические элементы», мы считаем, что нам довольно хорошо известно характерное время звездной эволюции, однако у нас нет достаточно надежных данных о том, как много вещества теряется звездами. Мы можем получить некоторые оценки и использовать их при обсуждении эволюции Галактики, однако их следует рассматривать как очень ненадежные. Со временем новые наблюдения потерь вещества звездами и дальнейшие расчеты звездной эволюции должны прояснить ситуацию, однако в ближайшие годы не приходится ожидать существенного прогресса.

3. Вещество, теряемое звездами, возвращается в межзвездную среду и может пойти на образование следующих поколений звезд. Перемешивается ли оно с газом межзвездной среды в такой мере, что можно считать результирующую газовую смесь химически однородной (по крайней мере локально), или же в пределах довольно небольших областей Галактики существует заметное различие в химическом составе газа? Далее: если темпы звездообразования действительно пропорциональны (по крайней мере приблизительно) плотности газа, возведенной в некоторую степень, и если газ в галактике не однороден по плотности, то можно ли ожидать больших различий в химическом составе газа в далеко расположенных друг от друга областях галактики? Такие различия могут возникнуть вследствие того, что там, где начальная плотность газа была выше, более интенсивное звездообразование приведет к более быстрому уменьшению количества газа и увеличению содержания тяжелых элементов по сравнению с областями, где начальная плотность была ниже. Есть наблюдения нашей и других галактик, с помощью которых можно проверить наши теоретические представления, и мы опишем их ниже.

ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИКИ В ОКРЕСТНОСТЯХ СОЛНЦА

Для начала рассмотрим сильно упрощенную модель эволюции газовой составляющей Галактики в окрестностях Солнца. Будем считать, что газ в этой области всегда хорошо перемешан, однако это не означает, что его химический состав один и тот же всюду в Галактике. Предположим далее, что лишь процессы выброса вещества из сравнительно массивных звезд играют важную роль, так как их эволюция происходит очень быстро по сравнению с любым характерным временем эволюции галактики. Иными словами, мы считаем, что газ, теряемый любым поколением звезд, почти сразу может пойти на образование последующего поколения (так называемое приближение мгновенного кругооборота). Примем также, что скорость звездообразования определяется локальной плотностью газа и описывается степенным законом и что доля газа, возвращаемая в межзвездную среду,

как и относительное содержание образовавшихся в нем тяжелых элементов, одинакова для всех поколений звезд. Скрытый смысл этих предположений в том, что начальная функция масс звезд считается одинаковой в течение всей эволюции Галактики. Мы покажем, что уравнения, решения которых будут найдены, не зависят от того, какой вид имеет начальная функция масс.

Рассматриваемая модель очень проста. После ее обсуждения мы проверим, способна ли она объяснить основные результаты наблюдений. Существует, по-видимому, три основных типа наблюдений, имеющих отношение к решению проблемы:

а. Наблюдения зависимости химического состава звезд от их возраста. Они дают информацию о том, каким образом меняется со временем химический состав газа в окрестностях Солнца.

б. Оценка числа звезд данного класса, имеющих тот или иной химический состав. Вместе с предыдущим типом наблюдений это позволяет судить о том, как скорость звездообразования меняется со временем, а в рамках предположений, сделанных в нашей модели, — оценить изменение плотности газа со временем.

в. Независимая информация о темпах обогащения тяжелыми элементами вещества, входящего в состав Солнечной системы, по изучению тяжелых радиоактивных элементов. Этот вопрос обсуждался в гл. 8 книги «Химические элементы».

Детально рассмотрев модели химической эволюции, мы опишем результаты наблюдений.

Обратимся теперь к нашей модели. Пусть масса газа, приходящаяся на единицу площади галактического диска, равна $\sigma(t)$, где t — время, прошедшее с момента образования диска. Пусть также суммарная масса звезд, образовавшихся к моменту t в элементе диска единичного сечения, составляет $\Sigma(t)$ (рис. 7.1). Если бы не происходило потери вещества звездами, то величина $\Sigma(t)$ неизбежно была бы меньше начальной массы газа $\sigma(0)$ в этой области. Поскольку вследствие потери массы звездами вещество участвует в образовании более, чем одного поколения звезд, $\Sigma(t)$ не обязательно должно быть меньше $\sigma(0)$.

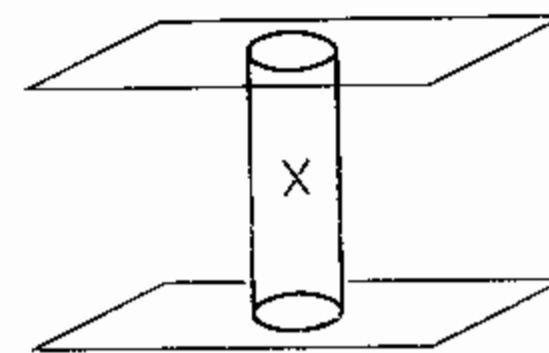


Рис. 7.1. Часть Галактики, «вырезаемая» цилиндром, центр которого совпадает с Солнцем (крестик).

Удобно ввести две новые величины: $\mu(t)$ и $S(t)$, определяемые из уравнений

$$\sigma(t) = \sigma(0) \mu(t), \quad (7.3)$$

$$\Sigma(t) = \sigma(0) S(t), \quad (7.4)$$

т. е. безразмерные величины, характеризующие плотность газа и полную массу образовавшихся звезд соответственно, причем $\mu(0) = 1$, а $S(0) = 0$. Если темпы звездообразования связаны с поверхностной плотностью газа степенной зависимостью*, то мы можем записать

$$dS/dt = C\mu^n, \quad (7.5)$$

где C и n — постоянные величины. Как мы уже упоминали, наблюдения дают основание считать, что n близко к 2. Обычно принимается, что n не превосходит 2 и что $1 \leq n \leq 2$.

По мере образования последовательных поколений звезд относительное содержание (по массе) тяжелых элементов в межзвездном веществе $Z(t)$ постепенно меняется от начального значения $Z(0)$, которое мы примем равным нулю. Пусть в каждом поколении звезд доля массы, равная α , не возвращается в межзвездную среду; эта доля заключена в остатках взорвавшихся звезд или в маломассивных звездах, время эволюции которых больше, чем возраст Галактики. Пусть далее доля вещества, равная $1 - \alpha$, сразу же возвращается в межзвездную среду, а через λ обозначим долю массы в каждом поколении звезд, которая полностью превратилась в более тяжелые элементы и была выброшена в межзвездную среду. Наше основное предположение заключается в том, что α и λ , так же как C и n , — постоянные величины. Теперь мы располагаем достаточной информацией, чтобы найти соотношение между массой газа, оставшейся к некоторому моменту времени в процессе эволюции галактик, и его химическим составом.

Сначала все вещество находилось в форме газа. При образовании каждого поколения звезд доля α вещества не возвращалась в межзвездную среду, а остальное вещество, как мы считаем, возвращалось мгновенно. Таким образом, для любого момента времени можно записать

$$\mu = 1 - \alpha S. \quad (7.6)$$

Объединяя (7.6) и (7.5), получим

$$d\mu/dt = -\alpha dS/dt = -\alpha C\mu^n = -\mu^n/t_0, \quad (7.7)$$

где $t_0 \equiv 1/\alpha C$ — величина, имеющая размерность времени, которую

* Выше мы принимали, что темпы звездообразования связаны степенной зависимостью с объемной плотностью ρ , а не с поверхностной плотностью. Если толщина диска не меняется со временем, то эти два предположения эквивалентны.

можно рассматривать как характерное время значительного изменения плотности газа. Рассмотрим теперь скорость обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами. Полное их количество изменяется по двум причинам. Во-первых, они расходуются на образование звезд наряду с водородом и гелием. Во-вторых, тяжелые элементы присутствуют в веществе, теряемом звездами. В последнем случае часть тяжелых элементов уже существовала при образовании звезды, а часть возникла в самих звездах. Полное их содержание в единице массы вещества диска в любой момент времени составляет $Z\mu$. Мы можем записать следующее уравнение:

$$\frac{d(Z\mu)}{dt} = -Z \frac{dS}{dt} + (1 - \alpha - \lambda) Z \frac{dS}{dt} + \lambda \frac{dS}{dt}. \quad (7.8)$$

Рассмотрим каждый из трех членов правой части уравнения (7.8). Первый член описывает скорость потери тяжелых элементов при звездообразовании. Второй член представляет собой скорость возвращения в межзвездную среду вещества, в котором содержание тяжелых элементов не изменилось внутри звезд; согласно приближению мгновенного кругооборота, это вещество характеризуется величиной Z , относящейся к данному моменту времени, а не к некоторому моменту в прошлом. Третий член описывает скорость возвращения в межзвездную среду вещества, которое превратилось в тяжелые элементы. Уравнение (7.8) можно переписать в следующей форме:

$$d(Z\mu)/dS = \lambda(1 - Z) - \alpha Z. \quad (7.9)$$

Теперь с помощью уравнения (7.6) можно исключить S :

$$\frac{d(Z\mu)}{dS} = \mu \frac{dZ}{dS} + Z \frac{d\mu}{dS} = -\alpha \mu \frac{dZ}{d\mu} - \alpha Z,$$

так что (7.9) принимает вид

$$-\mu dZ/d\mu \equiv dZ/d \ln(1/\mu) = \lambda(1 - Z)/\alpha. \quad (7.10)$$

Величина λ/α обычно называется выходом тяжелых элементов; она равна отношению массы образовавшихся тяжелых элементов к массе, оказавшейся «захваченной» в звездах. Обозначая $\lambda/\alpha = p$ и учитывая, что в любой момент времени в истории Галактики вплоть до настоящего момента $Z \ll 1$, мы можем с достаточной степенью точности записать (7.10) в следующем виде:

$$dZ/d \ln(1/\mu) = p.$$

Это уравнение имеет следующее решение:

$$Z = p \ln(1/\mu). \quad (7.11)$$

Для нашей упрощенной модели полученное выражение связывает содержание тяжелых элементов в межзвездном газе и массу оставшегося газа. Оно не зависит от величины n . Из уравнения (7.10) следует, что

для получения не зависящего от n решения не обязательно считать $Z \ll 1$. Величина n потребуется в том случае, если мы захотим узнать, как Z и μ меняются со временем. Проинтегрировав уравнение (7.7), получим

$$\begin{aligned} \mu &= \exp(-t/t_0) \quad \text{при } n = 1, \\ \mu^{n-1} &= 1/[1 + (n-1)t/t_0] \quad \text{при } n > 1. \end{aligned} \quad (7.12)$$

Пусть в настоящее время $t = t_1$, $Z = Z_1$ и $\mu = \mu_1$. Тогда легко использовать полученные выражения для оценки тех величин, которые можно сопоставить с наблюдениями. Рассмотрим, например, число долгоживущих звезд, масса которых настолько мала, что даже те из них, которые возникли на самых ранних стадиях эволюции Галактики, до сих пор находятся на главной последовательности. В гл. 5 книги «Звезды» было убедительно показано, что это без сомнения справедливо для всех звезд, массы которых хоть немного меньше массы Солнца. Мы можем воспользоваться нашей моделью, чтобы предсказать число звезд, величина Z которых лежит в пределах от 0 до Z_1 . Несколько грубее мы можем оценить для них среднее содержание тяжелых элементов.

Полное число звезд, содержание тяжелых элементов в которых не превосходит Z , пропорционально $S(Z)$, т.е. полной массе всех звезд, образовавшихся к моменту времени, соответствующему содержанию тяжелых элементов Z . Следовательно, полное число звезд, образовавшихся к настоящему времени, будет пропорционально S_1 . Тогда из уравнений (7.6) и (7.11) можно получить следующее выражение:

$$\frac{S(Z)}{S_1} = \frac{1 - \mu}{1 - \mu_1} = \frac{1 - \exp(-Z/p)}{1 - \exp(-Z_1/p)} = \frac{1 - \mu_1^{Z/Z_1}}{1 - \mu_1}. \quad (7.13)$$

Заметим, что полученный результат не зависит от p . Таким образом, если известны из наблюдений значения μ и Z_1 , относящиеся к настоящему моменту времени, то, исходя из нашей модели, можно предсказать, каким должно быть распределение числа долгоживущих звезд в зависимости от их химического состава, и сравнить его с наблюдениями. Более грубо оцениваемой характеристикой является среднее содержание тяжелых элементов во всех маломассивных звездах, образовавшихся к настоящему времени. Оно равно

$$\begin{aligned} \langle Z_1 \rangle &= \int_0^{S_1} Z(S) dS/S_1 = \int_0^{\mu_1} Z(\mu) d\mu/(1 - \mu) = \\ &= p \{1 - [\mu_1/(1 - \mu_1)] \ln(1/\mu_1)\}. \end{aligned} \quad (7.14)$$

Используя уравнение (7.11), записанное для настоящего момента времени, мы снова можем исключить выход тяжелых элементов p и получить следующее выражение:

$$\frac{\langle Z_1 \rangle}{Z_1} = \frac{1}{\ln(1/\mu_1)} - \frac{\mu_1}{1 - \mu_1}. \quad (7.15)$$

СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Этим мы завершим описание модели, которую можно рассматривать как самую простую из возможных моделей химической эволюции вещества в нашей окрестности Галактики. Сравним теперь полученные результаты с наблюдениями. Нельзя провести исчерпывающего сопоставления теории и наблюдений, если не известны значения n , α и p . Однако, как мы показали, уравнения (7.13) и (7.15) не содержат величин, которые в принципе мы не могли бы найти из наблюдений. Можно использовать это обстоятельство для проверки тех результатов расчетов, которые не зависят от n , α и p . Для этого нам достаточно знать величины μ_1 и Z_1 , а также иметь данные о числе звезд с различным содержанием тяжелых элементов. Мы уже отмечали в предыдущих главах, что соотношение между массой газа и звезд в окрестностях Солнца известно довольно приблизительно. Из обсуждения предела Оорта в гл. 6 мы знаем, что в окрестностях Солнца есть скрытая масса, которая, по-видимому, по крайней мере частично, существует в форме газа. Мы можем с уверенностью сказать лишь что $\mu_1 > 0,1$, причем, вполне возможно, что $\mu_1 \approx 0,2$. Как мы увидим ниже, вовсе не требуется более точного знания величины μ_1 , чтобы убедиться в плохом согласии простой модели с наблюдениями. Величину Z_1 можно определить по наблюдениям межзвездного газа и (или) недавно образовавшихся звезд. Результаты имеют значительный разброс, так что для величины Z_1 должно быть определено среднее значение; ниже мы сделаем ряд замечаний по этому поводу.

В настоящей книге мы не будем детально описывать, как определяется химический состав звезд; об этом рассказано в гл. 3 книги «Химические элементы». Рис. 7.2 иллюстрирует полученные результаты и их сопоставление с теоретической зависимостью (7.13). Две кривые

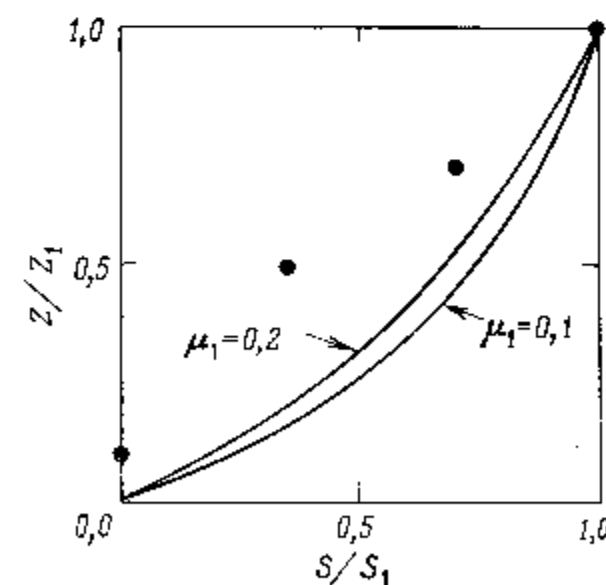


Рис. 7.2.

показывают зависимость между S и Z для двух значений μ_1 (0,1 и 0,2); кружками отмечены данные наблюдений. Видно, что теоретические кривые совсем не совпадают с данными наблюдений. В частности, наблюдения дают слишком малое число звезд с действительно низким содержанием тяжелых элементов по сравнению с теорией.

Как следует модифицировать наши представления, чтобы привести теорию в согласие с наблюдениями? Возможны два пути: первый — отказаться от некоторых упрощений в нашей модели, что неизбежно приведет к ее усложнению; второй — усомниться в надежности наблюдений. Рассмотрим сначала последнюю возможность.

До сих пор мы использовали лишь данные о полном числе звезд с содержанием тяжелых элементов меньше некоторого значения. Мы не интересовались, действительно ли звезды с низким содержанием тяжелых элементов — самые старые, что должно быть согласно нашей простой модели. Точный возраст звезд узнать нелегко, однако в пределах достижимой точности кажется весьма вероятным, что содержание тяжелых элементов медленно и монотонно возрастало на протяжении эволюции Галактики, после быстрого увеличения содержания тяжелых элементов в самом начале ее эволюции. Как схематически показано на рис. 7.3, на общий монотонный рост накладываются значительные флуктуации содержания тяжелых элементов. Разброс величин Z , относящихся к данному моменту t , можно уменьшить, если принять, что звезды со слишком высокими значениями Z в действительности моложе, а звезды со слишком низкими Z старше, чем мы считаем на величину, равную характерной ошибке измерений возрастов звезд. Однако таким путем мы не объясним разброс химического состава очень молодых звезд и «современного» межзвездного газа. Наблюдаемый разброс в оценках химического состава можно понять, если считать неверным

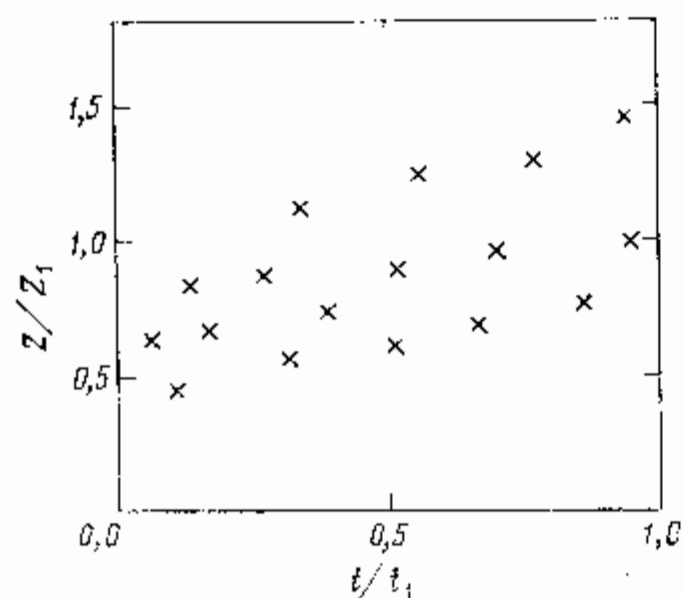


Рис. 7.3. Схематический вид зависимости содержания тяжелых элементов от возраста звезд, построенной для отдельных звезд.

предположение о том, что межзвездная среда всегда хорошо перемешана. Было выдвинуто другое предположение, согласно которому идея о том, что вещество в поверхностных слоях звезды имеет такой же химический состав, как и межзвездный газ, из которого звезда образовалась, не верна. Тогда наше сопоставление наблюдений с простой теоретической моделью окажется неправильным, и, как мы вскоре убедимся, можно будет объяснить, почему среди звезд диска так мало звезд с низким содержанием тяжелых элементов.

Изучая химический состав поверхностных слоев звезды, мы получаем одну из трех характеристик:

- 1) химический состав звезды, который она имела при рождении;
- 2) начальный химический состав звезды, измененный ядерными реакциями в ее недрах или каким-либо механизмом разделения химических элементов, связанным с внутренними движениями в звезде;
- 3) химический состав межзвездного вещества, недавно выпавшего на звезду в результате аккреции.

Чтобы можно было не учитывать те изменения химического состава, которые связаны с ядерными реакциями, мы изучаем звезды главной последовательности, в которых ядерные реакции не играют заметной роли в изменении химического состава. Внутреннее разделение химических элементов происходит почти наверняка лишь в очень небольшом числе звезд. Что касается третьей характеристики, то, как обычно считают, в большинстве случаев аккрецию вещества можно не учитывать. Она не может играть важной роли для большинства звезд, иначе у всех звезд химический состав поверхностных слоев был бы близок к химическому составу межзвездного вещества в их окрестностях и совсем не наблюдалось бы звезд диска с низким содержанием тяжелых элементов. Действительно, нам известно, во-первых, что аккреция межзвездного вещества на звезды в обычных условиях малоэффективна, а во-вторых, что многие звезды, в том числе Солнце, постоянно и очень медленно теряют вещество, благодаря чему поверхность звезды поддерживается свободной от посторонних примесей.

Представление о том, что аккреция не играет большой роли, недавно было поставлено под сомнение в связи с открытием в спиральных рукавах газовых облаков значительно более высокой плотности, чем межзвездная среда в среднем. Поскольку спиральные рукава являются волновыми образованиями, постепенно распространяющимися через всю совокупность звезд, все звезды должны периодически проходить через них, и иногда они могут попасть в очень плотные облака. Наше Солнце, по-видимому, проходит через спиральную ветвь в среднем раз в 10^8 лет. Было высказано предположение, что аккреция газа этих облаков на звезды значительно более эффективна, чем аккреция обычного межзвездного вещества. Если звезда проходит через такое облако, то химический состав ее поверхности уже не будет давать информацию о химическом составе звезды при ее рождении. Эффект должен быть наибольшим для старых звезд

с низким начальным содержанием тяжелых элементов, которые неоднократно пересекали спиральные ветви. Это объяснило бы отсутствие большого числа звезд с низким наблюдаемым содержанием тяжелых элементов.

Пока остается неясным, выдержит ли такое предположение тщательную проверку. Если звезды характеризуются обычными темпами потери вещества, то при прохождении звезды сквозь облако требуется, чтобы истечение вещества из нее было подавлено и смешилось аккрецией. Но, даже если аккреция происходит, необходимо, чтобы последующий процесс потери массы не привел к быстрому сбрасыванию накопленного вещества. Кроме того, если полная масса выпавшего вещества невелика, то конвекция в атмосферах некоторых звезд перемещает его с первоначальным звездным веществом, что уменьшит влияние аккреции на наблюдаемый химический состав. Автор считает, что аккреция не является решением проблемы, и химический состав поверхностных слоев старых звезд, по-видимому, свидетельствует об условиях, в которых происходило образование звезд.

МОДИФИКАЦИИ ПРОСТОЙ ТЕОРИИ

Обратимся теперь к вопросу о том, как следовало бы модифицировать нашу простую модель, чтобы добиться согласия с наблюдениями. Прежде всего можно сразу же усомниться в правильности предположения, что все поколения звезд имеют сходные свойства. Хотя процесс звездообразования нам еще не вполне ясен, можно сказать, что было бы сильным упрощением считать скорость звездообразования, зависящей лишь от плотности газа, а распределение по массам образующихся звезд — неизменным. Выше (стр. 165) мы уже отмечали, что как темпы звездообразования, так и начальное распределение по массам должны зависеть от температуры (или кинетической энергии случайных движений) и химического состава газа, его момента количества движения и магнитной индукции. К тому же тот факт, что молодые звезды наблюдаются преимущественно в спиральных рукавах или вблизи них, свидетельствует о том, что образование звезд вызывается прежде всего прохождением газа через спиральную волну, а не является случайным событием. Однако результирующая средняя скорость звездообразования (скажем, взятая за один период обращения галактики вокруг оси) и распределение звезд по массам не обязательно будут чувствительны ко всем этим факторам; здесь мы не будем углубляться в эту проблему.

Пытаясь «примирить» теорию с наблюдениями, принимают во внимание три фактора, которые могут иметь важное значение*:

- 1) *быстрое начальное «обогащение» тяжелыми элементами;*
- 2) *звездообразование, стимулированное присутствием металлов;*

* См. добавление автора к гл. 9. — Прим. ред.

3) аккреция вещества на галактику.

Обсудим каждый из этих факторов по порядку. Первые два, как мы увидим, в той или иной степени объясняют некоторые из наблюдаемых особенностей химического состава звезд, упоминавшихся в предыдущем разделе.

БЫСТРОЕ НАЧАЛЬНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Если наши общие представления об образовании Галактики правильны, то она сразу после своего формирования практически не содержала тяжелых элементов. Однако в настоящее время не наблюдается таких звезд диска, в которых вообще нет тяжелых элементов. Одно из возможных объяснений, приведенное выше, — «загрязнение» внешних слоев всех звезд диска из-за аккреции вещества. Предложено еще по крайней мере три объяснения. Два из них связаны с вопросом о химическом составе объектов галактического гало, таких, как шаровые звездные скопления. Оказалось, что звезды шаровых скоплений имеют гораздо более низкое значение Z по сравнению с большинством звезд диска, причем величина Z заметно меняется от скопления к скоплению, несмотря на то что они почти одного возраста. К тому же те скопления, которые образовались вблизи центра Галактики, характеризуются, как правило, более высоким значением Z , чем скопления, образовавшиеся далеко от центра. Наконец, не наблюдается звезд, полностью лишенных тяжелых элементов. В простейших теориях образования Галактики предполагается, что протогалактическое газовое облако сжималось под действием сил гравитации и что в процессе этого начального сжатия возникли субконденсации, из которых и образовались шаровые скопления. Поскольку протогалактическое облако вращалось, оно не сжалось в точку, а лишь сплюснулось и образовало диск. Если бы в процессе этого сжатия не было потерь энергии, то облако расширилось бы после сжатия до своего первоначального размера. В действительности же, как можно ожидать, когда система станет сильно сплюснутой, не сконденсировавшийся в звезды газ потеряет большое количество энергии вследствие столкновений, в результате чего образуется тонкий диск. Иное дело — протошаровые скопления. Они значительно плотнее, чем оставшийся газ, и поэтому могли бы проходить через диск без большой потери энергии, так что скопления будут заключены в значительно большем объеме Галактики, чем оставшийся газ, что и наблюдается в действительности.

Хотя такая общая картина кажется очень привлекательной, она не объясняет, как шаровые скопления приобрели тяжелые элементы и почему их особенно много в скоплениях, которые ближе к центру Галактики. Одно из возможных объяснений связано с предположением, что масса Галактики значительно больше, чем принято считать, и что

образование звезд, как уже отмечалось выше, сначала происходило в массивной короне. Переработанное вещество, теряемое звездами короны, распределение которых по массам могло быть таким же, как у современных звезд диска, а могло и сильно отличаться от него, добавилось к остальному веществу Галактики. Это произошло раньше, чем образовались шаровые скопления и звезды диска первого поколения, что и объясняет отсутствие звезд диска с очень низким содержанием тяжелых элементов и появление тяжелых элементов в звездах шаровых скоплений. Другое объяснение заключается в том, что шаровые скопления образовались не в процессе начального сжатия протогалактики. Было выдвинуто такое предположение: Галактика сжималась, оставаясь газовой до тех пор, пока в ее центральной области не произошел мощный термоядерный взрыв, при котором и возникли тяжелые элементы. Это позволяет объяснить как присутствие тяжелых элементов при образовании первых звезд, так и более высокое их содержание вблизи центра Галактики. Хотя эта гипотеза имеет свои преимущества, пока еще далеко не ясно, мог ли произойти столь мощный взрыв и произвел бы он требуемый эффект.

Третье из возможных объяснений отсутствия звезд диска с очень низким значением Z заключается в том, что первое поколение звезд диска (в модели Галактики без предварительного образования звезд короны) состояло практически полностью из массивных звезд. В этом случае первое поколение массивных звезд образовало бы тяжелые элементы, не оставив после себя маломассивных объектов с низким значением Z , которые мы могли бы в настоящее время наблюдать. Из этой модели следует, что основная масса диска должна быть в настоящее время заключена в черных дырах — остатках массивных звезд. Хотя такое предположение кажется очень искусственным, есть некоторое теоретическое обоснование этой идеи: при образовании звезд из облака, состоящего исключительно из водорода и гелия, начальное распределение звезд по массам должно быть иным, чем при образовании звезд из облака, содержащего тяжелые элементы; в первом случае с большей вероятностью рождаются более массивные звезды.

Все три упомянутых предположения объясняют, почему при образовании первых звезд диска Z не было равно нулю; приводящий к этому процесс называется *быстрым начальным «обогащением»* тяжелыми элементами. При расчетах эволюции Галактики степень «обогащения» тяжелыми элементами обычно рассматривают как свободный параметр, который не обязательно непосредственно связывать с одним из рассмотренных механизмов «обогащения».

ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ, СТИМУЛИРОВАННОЕ ПРИСУТСТВИЕМ МЕТАЛЛОВ

Образование звезд вследствие сжатия газа с большей вероятностью происходит в том случае, если газовые облака холодные, поскольку гравитационному притяжению противостоит именно кинетическая энер-

гия случайных движений внутри облака. Заметим, что присутствие тяжелых элементов даже в небольшом количестве увеличивает скорость охлаждения межзвездного газа. В любой момент времени межзвездное вещество не является абсолютно однородным по химическому составу. Мы знаем об этом из прямых наблюдений межзвездной среды, а также можем судить по различию химического состава звезд одного возраста. Возможно, звезды образуются преимущественно в тех областях, где содержание тяжелых элементов выше среднего. В этом случае можно ожидать, что среднее значение Z звезд данного возраста выше, чем межзвездной среды, из которой они возникли. Описанный процесс называют звездообразованием, стимулированным присутствием металлов; он позволяет объяснить малое число звезд с низким Z , однако если усиление звездообразования началось с небольших отличий химического состава среды от среднего, то проблема не будет полностью решена. Если тяжелые элементы отсутствуют, то никаких флуктуаций Z не возникает, если же Z очень мало, то и флуктуации также будут малыми.

АККРЕЦИЯ ВЕЩЕСТВА

Третий путь модификации простой модели химической эволюции связан с предположением, что Галактика, возможно, не является изолированной системой, и что она захватывает вещество из *межгалактической среды*.² Считается, что это вещество не прошло переработку в звездах и не содержит тяжелых элементов*. Оно может быть либо «исконным» межгалактическим веществом, сквозь которое движется Галактика, либо веществом, всегда принадлежавшим Галактике, но находившимся во внешних областях протогалактики, так что на его сжатие в диск потребовалось значительно больше времени, чем на сжатие основной массы Галактики. Легко понять, к каким качественным изменениям приводит аккреция межгалактического вещества. Если некоторое количество газа, не содержащего тяжелых элементов, смешивается с межзвездным веществом, то относительное содержание тяжелых элементов Z уменьшается. Если же одновременно с аккрецией происходят звездообразование и потери газа звездами, стремящимися увеличить Z , то аккреция вещества уменьшит скорость возрастания Z , а в случае особенно интенсивной аккреции приведет к уменьшению Z . Если в конце концов, как мы ожидаем, звездообразование прекратится, то при отсутствии аккреции Z достигнет предельного значения, а достаточно длительная аккреция вещества неизбежно приведет к уменьшению Z .

Одна из схем аккреции, которую можно предложить для объяснения дефицита звезд с низким содержанием тяжелых элементов в галактическом диске, выглядит следующим образом. Предположим, что обра-

* См. добавочную литературу к гл. 9. — Прим. ред.

зование звезд в диске началось тогда, когда лишь небольшая часть полной его массы успела сжаться к плоскости симметрии. В этом случае число звезд с очень низким содержанием тяжелых элементов было бы сравнительно небольшим, поскольку тяжелые элементы синтезированные этим первым поколением звезд, войдут в состав звезд последующих поколений, образующихся по мере возрастания массы галактического диска. Соответствующая комбинация начальной функции масс и темпов аккреции вещества диском может объяснить наблюдаемое число звезд с различными значениями Z .

Качественное (и, по-видимому, количественное) согласие с приведенными здесь результатами наблюдений можно получить в рамках многих моделей, включающих быстрое начальное обогащение тяжелыми элементами, стимулированное звездообразованием присутствием металлов и аккрецию газа из межгалактической среды. Параметры таких моделей достаточно произвольны (в разумных пределах) и не связаны непосредственно со свойствами массивных корон галактик, межгалактической среды и законами звездообразования. Эти модели можно проверить, потребовав, чтобы они приводили к правильному значению относительного содержания радиоактивных элементов в веществе Солнечной системы (см. гл. 8 книги «Химические элементы»). Ясно однако, что те данные, которыми мы сегодня располагаем, не дают нам возможности выбрать единственную модель. Обоснованное обсуждение таких моделей станет возможным лишь тогда, когда в нашем распоряжении будут более надежные теоретические и наблюдательные данные. Теория образования звезд должна дать нам более точную информацию относительно темпов звездообразования и функции масс рождающихся звезд в зависимости не только от плотности газа, но и от его температуры, химического состава и, возможно, других его свойств. От теории звездной эволюции мы ожидаем надежных оценок параметров α и p или эквивалентных им величин, которые мы могли бы использовать для более глубокого анализа. Необходимо также выяснить, обладает ли наша Галактика массивной короной и существует ли вблизи Галактики межгалактическое вещество достаточно высокой плотности.

ВАРИАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В ГАЛАКТИКАХ

Есть еще один способ, который может помочь сделать выбор между различными объяснениями химической эволюции нашей и других галактик. Это наблюдения изменений современного химического состава внутри галактик от одной области к другой с одновременными измерениями относительного количества вещества, находящегося в этих областях в форме газа и в звездах. Такие наблюдения в настоящее время становятся все более доступными. Мы не в состоянии провести детальное изучение химического состава звезд в других галактиках, поскольку эти звезды слишком слабые, однако мы можем наблюдать

газовые облака в них. Даже в случае нашей Галактики основной прогресс в изучении химического состава был достигнут благодаря исследованиям газовых облаков, поскольку свет звезд в плоскости Галактики сильно поглощается. Наблюдения, которыми мы располагаем в настоящее время, позволяют предположить, что существует значительный градиент химического состава вдоль радиуса галактик: газовые облака вблизи центров галактик содержат больше тяжелых элементов (по крайней мере некоторых) по сравнению с облаками на периферии. Следует добавить, что это изменение химического состава, вероятно, имеет плавный характер. Если последний вывод подтвердится, то он явится аргументом против гипотезы о звездообразовании, стимулированном присутствием металлов, поскольку никакое обогащение облаков металлами не могло бы привести к такой картине.

С теоретической точки зрения изменение химического состава вдоль радиуса не представляется удивительным. Чтобы показать это, расширим наш анализ, который касался только свойств звезд и газа в окрестностях Солнца. Рассмотрим сначала простую модель химической эволюции, хотя она и не в состоянии объяснить химический состав звезд, близких к Солнцу. В этой модели содержание тяжелых элементов непосредственно связано уравнением (7.11) с количеством оставшегося газа, причем величина p считается постоянной. Отсюда следует, что самое высокое содержание тяжелых элементов должно наблюдаться там, где осталось меньше газа. К сожалению, зависимость имеет логарифмический характер, поэтому ошибки наблюдений и реальный разброс измеряемых величин затрудняют получение надежных результатов. Наше предсказание основывалось на предположении, что поведение газа в каждой области Галактики не зависит от поведения газа в любой другой области. Из этого предположения мы исходили раньше, рассматривая газ в окрестностях Солнца. Необходимо исследовать эффективность процесса перемешивания газовых масс, находящихся в различных областях Галактики. Простые оценки, основанные на представлении о том, на какое расстояние проникает вещество, выброшенное при взрывах сверхновых, до полного перемешивания с межзвездной средой, и каковы наблюдаемые скорости случайных движений межзвездных облаков, показывают, что, хотя некоторое перемешивание имеет место, предположение об отсутствии перемешивания межзвездного газа, по-видимому, значительно ближе к действительности, чем предположение о его полном перемешивании.

ЭФФЕКТЫ БЫСТРОГО НАЧАЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И АККРЕЦИИ

Учет быстрого начального обогащения вещества тяжелыми элементами и аккреции может заметно повлиять на окончательные результаты. Предположим, что при движении галактики сквозь межгалактическую

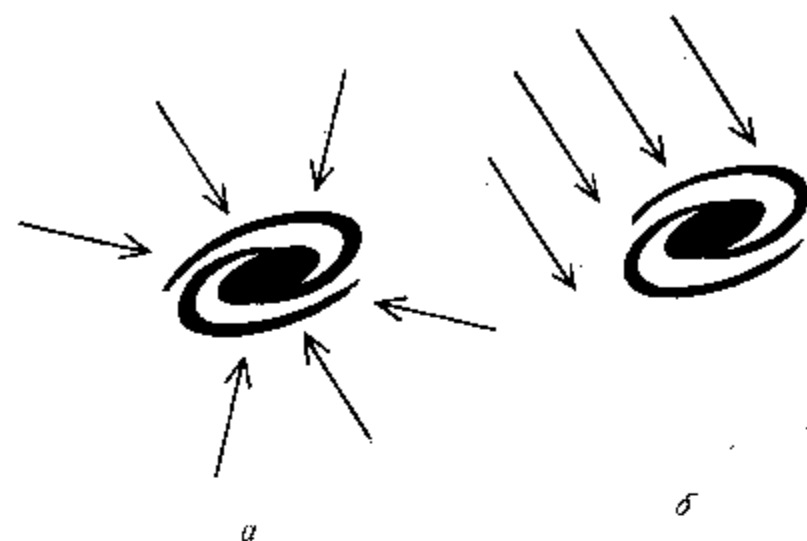


Рис. 7.4. Движение галактики в межгалактической среде: *а* — с дозвуковой скоростью, *б* — со сверхзвуковой скоростью.

среду на нее происходит аккреция газа (рис. 7.4). Скорость галактики в газовой среде может быть либо дозвуковой, либо сверхзвуковой. Если она медленно движется сквозь газ или если газ представляет собой вещество, оставшееся от протогалактики, то гравитационное поле галактики будет играть важную роль в процессе аккреции, и поэтому газ должен падать преимущественно к центру галактики, где концентрация вещества максимальна (рис. 7.4, *а*). Поскольку вблизи центра галактики доля массы, приходящаяся на несконденсировавшийся газ, по-видимому, не самая высокая, аккреция газа с низким содержанием или отсутствием тяжелых элементов может изменить градиент химического состава, предсказываемый простой моделью, или даже изменить его знак на обратный. Если же скорость галактики значительно превышает скорость звука (рис. 7.4, *б*), то гравитационное поле будет играть гораздо меньшую роль и распределение захваченного вещества по диску будет более однородным. В любом случае необходимо исследовать процесс перемешивания захваченного газа с газом галактики. При быстром начальном обогащении газа тяжелыми элементами, образовавшимися в массивной короне галактики, поверхностная плотность обогащенного газа не обязательно должна быть пропорциональна поверхностной плотности необогащенного вещества диска. Во всех трех случаях возникнут различия в химическом составе газа в различных областях галактики вследствие того, что в них относительная доля захваченного газа будет не одинаковой.

НЕМГНОВЕННЫЙ КРУГОВОРОТ ВЕЩЕСТВА

До сих пор мы исходили из приближения мгновенного круговорота вещества, согласно которому обмен веществом между звездами и межзвездной средой происходит в основном благодаря сравнительно

массивным звездам, характерное время эволюции которых значительно меньше характерного времени эволюции галактики. Ясно, что это можно рассматривать в лучшем случае как приближение, поскольку часть вещества теряется и маломассивными звездами, в которых не образуется значительного количества тяжелых элементов. Мы также считали, что все вещество, выбрасываемое звездами, остается в галактике. Сделаем несколько замечаний по поводу всех этих предположений.

Маломассивные звезды также теряют вещество на поздних стадиях своей эволюции. Так, наблюдения показывают, что планетарные туманности (рис. 7.5) образуются в результате потери вещества звездами,

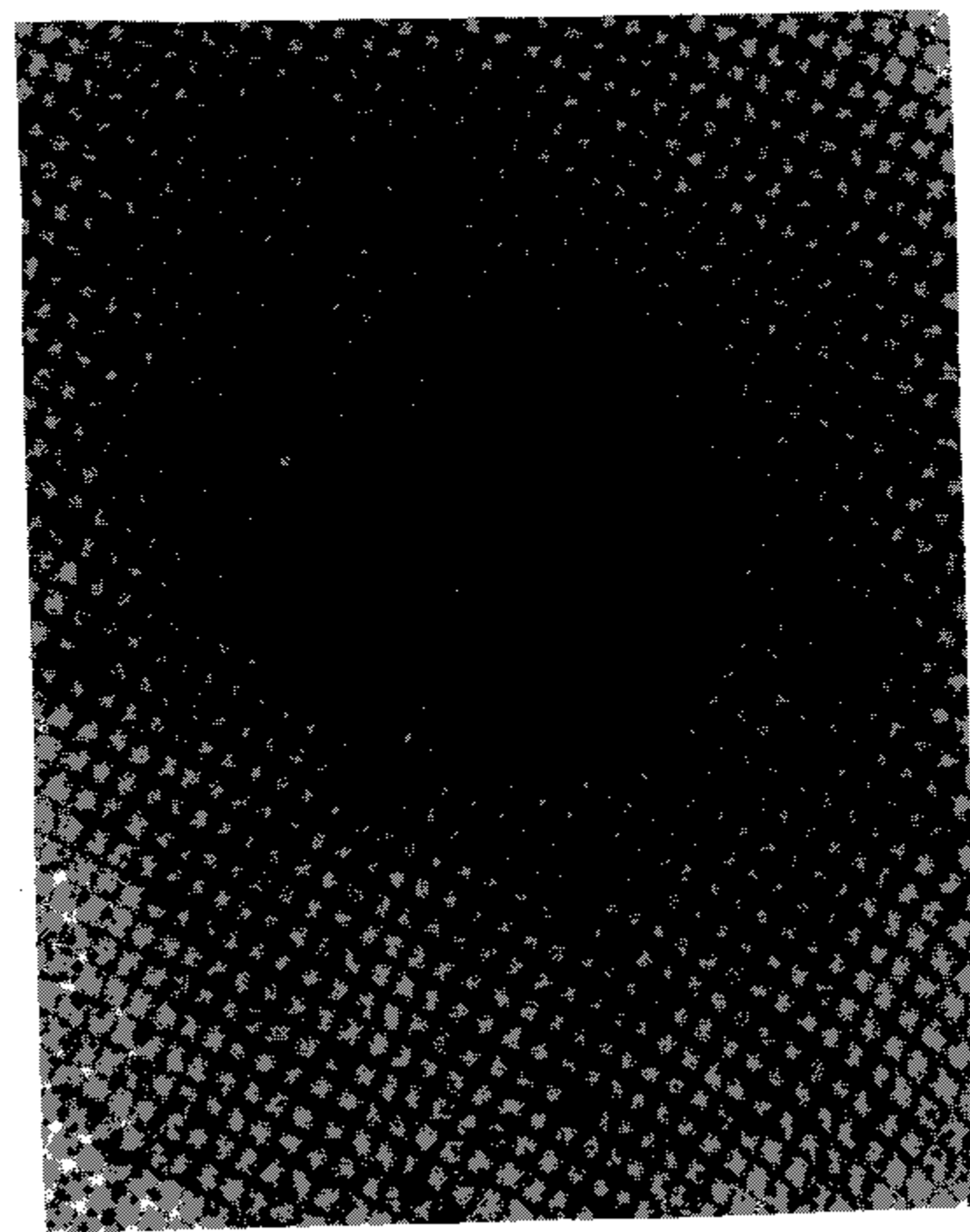


Рис. 7.5. Планетарная туманность вокруг звезды HD 148 937, негатив. (Фотография получена на 1,2-метровом телескопе Шмидта, воспроизводится с разрешения Эдинбургской королевской обсерватории.)

масса которых примерно равна массе Солнца. Изучение наблюдаемых свойств звезд шаровых скоплений в совокупности с существующими теориями звездной эволюции также позволяет утверждать (хотя и не с полной уверенностью), что звезды подобной массы могут терять более 20% вещества на сравнительно поздней стадии своей эволюции. Если функция распределения звезд по массам хоть в общих чертах похожа на функцию Солпитера (7.2), то большая часть вещества, входящего в состав любого поколения звезд, приходится на долю маломассивных объектов. Следовательно, вещество, теряемое маломассивными звездами, дает важный вклад в межзвездную среду. Разумеется, приближение мгновенного круговорота недостаточно хорошо подходит для описания такого обмена веществом. В первую очередь этот вывод относится к галактикам, когда их возраст составляет 10^{10} лет или более, поскольку при таком возрасте маломассивные звезды приближаются к завершению своей эволюции, а полная масса оставшегося межзвездного вещества невелика. Потерю массы маломассивными звездами можно учесть при построении модели эволюции Галактики, считая этот процесс эквивалентным аккреции вещества на Галактику, хотя в этом случае его уже нельзя считать совершенно не подвергшимся переработке — ведь звезды возникли из переработанного вещества. Следует добавить, что, хотя тяжелые элементы не образуются в маломассивных звездах, эти звезды могут внести важный вклад в производство ^{12}C и ^{16}O . В начале настоящей главы мы говорили о том, что относительное содержание тяжелых элементов в межзвездной среде не обязательно должно монотонно возрастать со временем, даже если отсутствует аккреция вещества. Нетрудно видеть, что потеря вещества маломассивными звездами действительно может привести к тому, что $Z(t)$ сначала будет возрастать, а затем начнет уменьшаться. Пусть большая часть вещества галактики сразу пошла на образование одного единственного поколения звезд. Тогда потеря вещества массивными звездами сначала приведет к образованию межзвездного вещества со сравнительно высоким значением Z , а когда за этим последует потеря вещества (большей частью переработанного) маломассивными звездами, то Z будет падать. Таким образом, для нарушения монотонного возрастания $Z(t)$ аккреция межгалактического вещества не обязательна. Наблюдаемое монотонное увеличение Z позволяет наложить определенные ограничения как на количество аккрецирующего вещества, так и на темпы расходования газа в Галактике.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ВЕЩЕСТВА

Изучение межзвездных молекул, описанное на стр. 63, обеспечивает нас очень ценной информацией об изотопном составе легких элементов. В некоторых молекулярных облаках удалось обнаружить такие изотопы, как дейтерий, ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O и ^{18}O . Отношения содержаний изотопов

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ и прочих меняются от одной области Галактики к другой. Это не является неожиданным хотя бы по той причине, что относительный темп образования изотопов не одинаков в звездах различных масс, а относительное число звезд, производящих наблюдаемые тяжелые элементы, не одинаково на различных расстояниях от центра Галактики. Поэтому можно ожидать, что наблюдаемые отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ будут меняться с расстоянием от центра. Теоретические модели должны предсказывать правильные значения этих отношений. Некоторые модели галактической эволюции, удовлетворяющие упоминавшимся выше требованиям, не объясняют наблюдаемого изотопного состава и поэтому должны быть отвергнуты. Аналогичное рассмотрение, основанное на детальном распределении содержания отдельных элементов, также имеет большое значение для проверки теории. Например, известно, что содержание азота по отношению к кислороду меняется как от одной области галактики к другой, так и от молодых звезд к старым в нашей Галактике. Это позволяет ввести дополнительные важные ограничения на теоретические модели.

УДЕРЖАНИЕ ГАЗА ГАЛАКТИКАМИ

Обратимся теперь к вопросу о сохранении газа в таких звездных системах, как звездные скопления или галактики. Если звездная система обладает довольно малой массой, то она вряд ли может содержать звезды более, чем одного поколения. В такой системе газ не удерживается и не происходит химической эволюции. К этой категории наверняка относятся рассеянные звездные скопления Галактики. Независимо от того, весь ли газ протоскопления перешел в звезды во время начальной вспышки звездообразования, газ либо покинет скопление вследствие нагрева ультрафиолетовым излучением массивных звезд, либо же будет выметен веществом, выброшенным с большой скоростью при взрыве сверхновой. Поскольку скорость убегания от любой звезды превышает скорость убегания из такого скопления, основная масса вещества, теряемого звездами, свободно покинет скопление. Вот почему в рассеянных скоплениях нет никаких свидетельств заметного различия в химическом составе звезд, которое указывало бы на одновременное существование нескольких поколений звезд.

Если звездная система обладает достаточно большой массой, то она способна удерживать газ. Изучение химического состава звезд в ближайших звездных системах показывает, что критическая масса, по-видимому, близка к $10^6 M_{\odot}$ или несколько выше. Масса наиболее массивных шаровых скоплений и даже карликовых галактик превышает это значение. Удерживает ли галактика газ и содержит ли она звезды различных поколений в этом случае, вероятно, критическим образом зависит от того, насколько эффективным было превращение газа в звезды первого поколения. Если большая часть газа не превратилась

в звезды немедленно, то газ будет эффективно удерживать вещество, которое выбросят звезды первого поколения. В этом случае галактика сможет сохранить значительное количество газа на протяжении большей части своей жизни, что, по-видимому, имеет место в нашей Галактике и других спиральных галактиках, а также в таких неправильных галактиках, как Большое и Малое Магеллановы Облака. Что же касается эллиптических галактик, то, как мы указывали в гл. 3, они почти лишены газа или совсем его не содержат, и в них мало молодых звезд. По-видимому, причина здесь в том, что при формировании эллиптических галактик процесс звездообразования проходил чрезвычайно эффективно, и поэтому они не смогли сохранить достаточного количества газа. Следует, однако, сделать три замечания по поводу наблюдаемого различия между эллиптическими и спиральными галактиками.

Первое из них вновь затрагивает вопрос существования массивных корон у спиральных галактик, о котором мы уже неоднократно упоминали в этой книге. Если короны существуют, то процесс звездообразования в эллиптических галактиках уже нельзя считать намного более эффективным, чем в спиральных (как это кажется на первый взгляд)*. Второе замечание касается того, что некоторые эллиптические галактики имеют яркие голубые ядра, свидетельствующие о присутствии массивных звезд главной последовательности, основной поток излучения которых приходится на голубую и ультрафиолетовую области спектра. Значит, в некоторых случаях газ все же может накапливаться в центральных областях эллиптических галактик и образовывать там молодые массивные звезды. Третье замечание относится к тому, что, как уже отмечалось в гл. 3, некоторые эллиптические галактики связаны с мощными радиоисточниками, причем энергия, питающая радиоисточник, приходит, как считают, из центра галактики. Одним из наиболее вероятных механизмов освобождения этой энергии является процесс выделения гравитационной энергии при падении газа на ядро галактики. Для этого также требуется накопление некоторого количества газа в центральных областях эллиптических галактик, причем он не должен весь фрагментировать и превращаться в звезды.

ПОТЕРЯ ГАЗА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

Выше мы отмечали, что на галактики может происходить аккреция межгалактического вещества. Возможно и иное взаимодействие между ними. Если галактика с достаточно высокой скоростью движется сквозь (сравнительно) плотную межгалактическую среду, то межгалактический газ, вместо того чтобы захватываться галактикой, будет «выметать» из нее межзвездный газ. Этот процесс, по-видимому, наиболее эффективен в скоплениях галактик. В ряде случаев рентгеновское излучение

* Имеются в виду короны, состоящие из звезд. — Прим. ред.

скоплений галактик удалось объяснить присутствием горячего межгалактического газа, плотность которого достаточно высока, чтобы он мог полностью вымести газ из некоторой части галактик. Хотя процесс выметания газа не должен играть решающей роли в появлении различия между эллиптическими и спиральными галактиками, он может быть ответствен за различия между галактиками типа S0 и обычными спиральными галактиками.

РАЗЛИЧНЫЕ ТЕМПЫ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Еще одной наблюдаемой особенностью галактик, которая рано или поздно должна найти объяснение, является различная скорость эволюции разных типов галактик, сохраняющих запасы газа. Например, в Магеллановых Облаках в форме газа содержится большая доля массы, чем в нашей Галактике, а относительное содержание тяжелых элементов в них ниже. Поэтому они выглядят моложе Галактики, хотя, по-видимому, являются ее ровесниками. Вследствие того, что Магеллановы Облака в прошлом расходовали запасы газа экономнее, чем Галактика, в настоящее время они проходят фазу звездообразования, значительно более интенсивного, чем в Галактике.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 7

Эта глава была посвящена изменению относительной массы и химического состава межзвездного газа в галактиках на протяжении их жизни. Подробное обсуждение относилось в основном к нашей Галактике, хотя был сделан ряд кратких замечаний относительно свойств других галактик. Количество газа в галактике меняется, потому что в процессе звездообразования газ превращается в звезды, а также потому что звезды некоторых типов теряют вещество. К тому же может происходить обмен веществом между галактиками и межгалактической средой. Химический состав газа меняется вследствие того, что в веществе, выбрасываемом звездами, содержание тяжелых элементов обычно выше, чем в газе, из которого звезды образовались, и чем в любом газе, захватываемом галактикой. Подробное изучение химической эволюции галактик требует знания различных процессов, происходящих в галактике, в том числе процессов звездообразования и химической эволюции в недрах звезд различных масс; необходимо также знать, сколько вещества теряется звездами и когда это происходит, каким образом потерянный звездами газ перемещивается с веществом межзвездной среды, и насколько интенсивно происходит обмен газом с межгалактической средой.

Большая часть главы была посвящена обсуждению простой модели химической эволюции вещества Галактики в окрестностях Солнца. В этой модели считается, что газ в окрестностях Солнца однороден

по химическому составу и что окрестности Солнца можно рассматривать изолированно как от остальных частей Галактики, так и от межгалактической среды. Принималось, что интенсивность процесса звездообразования зависит только от плотности газа. Предполагалось также, что важную роль играет потеря вещества лишь массивными звездами, характерное время эволюции которых значительно короче характерного времени эволюции Галактики. Эта простая модель не объясняет наблюдения, относящиеся к окрестностям Солнца. В частности, она предсказывает существование значительно большего числа звезд, очень бедных тяжелыми элементами, чем следует из наблюдений.

Заключительная часть главы посвящена модификациям этой простой теории, с помощью которых можно объяснить наблюдения, касающиеся не только окрестностей Солнца, но и других областей нашей Галактики, а также других галактик. Эти модификации включают в себя представление о быстром начальном обогащении тяжелыми элементами газа. Оно могло иметь место, например, в том случае, если в первых поколениях звезд преобладали массивные объекты, очень быстро образующие значительное количество тяжелых элементов, или если наиболее эффективный процесс звездообразования происходил в областях, где газ имеет более высокое, чем в среднем, содержание тяжелых элементов (звездообразование, стимулированное присутствием металлов). Рассматривалась также возможность аккреции вещества галактиками (падение газа извне). *Достоверная картина химической эволюции галактик в настоящее время, естественно, отсутствует, однако основные представления об этом процессе вырисовываются все отчетливее.*

Глава 8

Галактики и Вселенная

ВВЕДЕНИЕ

Изучая образование и ранние стадии эволюции галактик, мы неизбежно обращаемся к космологии — науке о строении и эволюции Вселенной как целого. Причина в том, что, как мы уже упоминали в гл. 3, нет явных указаний на существование более чем одной эпохи образования галактик, причем эта эпоха, по-видимому, наступила вскоре после начала расширения Вселенной (если, как мы считаем, доплеровские смещения линий в спектрах далеких галактик свидетельствуют о расширении Вселенной из начального сверхплотного состояния — сингулярности). Мы предполагаем, что галактики возникли из межгалактического (точнее протогалактического) газа, аналогично тому, как звезды возникли из межзвездного газа. Есть, однако, одно важное различие. Расстояние между образовавшимися галактиками вследствие расширения Вселенной непрерывно возрастает, но при этом нет оснований считать, что расширяется и сама галактика. Таким образом, если звезды рождаются в стационарной газовой системе (без учета внутренних движений в галактике), то образование галактик протекает на общем фоне расширения протогалактического газа.

Важно установить, когда впервые появились конденсации галактического масштаба — от этого зависит, какое количество гравитационной энергии выделилось при образовании галактик. В настоящее время расстояния между крупными галактиками примерно в 10–100 раз превышают их максимальные линейные размеры (по крайней мере при условии, что мы верно представляем себе распределение вещества в галактиках). Если галактики образовались на сравнительно поздней стадии эволюции Вселенной (ниже мы подробнее объясним смысл этой фразы), то сжимающиеся облака имели размеры, сильно превышающие современные размеры галактик, поэтому образование галактик было связано с выделением большого количества гравитационной энергии. Если же протогалактические конденсации существовали на самых ранних стадиях расширения Вселенной, то освобождение гравитационной энергии на тех этапах образования галактики, которые непосредственно предшествуют рождению звезд, будет меньше. В этом случае начальные размеры протогалактики могли быть даже меньше, чем современные размеры галактики, хотя, как мы увидим на стр. 199, она должна была достичь размеров, по крайней мере вдвое превышающих современные. Другой интересующий нас вопрос связан с эффективно-

стью процесса образования галактик. Привел ли этот процесс к тому, что практически все вещество Вселенной заключено в галактиках или же в настоящее время существует достаточно большое количество межгалактического вещества?

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Поскольку эта книга не по космологии, мы не будем обсуждать проблему образования и эволюции галактик, а также и интерпретацию наблюдений в рамках различных космологических моделей. Мы ограничимся лишь одной моделью — космологической моделью *горячей Вселенной*, которая, по-видимому, дает разумное объяснение ряда наблюдений, безусловно, важных для космологии. Однако следует помнить, что эту модель в лучшем случае можно рассматривать лишь как первое приближение к описанию реальной Вселенной. Она уже вкратце описана в книге «Химические элементы», здесь мы остановимся на ней несколько подробнее.

Рассматриваемая теория относится к числу тех, в которых крупномасштабная структура Вселенной описывается в рамках *общей теории относительности*. Согласно этой теории, Вселенная в среднем *однородна и изотропна*. Это означает, что ее общие свойства одинаковы во всех точках, а по отношению к любой выбранной точке — во всех направлениях. В этой релятивистской теории в общем случае нельзя утверждать, что наблюдатели, находящиеся в различных точках, смогут прийти к согласию относительно своих измерений пространства и времени. Однако можно ввести понятие *космологического времени*, одинакового для всех наблюдателей, локально покоящихся в расширяющейся Вселенной. Используя это космологическое время t , можно выразить расстояние между объектами, принимающими участие в расширении Вселенной, с помощью масштабного фактора $R(t)$ — безразмерной величины, характеризующей расстояние между ними в момент времени t .

Теория горячей Вселенной имеет несколько вариантов. В ее простейшем варианте, который здесь будет рассматриваться, содержится один свободный параметр. Во всех вариантах теории как температура, так и плотность в момент времени $t = 0$ были бесконечно большими. Впоследствии, до тех пор пока Вселенную допустимо считать достаточно однородной, чтобы можно было описывать ее одним значением температуры и плотности, эти величины уменьшаются. Различные варианты теории удобно характеризовать значением плотности материи при заданной температуре в момент, близкий к началу расширения Вселенной, скажем, при температуре 10^{10} К. В зависимости от значения плотности масштабный фактор $R(t)$ меняется со временем по одному из трех законов (рис. 8.1). В случае, соответствующем кривой a , $R(t)$ неограниченно возрастает с увеличением t , и тогда говорят,

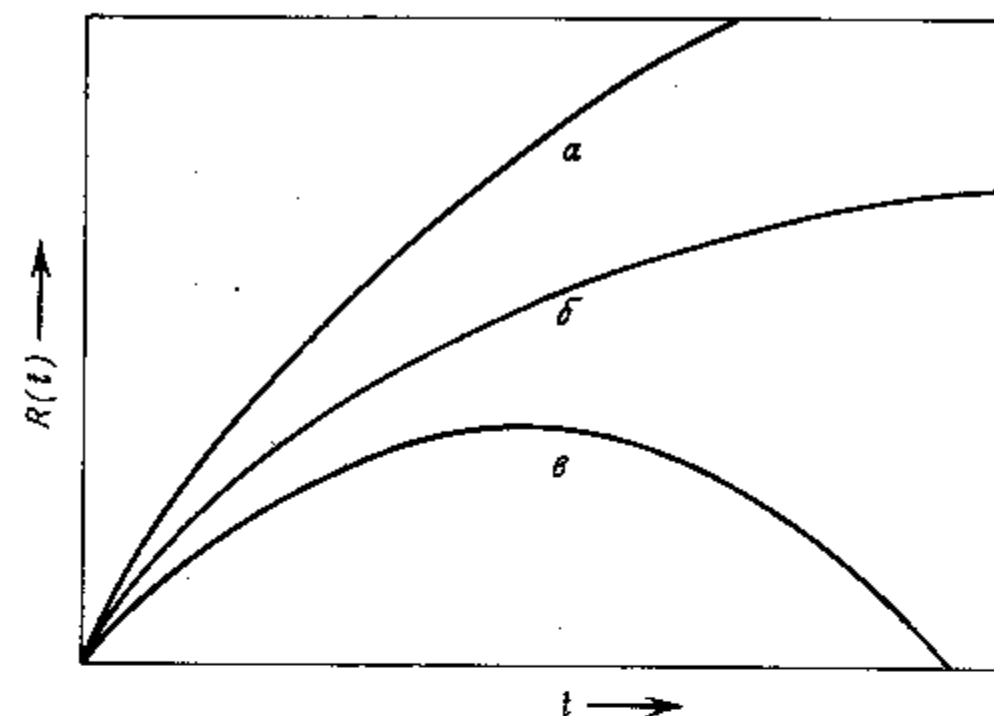


Рис. 8.1.

что «Вселенная открыта». В случае $б$, хотя $R(t)$ неограниченно возрастает при $t \rightarrow \infty$, производная $R(t)$ асимптотически стремится к нулю. Если $R(t)$ возрастает до максимального значения, а затем за конечное время уменьшается до нуля, то Вселенная *замкнута*. Кривая $в$ может описывать и осциллирующую Вселенную, в которой за первым циклом расширения и сжатия следуют аналогичные циклы, хотя полностью согласованной теории Вселенной такого типа еще не разработано. Ясно лишь, что *переход от сжатия к расширению*, если он вообще имеет место, должен происходить при очень высокой температуре и плотности, поэтому с наблюдательной точки зрения осциллирующая Вселенная может не очень сильно отличаться от замкнутой «одноцикловой» Вселенной. При любом своем цикле Вселенная способна «помнить» лишь очень немного о предыдущих циклах.

Теперь остановимся на том, можно ли из наблюдений галактик узнать, открыта или замкнута Вселенная. Модели $a - в$ представляют собой серию моделей все увеличивающейся средней плотности в любую заданную эпоху: чем выше средняя плотность, тем больше вероятность того, что взаимное гравитационное притяжение частиц вещества приведет к смене первоначального расширения на сжатие. Современное значение критической плотности, соответствующее кри-

* Здесь мы говорим о различных типах Вселенной. Разумеется, по определению существует лишь одна Вселенная. Однако из соображений удобства термин «Вселенная» используется для обозначения различных возможных ее моделей.

вой b , зависит от значения постоянной Хаббла, способы оценки которой уже рассматривались нами в гл. 1. Для критической плотности справедливо следующее выражение:

$$\rho_0 = 1,9 \cdot 10^{-30} H^2 \text{ кг/м}^3, \quad (8.1)$$

где постоянная Хаббла выражена в единицах км/(с · Мпс). Каким образом из наблюдений галактик можно узнать о том, больше или меньше критической плотности средняя плотность Вселенной?

СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ

Есть два способа оценки средней плотности вещества во Вселенной по наблюдениям галактик. Первый заключается в том, чтобы определить, какую долю от критической плотности составляет средняя плотность вещества, содержащегося во всех известных галактиках. Для этого нужно просуммировать полную массу всех галактик в данном объеме пространства и разделить полученную сумму на этот объем. В гл. 3 мы уже обращали внимание на те неопределенности, с которыми связана оценка масс галактик. Результаты расчетов, выполненных для наиболее часто принимаемых значений масс галактик, показывают, что их суммарная масса составляет лишь небольшую долю значения, которое требуется для замыкания Вселенной. Оценка средней сглаженной плотности вещества, заключенного в галактиках, дает

$$\rho_{\text{gal}} \approx 2 \cdot 10^{-32} H^2 \text{ кг/м}^3, \quad (8.2)$$

что составляет около 1% критической плотности. Это значение относится к наблюдаемому светящемуся веществу галактик и межзвездной среды в них, но, как было показано в гл. 3 и 5, оно может быть значительно меньше истинного значения ρ_{gal} . Если галактики обладают массивными коронами, то расхождение между ρ_{gal} и ρ_0 уменьшается. Однако вряд ли галактики содержат достаточно вещества для «замыкания» Вселенной. Отсюда следует, что, если только значительное количество вещества не содержится за пределами галактик, Вселенная открыта. К сожалению, в настоящее время нет ни прямых свидетельств существования межгалактической среды, ни убедительных доказательств ее отсутствия. Поэтому мы не можем сделать определенного заключения относительно количества межгалактического вещества*.

Второй способ решения проблемы заключается в том, чтобы извлечь из наблюдений галактик косвенную информацию о присутствии межгалактического вещества, способного замкнуть Вселенную.

Есть два различных эмпирических подхода. Первый связан с наблюдениями скоплений галактик, описанными в гл. 3 и 5. Мы уже отме-

* См. добавление автора к гл. 9 по поводу новых данных о горячем газе в скоплениях галактик. — Прим. ред.

чали, что полная масса многих скоплений галактик, оцененная по теореме вириала в предположении, что они являются гравитационно связанными системами, значительно превосходит оценку массы скоплений, полученную суммированием масс отдельных галактик — членов скоплений. Отсюда можно сделать один из трех выводов: либо массы отдельных галактик действительно значительно выше, чем следует из имеющихся оценок, либо внутри скоплений присутствует большое количество межгалактического вещества, либо, наконец, скопления галактик являются не гравитационно связанными системами, а результатом случайной проекции галактик на небесную сферу. Хотя иной раз мы ошибочно принимаем за скопление случайную группу галактик, не приходится сомневаться в том, что есть скопления, для которых *вириальный парадокс* действительно имеет место, и предположение о наличии межгалактической среды — наиболее привлекательный способ объяснения этого парадокса*.

Второй эмпирический подход связан с изучением расширения Вселенной и установлением шкалы расстояний (см. гл. 1). Согласно рис. 8.1, независимо от того, является ли Вселенная замкнутой или открытой, со временем ее расширение должно замедлиться, если, конечно, считать правильной теорию расширяющейся Вселенной в ее простейшем варианте. Это уменьшение скорости расширения характеризуют *параметром замедления*, который для современной эпохи определяется выражением

$$q_0 = -\ddot{R}_0 R_0 / \dot{R}_0^2. \quad (8.3)$$

Здесь R_0 , \dot{R}_0 и \ddot{R}_0 — значения масштабного фактора $R(t)$ и его первых двух производных по времени в современную эпоху. Для модели, в которой достигается критическая плотность (кривая b на рис. 8.1), $q_0 = 0,5$. Если q_0 больше, то Вселенная замкнута, если меньше, то открыта. Можно ли определить значение q_0 из наблюдений?

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА ЗАМЕДЛЕНИЯ

Мы могли бы определить q_0 из наблюдений, если бы располагали космическими эталонными источниками, которые были бы видны на больших расстояниях. Наблюдения близких галактик показывают, что существует линейная зависимость между скоростями их удаления, определенными по красному смещению, и расстояниями до них, оцененными с помощью космических эталонных источников. По мере того как мы переходим к все более и более далеким объектам, растет отклонение от линейного закона

$$v = Hr. \quad (8.4)$$

* См. добавление автора к гл. 9 и предисловие редактора перевода по поводу космологической роли нейтрино с отличной от нуля массой покоя. — Прим. ред.

Именно отклонения от этого закона можно использовать для оценки параметра замедления и, следовательно, средней плотности вещества во Вселенной в современную эпоху, поскольку отклонение зависимости от прямолинейной определяется параметром замедления (рис. 8.2). На рис. 8.2 для нескольких значений параметра замедления приведена зависимость между видимым блеском и красным смещением источника, эквивалентная зависимости между расстоянием и скоростью. Можно задать вопрос, какая кривая из этого семейства наилучшим образом согласуется с наблюдениями?

Однако попытки ответить на этот вопрос сталкиваются с двумя трудностями. Во-первых, трудно проводить достаточно надежные измерения блеска крайне далеких объектов, несмотря на то что современные телескопы и вспомогательное оборудование, значительно более эффективное, чем фотографическая пластинка, постепенно облегчают эту задачу. Недавно после более чем десятилетнего периода, в течение которого одной галактике принадлежал рекорд красного смещения, было обнаружено несколько галактик с еще большими красными смещениями. Вторая трудность связана с самой концепцией космических эталонов. Если свойства эталонного источника (например, светимость гигантской эллиптической галактики или диаметр скопления галактик данного класса богатства) не остаются постоянными, а меняются со временем, то наши измерения будут характеризовать

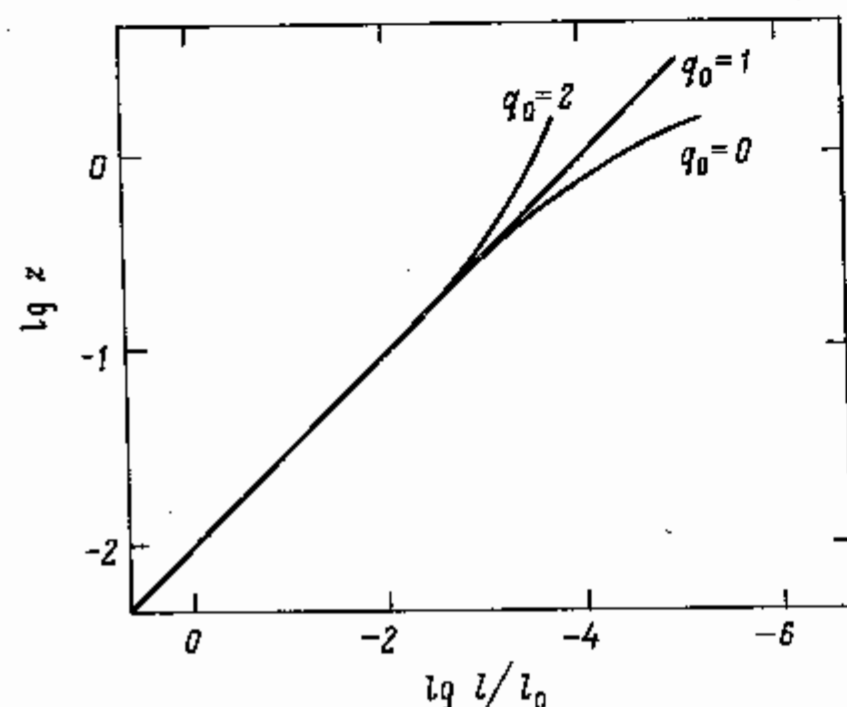


Рис. 8.2. Зависимость видимый блеск l — красное смещение z для космических эталонных источников света при трех значениях параметра замедления q_0 ; l_0 — нормирующий множитель.

не параметр замедления, а изменение свойств источника или, точнее говоря, совокупность этих двух характеристик. В этом случае нам необходимо иметь ясное теоретическое представление о том, как могут изменяться эталонные источники.

ИЗМЕНЕНИЕ СВЕТИМОСТИ ГАЛАКТИК С ВОЗРАСТОМ

Большинство наблюдений, использовавшихся до настоящего времени для оценки параметра замедления, сводились к анализу зависимости видимый блеск — красное смещение для ярчайших галактик в богатых скоплениях. Наблюдая очень далекие галактики, мы видим их такими, какими они были в далеком прошлом. Можно ли считать, что они имели тогда такую же светимость, как и гигантские эллиптические галактики, находящиеся в настоящее время недалеко от нас? Для ответа на этот вопрос необходимо знать, как меняется светимость галактики на протяжении ее жизни. В принципе можно использовать модели галактической эволюции, подобные тем, которые рассматривались в предыдущей главе, и, учитывая изменение светимости отдельных звезд в процессе их эволюции, найти суммарную светимость всех звезд галактики в различные моменты времени. На практике, как мы видели, по-видимому, достаточно предположить, что эллиптическая галактика состоит почти целиком из одного поколения звезд, и вычислить изменение полной светимости звезд этого поколения со временем.

На первый взгляд можно ожидать, что светимость галактики на ранних стадиях ее эволюции значительно больше, чем когда она достигает возраста нашей Галактики — ведь в то далекое время ее светимость была в основном обусловлена молодыми горячими звездами. В действительности проблема гораздо сложнее, поскольку менее массивные звезды, становясь в ходе эволюции красными гигантами, значительно увеличивают свою светимость, и это частично компенсирует отсутствие более массивных звезд. Если принять все эти факторы во внимание, то окажется, что галактики «в молодости» действительно имели более высокую светимость (рис. 8.3). После учета этого эффекта расстояния до далеких галактик оказываются больше, чем в том случае, если галактики считать космическими эталонными источниками. Поэтому в непосредственно измеряемую величину параметра замедления необходимо ввести соответствующую поправку. Истинное значение параметра замедления будет меньше наблюдаемого. Когда впервые обсуждался вопрос о поправках, учитывающих изменение светимости галактик со временем, казалось, что Вселенная почти наверняка открыта. Одно время даже считалось, что наблюдения совместимы лишь с отрицательным значением q_0 . Отрицательное значение означало бы, что расширение Вселенной ускоряется, а не замедляется со временем. Такой результат нельзя объяснить в рамках простых моделей расширяющейся Вселенной, описываемых здесь, в которых гравитационное притяжение обязательно должно приводить к

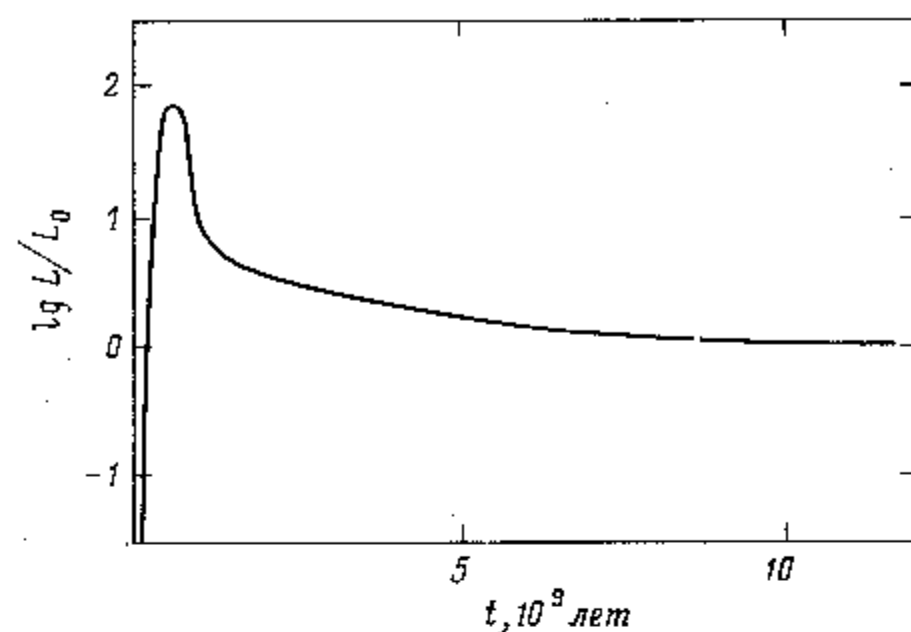


Рис. 8.3. Схематический вид зависимости светимости галактики от времени; L_0 — современная светимость.

замедлению расширения. Для объяснения таких результатов потребовалось бы введение добавочного космологического члена, описывающего силу отталкивания, ускоряющую расширение Вселенной.

РОЛЬ СТОЛКНОВЕНИЙ ГАЛАКТИК

Сравнительно недавно стало ясно, что еще один фактор может влиять на светимость самых массивных галактик скоплений, приводя к ее росту со временем. Механизм этого увеличения сводится к следующему. Галактика в скоплении движется в гравитационном поле, создаваемом всеми остальными галактиками, так же как и звезды в отдельно взятой галактике (см. гл. 4). В гл. 4 мы показали, что звезды в типичных областях внутри галактики не очень часто сталкиваются друг с другом. В частности, мы особо отметили, что за время, равное возрасту Галактики, вероятность столкновения Солнца с другой звездой чрезвычайно мала, поскольку расстояния между звездами очень велики по сравнению с их радиусами. Этого не скажешь о галактиках, особенно о членах богатых скоплений галактик. За время существования Вселенной в центральных областях богатых скоплений могло произойти большое число прямых столкновений между галактиками. А если галактики обладают массивными коронами, то столкновения должны быть особенно многочисленны. Для нашей дискуссии наиболее важно то, что в результате таких столкновений самая массивная галактика в скоплении окажется в центре масс скопления или вблизи него и будет стремиться захватить и поглотить меньшие галактики, сталкивающиеся с ней. Таким образом, наиболее массивные галактики в скоплениях со временем должны становиться еще массивнее, и светимость их, возможно, возрастает. Отсюда следует ин-

тересный вывод: газ, играющий, по-видимому, немаловажную роль во взрывах, порождающих радиогалактики, может поступать не в результате потери массы нормальными звездами, а из захваченной галактики либо непосредственно, либо путем разрушения некоторых ее объектов под действием сильного приливного взаимодействия при столкновении.

Оценка темпов, с которыми возрастают массы гигантских галактик, показывает, что они должны составлять несколько процентов за 10^9 лет, так что за время жизни галактика может заметно «прибавить в весе». Оценка соответствующего увеличения светимости еще менее надежна, и трудно сказать, достаточно ли быстро светимость возрастает с ростом массы, чтобы компенсировать изменение, связанное с упомянутой выше эволюцией звездного населения. Ясно одно: прежде чем решить, можно ли извлечь очень важную информацию о том, замкнута или открыта Вселенная, из зависимости видимый блеск — красное смещение галактик, требуется проделать большой объем работы как теоретического, так и практического характера.

ДРУГИЕ СПОСОБЫ ПРОВЕРКИ ЗАМКНУТОСТИ ВСЕЛЕННОЙ

Поскольку тема настоящей книги — галактики, а не космология, мы не будем вдаваться в детальное обсуждение других способов проверки замкнутости Вселенной, а только упомянем их для полноты картины. Их можно разделить на две группы. Первая группа связана с сопоставлением возрастов астрономических объектов со временем, прошедшим с начала расширения Вселенной. Вторая группа включает целый ряд тщательных исследований химического состава вещества во Вселенной. Рис. 8.1, а еще лучше рис. 8.4 показывают, что время,

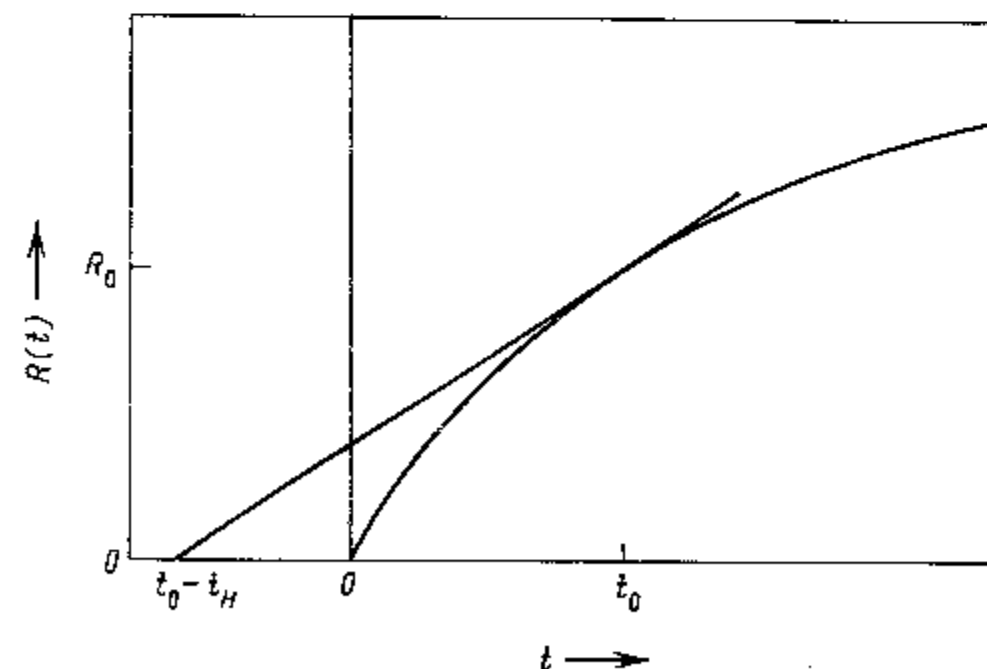


Рис. 8.4. Связь между «возрастом» Вселенной t_0 и хаббловским временем t_H .

прошедшее с начала расширения, всегда меньше хаббловского времени

$$t_H = H^{-1}, \quad (8.5)$$

определяемого по современной скорости расширения Вселенной. Чем ближе ее возраст к t_H , тем больше вероятность того, что Вселенная открыта. Как мы уже отмечали, наилучшая оценка H , принятая в настоящее время, составляет около 50 км/(с·Мпс), которой соответствует $t_H \approx 2 \cdot 10^{10}$ лет, хотя многие исследователи настаивают на значении $H = 75$ км/(с·Мпс), при котором $t_H \approx 13 \cdot 10^9$ лет. Возраст Вселенной обязательно должен быть меньше этого значения, и поэтому для согласования с теорией требуется, чтобы возраст самых старых из известных объектов также был меньше его. Реально наблюдаемый возраст этих объектов в принципе можно использовать для оценки верхнего предела q_0 . В книге «Звезды» было описано, как оценивается возраст шаровых звездных скоплений, а в книге «Химические элементы» обсуждался возраст тяжелых радиоактивных элементов в окрестностях Солнца. Было найдено, что эти возрасты равны $15 \cdot 10^9$ и $11 \cdot 10^9$ лет соответственно. Первое значение в настоящее время представляется несколько завышенным, и приемлемая оценка, выведенная из этих двух, составляет $12 \cdot 10^9$ лет, однако возможная ошибка все еще может достигать $\pm 4 \cdot 10^9$ лет.

Вторая группа способов связана с оценкой содержания гелия и дейтерия во Вселенной. Если считать, что эти элементы образовались на ранних стадиях расширения горячей Вселенной, то наблюдаемое содержание ^4He и вычисленное начальное содержание ^2H могут дать информацию о плотности вещества во Вселенной на стадии, когда в ней протекали ядерные реакции, а следовательно, и о том, замкнута ли она. Эта проблема обсуждалась в книге «Химические элементы». Содержание дейтерия наиболее чувствительно к начальным условиям, однако оно более подвержено тем изменениям, которые происходили в Галактике за время ее существования.

В настоящее время создается впечатление, что все наблюдения объясняются наилучшим образом, если считать Вселенную открытой, однако этот вывод ни в коей мере не является окончательным. Разумеется, следует подчеркнуть, что мы не знаем, действительно ли мы живем в горячей Вселенной. Все сделанные выше утверждения основывались на предположении, что теория горячей Вселенной верна, но она может быть и неверной. Например, если в конце концов окажется, что обе группы тестов или теоретический анализ приведут к непримиримым расхождениям в оценке параметра замедления, то это будет означать, что космологическая теория горячей Вселенной в принятой форме непригодна*. Приведем один пример такой

* В связи с этой проблемой см. добавление автора к гл. 9 и предисловие редактора перевода о космологической роли нейтрино с отличной от нуля массой покоя. — Прим. ред.

проверки. Теория предсказывает, что выполняется соотношение

$$\Omega_0 = 2q_0, \quad (8.6)$$

где Ω_0 — отношение средней плотности Вселенной к критической плотности. Поэтому значение средней плотности вещества, которое можно найти для окрестностей Галактики, также можно рассматривать как космологический параметр.

ОБРАЗОВАНИЕ И РАННЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Выше мы практически без доказательств продемонстрировали, как наблюдения галактик могут дать информацию о поведении Вселенной в прошлом и в будущем, а теперь вернемся к первой проблеме, упомянутой в этой главе, — проблеме образования и ранней эволюции галактик. Что могут дать наблюдения? Способны ли мы проникнуть далеко в прошлое и наблюдать новорожденные галактики? Образуются ли галактики и сегодня? Самые далекие объекты, наблюдающиеся в настоящее время, — это квазары. Их красные смещения часто лежат в диапазоне от 2 до 4. Красное смещение определяется выражением

$$\delta\lambda/\lambda = z, \quad (8.7)$$

где $\delta\lambda$ — увеличение длины волны спектральной линии по сравнению с ее лабораторным значением. При этом принимается, что красное смещение квазаров вызвано эффектом Доплера и что оно характеризует расстояние до них. Возможно, эпоха образования галактик совпадала с эпохой, характеризующейся большим распространением квазаров. Действительно, некоторые исследователи полагают, что квазар — это просто ядро чрезвычайно высокой светимости в зарождающейся галактике. Квазар выглядит как точечный источник света, и основная часть его излучения, несомненно, рождается в объеме, значительно меньшем, чем объем обычной галактики. Не исключено, что он окружен слабым гало, протяженность которого сопоставима с размерами галактики, но свечение которого не доступно наблюдению.

КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ КАК МЕРА ВРЕМЕНИ, ИСТЕКШЕГО С МОМЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТА

Согласно теории расширяющейся Вселенной, красное смещение далекой галактики или квазара непосредственно связано с их расстоянием от нас, хотя для перехода от красного смещения к расстоянию необходимо знать параметр замедления*. Кроме того, мы видим

* Для больших красных смещений не существует даже однозначного определения понятия «расстояние».

эти удаленные объекты такими, какими они были в далеком прошлом, и поэтому период в эволюции Вселенной, в который мы их наблюдаем, также непосредственно связан с красным смещением. Это позволяет использовать значения z как параметр, характеризующий время, протекшее с определенного момента в эволюции Вселенной. Так, например, мы можем утверждать, что нам известно, что активность квазаров была высока при $z = 3$, и спросить, какому красному смещению соответствует период, наиболее важный для образования галактик — большому, или меньшему, чем это значение z ? Преимущество, которое дает использование z в качестве меры времени, связано с тем, что его можно непосредственно определить из наблюдений (разумеется, эту величину можно перевести в реальный промежуток времени, если известен параметр q_0). В дальнейшем мы будем использовать z именно в указанном смысле.

Вернемся теперь к вопросу о том, когда возникли галактики. Оставляя в стороне возможность тесной связи галактик и квазаров, выясним, какие ограничения можно наложить на эпоху образования галактик. Мы считаем, что галактики образуются из протогалактического вещества путем его гравитационной конденсации. Если так, то в настоящее время они должны быть меньше, чем тогда, когда только начали зарождаться. Это означает, что эпоха образования галактик, под которой мы понимаем ту последнюю стадию быстрого сжатия протогалактики, когда формируются основные черты галактики, должна была наступить после того, как средняя плотность Вселенной стала равна современной средней плотности вещества в галактиках. Значение последней зависит от того, обладает ли типичная галактика массивной короной. Средняя плотность вещества в галактиках превышает современную среднюю плотность вещества во Вселенной по порядку величины самое большее в 10^6 раз. Однако для больших галактик и галактик с массивными коронами, а также при учете возможного существования достаточно большого количества межгалактического вещества, это отношение может снизиться до 10^4 . Согласно теории расширяющейся Вселенной, плотность вещества во Вселенной связана с красным смещением законом

$$\rho \propto (1+z)^3, \quad (8.8)$$

поэтому эпоха образования галактик не могла наступить раньше, чем при красном смещении 20–100.

Эти значения красных смещений несравненно выше, чем у квазаров. Однако есть основания предполагать, что в действительности эпоха формирования галактик наступила значительно позднее самого раннего из этих возможных сроков. Первое основание очень простое. Если протогалактика (или протозвезда) сжимается под действием гравитации, то она может перейти в равновесное состояние, характеризующееся меньшим значением радиуса, лишь тогда, когда она теряет энергию. Если бы энергия не расходовалась, то она вновь

расширилась бы до первоначального размера. Из теоремы вириала (приложение 2) мы знаем, что самогравитирующая система, находящаяся в состоянии равновесия, обладает отрицательной полной энергией, составляющей половину гравитационной потенциальной энергии. Отсюда легко найти, что радиус сферической системы, пришедшей в конце концов в равновесное состояние, составляет половину начального радиуса, с которого началось ее сжатие. Действительно, если обозначить через r_i и r_f начальный и конечный радиусы соответственно, то начальная энергия равна $-\alpha GM^2/r_i$, где α — постоянная величина, примерно равная единице*, а ее конечное значение составит $-\alpha GM^2/2r_f$ (что равно половине конечного значения гравитационной энергии). Поскольку энергия должна теряться, можно записать неравенство $r_f \leq r_i/2$. Это означает, что образование галактик должно начаться при средней плотности, составляющей менее 1/8 от современной средней плотности вещества в галактиках, что приблизительно вдвое уменьшает возможное значение z , которому соответствует эпоха образования галактик.

Второй аргумент несколько более сложен. Галактики образуются лишь в том случае, если существуют начальные флуктуации, плотность которых выше, чем в среднем во Вселенной. Поскольку, согласно предыдущему аргументу, мы должны сопоставлять с современной плотностью вещества в галактиках именно эту повышенную плотность, эпоху образования галактик нужно отнести на несколько более позднее время, которому соответствует еще меньшее значение z . Добавим, что, так как характерное время сжатия протогалактики должно быть значительно меньше характерного времени расширения Вселенной, чтобы продолжительность периода образования галактики не была слишком большой, приходится считать, что увеличение плотности было довольно значительным, возможно, на порядок величины. С учетом сделанных предположений эпоха образования галактик вряд ли наступила раньше, чем при $z = 10$; скорее всего, она наступила позднее. Поэтому не исключено, что квазары действительно связаны с образующимися галактиками и что мы можем наблюдать галактики в процессе формирования. Чтобы более определенно связать красное смещение со шкалой времени, заметим, что для Вселенной с плотностью, равной критической, красное смещение $z = 10$ соответствует времени около $4 \cdot 10^8$ лет от начала расширения; точное значение зависит от постоянной Хаббла.

Есть более детально разработанные теоретические схемы, имеющие важное значение для рассматриваемой проблемы, однако останавливаться на них в настоящей книге нецелесообразно. Мы уже отмечали, что конечный размер галактики зависит от потерь энергии при ее образовании. Прежде чем объяснить, почему галактики имеют наблюдаемые размеры и массы, необходимо детально исследовать процесс потерь

* См. приложение 2, формула (П2. 11) и далее. — Прим. ред.

энергии. Стоит сделать ряд замечаний, касающихся механизма образования галактик. Если Вселенная действительно была абсолютно однородна на самых ранних стадиях расширения, то откуда же взялись флуктуации плотности, которые привели к образованию протогалактик? Здесь следует отметить, что до сих пор еще не создано достаточно убедительной картины образования галактик. Небольшие статистические флуктуации плотности на фоне однородно расширяющейся Вселенной, по-видимому, растут не достаточно быстро для того, чтобы с их помощью можно было объяснить рождение галактик в требуемую эпоху. Вероятно, следует допустить, что Вселенная даже на ранних стадиях своего существования обладала целым спектром флуктуаций плотности, хотя некоторые исследователи считают такое предположение эквивалентным отказу от попытки искать решение проблемы. Если предположить, что действительно существовало некоторое исходное распределение флуктуаций плотности, то остается объяснить, почему сохранились и привели к рождению галактик именно флуктуации с размерами, типичными для галактик, а флуктуации других размеров затухли. Такой подход позволил продвинуться далеко вперед. Следует, разумеется, помнить, что распределение галактик по массам охватывает очень широкий диапазон (гл. 3), поэтому мы не требуем существования очень резкой границы между флуктуациями, которые выжили и которые затухли.

ОБЪЯСНЕНИЕ СПЛЮСНУТОСТИ ГАЛАКТИК

Если считать, что протогалактики, образовавшись, начинают сжиматься, порождая галактики, то необходимо объяснить, почему некоторые галактики (типов S, S0, SB и IrI) сильно сплюснуты, в то время как эллиптические галактики (типа E) сплюснуты лишь слегка. Здесь мы должны снова заметить, что если галактики обладают массивными коронами, то реальное различие окажется не столь большим, как видимое. Следует также отметить, что фотографии, сделанные с высоким разрешением, позволили обнаружить следы спиральной структуры у некоторых галактик, ранее считавшихся эллиптическими. Очевидное объяснение сплюснутости галактик связано с их вращением: сильно сплюснутые галактики вращаются быстро, а эллиптические — значительно медленнее. Мы знаем, что подобным образом хорошо объясняется форма диска нашей Галактики, однако в общем случае дело обстоит не так просто, как кажется на первый взгляд.

Если вращающаяся протогалактика сжимается и ее момент количества движения сохраняется (что должно иметь место при отсутствии влияния таких факторов, как догалактическое магнитное поле, связывающее протогалактику с веществом в ее окрестностях), то она неизбежно будет ускорять свое вращение и сплюсциваться. Рассмотрим теперь сжатие сферического облака, считая сначала, что оно остается сферическим в ходе сжатия. Если в начале сжатия облако имеет угловую

скорость ω_0 и радиус r_0 , а в процессе сжатия эти величины становятся равными ω и r , то из закона сохранения момента количества движения следует

$$\omega r^2 = \omega_0 r_0^2. \quad (8.9)$$

Сила гравитации, действующая на единицу массы в направлении на центр облака, равна GM/r^2 , где M — его масса. Чтобы удержать на круговой орбите вокруг центра облака элемент вещества, находящийся на его экваторе, требуется сила в расчете на единицу массы, равная $M\omega^2 r$. По мере сферически симметричного сжатия облака сила гравитации становится меньше величины $M\omega^2 r$, вычисленной с учетом соотношения (8.9). Это означает, что те части облака, которые находятся на экваторе или вблизи него, будут медленнее приближаться к оси вращения, чем в случае сферически симметричного сжатия, и облако начнет сжиматься, как показано на рис. 8.5.

Однако из этого вовсе не следует, что возникнет сплюснутая галактика. Энергия сжимающейся протогалактики достаточна, чтобы она вновь расширилась до начального радиуса, если только не происходит потеря энергии, когда система находится в сильно сжатом состоянии. В предыдущем разделе мы уже объяснили, что при образовании гравитационно связанной галактики обязательно происходит некоторая потеря энергии и что образовавшаяся галактика должна иметь размер, как минимум вдвое меньший, чем исходное облако. При сжатии первоначально сферически симметричного облака вдвое оно не сможет породить сильно сплюснутую галактику. Будет ли теряться энергия в количестве, достаточном для образования сильно сплюснутой галактики, зависит от того, какая часть массы системы находилась в форме диффузной газовой среды, когда галактика достигла состояния сильной сплюснутости. Если к этому времени

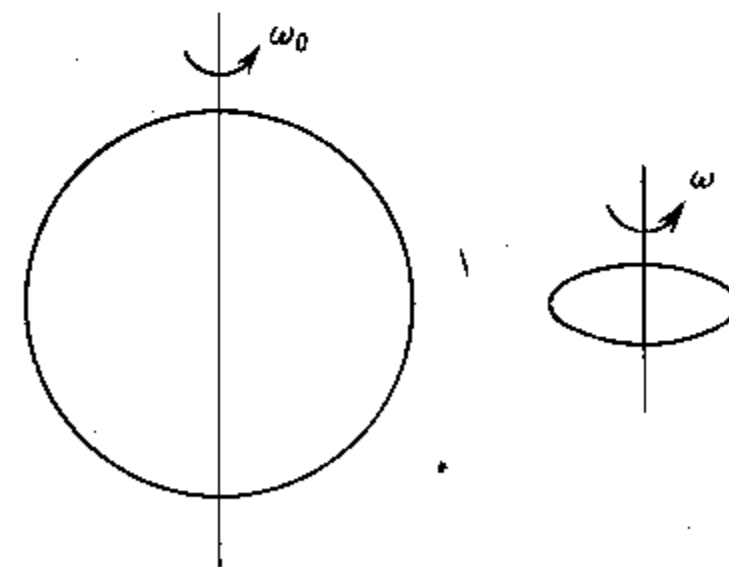


Рис. 8.5. Сплюсчивание вращающегося и сжимающегося облака.

основная масса еще приходится на газ, то столкновения между частицами газа начнут возбуждать атомы и они будут излучать энергию, покидающую систему. Этих потерь энергии может быть вполне достаточно, чтобы предотвратить расширение диска. Если же основная масса галактики будет уже находиться в форме протоскоплений и протозвезд, являющихся довольно компактными образованиями, то вероятность столкновений между массами газа сильно уменьшится, потери энергии будут значительно меньше и система расширится до размеров, лишь немного меньших первоначальных.

Таким образом, мы приходим к выводу о том, что слабая сплюснутость эллиптических галактик может быть связана не со значительно меньшей начальной скоростью их вращения, а с более эффективным процессом начального звездообразования в них по сравнению со звездообразованием в спиральных галактиках*. Считается, что шаровые звездные скопления в такой сплюснутой галактике, как наша, были достаточно плотными образованиями уже на стадии первоначального сжатия, поэтому они впоследствии заняли объем, сильно превосходящий объем диска. Сказанное выше не объясняет полностью различие между спиральными и эллиптическими галактиками, изменилась лишь формулировка вопроса. Теперь мы должны выяснить, каковы свойства протогалактического облака, которые гарантируют очень высокую эффективность процесса фрагментации и звездообразования в нем. Когда будет найден ответ на этот вопрос, то может оказаться, что вращение играет ключевую роль в появлении различия между эллиптическими и спиральными галактиками. Возможно, например, что медленное вращение и является тем фактором, который приводит к быстрой фрагментации, хотя это еще не доказано. Наблюдаемые значения масс галактик, меняющиеся от типа к типу, указывают на то, что масса галактики также может играть важную роль в процессе начального звездообразования.

КОНЕЧНЫЕ СТАДИИ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

В этой главе мы дали очень схематичное представление о происхождении галактик. В гл. 7 рассматривалась эволюция галактик, в том числе нашей Галактики, вплоть до их современного состояния. Единственным вопросом, касающимся «биографии» галактик, который мы до сих пор не затрагивали, является вопрос о конечной стадии их жизни. Ответ на него снова связан с космологией. Если Вселенная открыта или имеет плотность, равную критической, что в настоящее время представляется весьма вероятным, то эволюция галактик будет продолжаться до своего естественного конца. Если же Вселенная замкнута, то ее расширение прекратится и сменится сжатием до состояния сингулярности. В этом случае сингулярность может

* См. добавление автора к гл. 9 и предисловие редактора перевода. — Прим. ред.

быть достигнута, прежде чем галактики успеют завершить свою естественную эволюцию. При этом произойдет целый ряд интересных эффектов, которые мы кратко опишем ниже.

КОНЕЧНАЯ СТАДИЯ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК В ОТКРЫТОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Рассмотрим сначала случай открытой Вселенной. Самые маломассивные звезды галактики обладают массой около $0,1 M_{\odot}$ и светимостью около $10^{-3} L_{\odot}$; продолжительность их жизни примерно в 100 раз больше, чем у Солнца, т. е. составляет $10^{12} - 10^{13}$ лет. Поэтому в течение примерно 10^{13} лет в галактике будет оставаться некоторое число излучающих свет звезд, но в конце концов все они практически полностью угаснут. После этого основная доля массы галактики будет заключена в угасших остатках звезд: черных карликах, нейтронных звездах и черных дырах. Согласно оценкам времени между столкновениями отдельных звезд (гл. 4), на этой стадии эволюции звезды нашей Галактики в окрестностях Солнца и в аналогичных областях других галактик еще не испытают большого числа столкновений друг с другом. Значит, динамические характеристики звезд в большинстве областей галактик не очень сильно изменятся. Этот вывод не относится к звездным скоплениям и плотным центральным областям галактик. Большинство звездных скоплений рассеется, и лишь сравнительно массивные черные дыры, образованные звездами, которым не удалось «улизнуть» из скоплений, будут напоминать об их существовании. Многочисленные столкновения звезд, также приводящие к образованию массивных черных дыр, произойдут и в ядрах галактик. Будет полностью завершен и процесс поглощения одной галактикой других в богатых скоплениях галактик, о котором мы рассказывали в настоящей главе.

После этого в оставшихся галактиках наступит очень долгий период, в течение которого постепенно будут играть все большую и большую роль столкновения между звездами во всех областях галактик. Эти столкновения приведут к тому, что многие угасшие звезды вылетят из галактики во все увеличивающееся в объеме межгалактическое пространство, а оставшиеся звезды будут постепенно сливаться во все более массивные черные дыры. Но даже на этой стадии эволюции галактики не будут абсолютно «мертвыми». Например, столкновение двух звезд может сопровождаться вспышкой излучения, а звезды, приближающиеся к черной дыре, будут разрушаться приливными силами. Вещество может образовать вокруг черной дыры аккреционный диск, и новые порции газа в ходе аккреции будут излучать рентгеновские кванты, как и некоторые современные рентгеновские источники нашей Галактики, которые, как полагают, связаны с черными дырами. Хотя в такой Вселенной и не будет царить кромешная тьма, в ней все же будет довольно сумрачно.

КОНЕЧНАЯ СТАДИЯ ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК В ЗАМКНУТОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Рассмотрим теперь для сравнения эволюцию галактик на стадии сжатия замкнутой Вселенной. Пренебрегая свойствами звезд как источников теплового излучения, можно ожидать, что, по мере того как галактики будут приближаться друг к другу, пока расстояния между ними не окажутся сопоставимыми с их размерами, столкновения галактик будут играть все более важную роль и звезды, выбитые из одних галактик, будут захватываться другими. Наконец, наступит время, когда больше не останется отдельных галактик, и Вселенная будет состоять главным образом из звезд, многие из которых, как можно думать, все еще не прекратят излучать свет. По-прежнему пренебрегая тепловыми процессами, можно прийти к выводу, что Вселенная будет содержать отдельные звезды лишь до тех пор, пока расстояния между ними не станут сравнимы с их радиусами. При этом средняя плотность Вселенной составит около 10 кг/м^3 . Затем отдельные звезды перестанут существовать.

Но описанная картина совершенно неверна, поскольку тепловые процессы должны играть очень большую роль. На стадии сжатия Вселенной свет далеких объектов будет испытывать вместо красного фиолетовое смещение. Это означает, что поле излучения будет значительно более интенсивным, чем следует из упрощенного подхода, описанного выше. Задолго до того, как звезды сольются, плотность излучения станет достаточно большой, чтобы нагреть их поверхности до температур, характерных для звездных недр. Значит, звезды на этой стадии будут разрушены. Заметим, что фиолетовому смещению будет подвержено не только излучение звезд, но и вообще все излучение, испущенное ранее и не поглощенное до этого времени, а также реликтовое фоновое излучение, оставшееся от начальных стадий расширения Вселенной.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛ. 8

Происхождение и раннюю эволюцию галактик нельзя исследовать, не обращая при этом к космологическим проблемам. Помимо наблюдений галактик, имеются другие наблюдения, свидетельствующие о том, что космологическая теория горячей Вселенной в первом приближении хорошо описывает крупномасштабную структуру и эволюцию Вселенной. Поэтому нелесообразно было познакомиться с тем, как из наблюдений далеких галактик извлечь дополнительную информацию о применимости космологической теории, как использовать наблюдения для оценки свободного параметра, содержащегося в теории, и как узнать из наблюдений, каким образом и когда образовались галактики в расширяющейся Вселенной. Обсуждение первого из этих вопросов, проведенное в настоящей главе, приводит к выводу о том, что пока еще нелегко выйти из замкнутого круга.

Если бы светимости галактик не менялись со временем, то измерения видимого блеска далеких галактик позволили бы получить оценку параметра замедления или эквивалентной ему средней плотности вещества во Вселенной. Однако существует немало оснований полагать, что светимости галактик все же меняются, и лишь по прошествии некоторого времени станет ясно, что же дают наблюдения: значение параметра замедления или информацию о более ранних стадиях эволюции галактик.

В настоящей книге нельзя достаточно подробно обсудить вопрос образования галактик. Однако можно сформулировать три основных вывода. Первый заключается в том, что в простейшем варианте теории горячей Вселенной все еще существуют серьезные проблемы в объяснении образования галактик. Второй вывод сводится к тому, что эпоха интенсивного образования галактик может быть ближе к нам по времени, чем эпоха, в которой мы наблюдаем наиболее далекие квазары, поэтому образование галактик, возможно, доступно наблюдениям. Третий вывод состоит в том, что сплюснутость галактик, по-видимому, сильнее всего связана с эффективностью звездообразования в протогалактиках, хотя вращение также должно играть заметную роль.

Вопрос о конечных стадиях эволюции галактик также связан с космологией, поскольку ответ на него зависит от того, сменится или нет современное расширение Вселенной сжатием. Если этой смены не произойдет, что в настоящее время представляется наиболее вероятным, то галактики рано или поздно станут несветящимися объектами, все вещество которых будет заключено в форме черных дыр и угасших звезд малой массы. Если же начнется сжатие Вселенной, то галактики будут сталкиваться, сливаться и попадут в поле интенсивного излучения других галактик (и космического фонового излучения), подвергшегося фиолетовому смещению, еще до того, как завершится их естественная эволюция.

Заключительные замечания

На страницах этой книги мы попытались осветить идеи, являющиеся фундаментальными для понимания строения и эволюции галактик. Мы не делали слишком большого упора на точные численные значения, характеризующие те или иные свойства галактик. Очевидно, что одна из причин этого — существующие в настоящее время очень большие неопределенности в оценках. Из книги должно быть также ясно, что в этой области наблюдается быстрый прогресс. В заключительной главе мы остановимся на тех направлениях исследований, которые дают особенно противоречивые результаты, или на тех, для которых можно ожидать очень быстрого развития.

МАССЫ ГАЛАКТИК

Одна из проблем, являющаяся фундаментальной для всего содержания книги, заключается в очень большой неопределенности оценок масс и размеров галактик. Практически все оценки масс галактик следует считать лишь нижними пределами. Большие массы вещества могут быть скрыты в протяженных коронах низкой плотности. Очень важно избавиться от этой неопределенности, чтобы лучше понять свойства самих галактик и составить представление о том, как большие значения масс скажутся на вириальном парадоксе для скоплений и на вкладе галактик в полную плотность вещества во Вселенной.

Независимо от того, обладают ли галактики массивными коронами, увеличивается число аргументов, свидетельствующих в пользу того, что масса многих галактик больше, чем было принято считать. Одно из эмпирических подтверждений этого вывода заключается в следующем: когда кривые вращения для периферических областей спиральных галактик строятся по наблюдениям нейтрального водорода, скорость вращения не следует закону Кеплера $v_{\text{circ}} \propto \tilde{\omega}^{-1/2}$, который был бы справедлив, если бы практически вся масса галактики была заключена в пределах наблюдаемого радиуса. Кривая вращения располагается существенно выше кеплеровской кривой, что указывает на присутствие значительного количества вещества на больших расстояниях от центров галактик.

РАЗМЕР И МАССА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

Такие же неопределенности характерны и для параметров нашей Галактики. Хотя мы приводили принятые в настоящее время значения расстояния до центра Галактики R_0 , локальной скорости вращения Галактики $v_{\phi 0}$ и постоянных Оорта A , B , анализ методов их определения показал, что их нельзя считать очень точными.

Большинство исследователей, работающих в данной области, надеются, что погрешность этих значений составляет не более 10%, но в действительности она может достигать 20% и более. Если значения этих фундаментальных для нашей Галактики параметров будут уточнены, то одним из следствий этого явится ревизия оценок массы Галактики, заключенной в пределах R_0 . Недостаточно хорошо известно и то, есть ли у нашей Галактики корона, содержащая значительное количество вещества, хотя, как мы уже отмечали, поиски следов короны, состоящей из нормальных звезд, излучающих свет, оказались безуспешными. Корону, состоящую почти исключительно из угасших звезд, значительно труднее обнаружить.

СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

В ближайшем будущем можно ожидать быстрого прогресса в исследованиях скоплений галактик. Наблюдения далеких скоплений галактик становятся значительно более легкой задачей, чем раньше. Большие телескопы сейчас оснащаются таким вспомогательным оборудованием, с помощью которого можно обнаружить значительно более слабые галактики, а новые более совершенные измерительные машины могут определять положение и видимый блеск миллионов галактик. Это позволит провести детальные статистические исследования, касающиеся сгущивания галактик и крупномасштабной изотропии в распределении слабых галактик. В этом случае в рамках стандартной космологической теории, согласно которой большое красное смещение соответствует далекому прошлому, появляется возможность исследовать далекие, а следовательно, молодые скопления галактик и сравнивать их с близкими более старыми скоплениями. Статистические исследования наблюдаемого сгущивания галактик позволят узнать, существует ли вириальный парадокс, и требуется ли для его объяснения большое количество межгалактического вещества. Решение ряда проблем, касающихся эволюции скоплений галактик, можно осуществить теоретическим путем с помощью больших электронных вычислительных машин, например, исследовав динамическую эволюцию скопления, состоящего из нескольких сотен галактик, движущихся под действием взаимного тяготения. При вычислениях можно учесть межгалактическое вещество в скоплении. Интересно будет сравнить с наблюдениями тенденцию массивных галактик скапливаться вблизи центра скопления. Расчеты такого типа показали, что по крайней мере в некоторых скоплениях должно содержаться большое количество межгалактического вещества.

ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИИ

Хотя современное строение такой галактики, как наша, можно обсуждать и не затрагивая космологических вопросов, нельзя серьезно рассматривать образование или эволюцию галактик, не обращаясь к космологии. Значение постоянной Хаббла весьма важно для правильной оценки средней плотности Вселенной, чтобы судить о том, замкнута она или открыта, а также о времени, прошедшем с начала расширения Вселенной, если считать верной теорию расширяющейся Вселенной. Точное значение времени расширения можно найти лишь в том случае, если будет известен параметр замедления, который связан со средней плотностью вещества во Вселенной. Точность, с которой известна постоянная Хаббла, все еще составляет по крайней мере 50%, однако имевшая ранее место тенденция к уменьшению этой величины при каждой ее ревизии недавно сменилась на противоположную. Это означает, что принимаемые в настоящее время значения постоянной Хаббла близки к ее истинному значению. Поэтому нет никаких очевидных причин считать, что точное значение этой величины будет установлено не скоро.

Мы не решимся выразить такую же уверенность в отношении параметра замедления, оцениваемого путем прямых измерений, поскольку задача выбора надежных космических эталонных источников света на больших расстояниях по-прежнему остается очень трудной. Параметр замедления, или эквивалентная ему величина средней плотности материи во Вселенной, как и время, прошедшее с начала расширения, можно оценить более надежно косвенными методами. К ним относятся методы, основанные на сопоставлении наблюдаемого и расчетного химического состава галактик, и, в частности, содержания легких элементов и их изотопов.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГАЛАКТИК

Происхождение и ранняя эволюция галактик — это проблемы, возбуждающие в настоящее время очень большой интерес. Разумеется, их нельзя изучать иначе, как в рамках определенной космологической теории. В стандартной космологической теории все еще существует ряд трудностей в понимании того, как должны возникать флуктуации плотности и как они могли превратиться в галактики за допустимое время, если Вселенная с самого начала была строго однородной. Возможно, необходимо принять, что во Вселенной существовал спектр начальных флуктуаций плотности. Недавно был достигнут значительный прогресс в наших представлениях о том, как массы реальных галактик связаны с массами «потенциальных» галактик. Превратится ли флуктуация плотности в галактику и сколько ей на это потребуется времени, зависит от ее термодинамических свойств: чем эффективнее охлаждение протогалактического облака, тем больше вероятность того,

что силы гравитации заставят его сжиматься. Недавно было выдвинуто предположение, согласно которому некоторые протогалактики завершили свое превращение в галактики за время, сопоставимое с современным возрастом Вселенной, а не за время, меньшее 10^9 лет, которое обычно связывается с продолжительностью образования галактик. В таком случае, быть может, стоит поискать рождающиеся галактики даже при совсем небольших красных смещениях.*

ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛАКТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Поскольку галактики так или иначе образовались, необходимо попытаться понять, почему некоторые из них стали спиральными, а некоторые — эллиптическими. Как неоднократно подчеркивалось в этой книге, реальное различие этих типов галактик зависит от того, обладают ли спиральные галактики массивными несплюснутыми коронами. Если массивные короны отсутствуют и спиральные галактики действительно сильно отличаются от эллиптических, то напрашивается попытка связать это различие с моментом количества движения галактик, приходящимся на единицу массы. Ясно, однако, что, даже если момент количества движения играет решающую роль, различие между галактиками разных типов по крайней мере частично объясняется эффективностью процесса звездообразования, которая в свою очередь может зависеть от момента количества движения.

ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Затронутая проблема звездообразования подвела нас к обсуждению вопроса о химической эволюции галактик. В гл. 7 мы привели общепринятые представления о химической эволюции галактик, и в частности нашей Галактики, согласно которым галактики первоначально содержали лишь химические элементы, образованные в начале расширения Вселенной. Затем их химический состав менялся в результате ядерных реакций в звездах, потерь вещества звездами и последующего звездообразования. Необходимо подчеркнуть, что в этом вопросе существует довольно большая неопределенность, касающаяся как наблюдений, так и теории. Мы еще недостаточно хорошо знаем, как связаны химический состав и возраст звезд нашей Галактики, и пока нет наблюдений, указывающих на существование звездного населения с первичным химическим составом. С теоретической точки зрения необходимо иметь значительно более ясное представление о том, как темпы звездообразования связаны со свойствами газа, из которого рождаются звезды, и о потерях вещества звездами различных масс.

* См. добавление автора к гл. 9 и предисловие редактора перевода. — *Прим. ред.*

ДРУГИЕ ВАЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Выше мы рассмотрели лишь некоторые из основных направлений современных исследований, хотя можно было бы упомянуть и многие другие. Например, принято считать, что спиральные рукава галактик имеют волновую природу, а не являются «вещественным» образованием, но пока нет завершенной теории возникновения и поддержания спиральных волн плотности. Ждет своего окончательного подтверждения и вывод о том, что квазары находятся на космологических расстояниях. Еще много проблем связано с объяснением выделения энергии в квазарах и при взрывных процессах в радиогалактиках и других активных объектах, таких, как сейфертовские галактики. Наконец, следует вновь подчеркнуть, что интерпретация многих свойств галактик связана с космологической теорией. Хотя теория горячей Вселенной, по-видимому, хорошо согласуется с крупномасштабными свойствами Вселенной, она может оказаться неверной, что отразится на нашем понимании свойств галактик. *Во всяком случае, проблема строения и эволюции галактик в течение многих лет останется в числе проблем, для которых будут характерны как противоречия, так и поразжающие воображение новые достижения.*

Добавление к русскому изданию

Достижения последних трех лет, истекших с момента завершения рукописи этой книги, подтвердили выраженное в гл. 9 мнение, что потребуется время на то, чтобы полностью понять свойства галактик. Что касается нашей Галактики, то многие авторы сейчас оспаривают значения постоянных A , B , R_0 и $v_{\phi 0}$, которые я назвал общепринятыми, хотя нет единого мнения по поводу того, каковы же их правильные значения. По-видимому, подтвердилось существование массивных корон, по крайней мере у некоторых галактик. Это следует из того, что кривые вращения галактик на больших расстояниях от оси симметрии стремятся идти параллельно горизонтальной оси, что можно объяснить лишь существованием большого количества вещества на периферии галактик. Еще плохо известно, что представляет собой это вещество, хотя исследование свечения корон галактик показывает, что их звездный состав не может быть таким же, как в центральных областях.

Продолжались исследования различия в формах галактик, имеющие некоторое отношение к упоминавшемуся в тексте предположению о том, что эллиптические галактики могут быть трехосными эллипсоидами. Ранее считалось, что отличие формы эллиптических галактик от сферической связано с вращением, однако изучение внутренних движений показало, что скорость их вращения недостаточна, чтобы объяснить их наблюдаемое сжатие. Форма эллиптических галактик, по-видимому, объясняется неодинаковой амплитудой случайных скоростей звезд в проекции на различные направления. Однако нет

общепринятого мнения по поводу того, почему галактики обычно имеют форму трехосных эллипсоидов.

Возобновился интерес к проблеме происхождения первых тяжелых химических элементов в галактиках и тяжелых элементов в межгалактическом газе. Так и не удалось обнаружить звезды, полностью лишенные тяжелых элементов, а в спектре межгалактического газа в скоплениях галактик были открыты рентгеновские спектральные линии, указывающие на присутствие значительного количества тяжелых элементов. В рамках теории горячей Вселенной было предложено два объяснения этим фактам. Первое заключается в том, что тяжелые элементы образованы массивными звездами первого поколения в галактиках. Часть вещества, потерянного этими звездами, попала в межгалактическую среду, что и привело к появлению в ней тяжелых элементов, а остальная часть тяжелых элементов вошла в состав звезд последующих поколений. Согласно второму, более экстраординарному предположению, некоторые звезды образовались до появления галактик, так что тяжелые элементы были произведены в догалактических звездах, или звездах населения III. Если это действительно имело место, то галактики при своем образовании уже содержали тяжелые элементы.

Получено несколько важных результатов в разработке космологических представлений, однако их детальное обсуждение выходит за рамки настоящей книги. Один из выводов теории горячей Вселенной заключается в том, что Вселенная в настоящее время должна быть заполнена морем нейтрино, образовавшихся на ранней стадии расширения Вселенной и не исчезнувших с тех пор. Принято считать, что нейтрино — это элементарные частицы с массой покоя, равной нулю. Согласно распространенным теоретическим представлениям, хотя число нейтрино очень велико, их кинетическая энергия в настоящее время вносит лишь незначительный вклад в плотность энергии Вселенной. Недавно в двух независимых экспериментах была измерена масса покоя нейтрино, и сделан вывод, что нейтрино могут вносить наибольший вклад в полную плотность Вселенной. Это может повлиять на наши представления о том, в замкнутой или открытой Вселенной мы живем, и привести к противоречию между теорией расширяющейся Вселенной и наблюдениями. Упомянутые результаты пока еще нельзя считать надежными; я коснулся их лишь для того, чтобы показать отсутствие полной ясности в этой увлекательной проблеме.

Приложение 1

Некоторые факторы, влияющие на спектры звезд

Линия поглощения возникает в том случае, когда электрон, находящийся на определенном энергетическом уровне в атоме или ионе, поглощает излучение и переходит на более высокий энергетический уровень. Если энергии уровней равны E_1 и E_2 , то частота поглощенного кванта определяется выражением

$$E_2 - E_1 = h\nu. \quad (\text{П } 1.1)$$

Чтобы в атмосфере звезды возникали заметные линии поглощения, должны обязательно выполняться три условия:

- 1) должны существовать атомы (данного элемента);
- 2) разность энергий уровней атома данного элемента должна быть такой, чтобы он мог поглощать кванты той частоты, на которой интенсивность излучения достаточно велика;
- 3) элемент должен находиться в таком состоянии ионизации и возбуждения, чтобы соответствующие нижние уровни были заселены.

Прокомментируем п. 2 и 3. Обсудим сначала условие 3.

Если бы в звездной атмосфере имело место *локальное термодинамическое равновесие*, то как поле излучения, так и состояния возбуждения атомов и ионов определялись бы лишь температурой T атмосферы. Интенсивность излучения описывалась бы в этом случае *функцией Планка*

$$I_\nu = B_\nu(T) \equiv (2h\nu^3/c^2)/[\exp(h\nu/kT) - 1]. \quad (\text{П } 1.2)$$

Если атом (или ион) имеет энергетические уровни E_r и E_s , то при термодинамическом равновесии населенности n_r и n_s атомов в соответствующих состояниях определяются *законом Больцмана*

$$n_r/n_s = \exp(E_s - E_r)/kT. \quad (\text{П } 1.3)$$

Наконец, число атомов в единице объема, находящихся в двух последовательных состояниях ионизации n_i и n_{i+1}^* , связаны с электронной концентрацией n_e *уравнением Саха*:

$$\frac{n_{i+1}n_e}{n_i} = \left(\frac{2\pi mkT}{h^2}\right)^{1/2} \frac{2B_{i+1}}{B_i} \exp(-I_i/kT), \quad (\text{П } 1.4)$$

где I_i — энергия, необходимая для отрыва одного электрона от атома, находящегося в i -м состоянии ионизации, m — масса электрона, B_i , B_{i+1} — весовые функции для двух состояний, зависящие от энергетических уровней, на которых находятся электроны в каждом из двух ионов, и от температуры. Уравнение Саха определяется как химическим составом среды (поскольку электроны, создающие концентрацию n_e , могут появиться при ионизации

* Строго говоря, величины, входящие в (П 1.3), следует записать в виде n_{ir} , n_{is} .

любого из присутствующих элементов), так и ее плотностью (поскольку числитель левой части уравнения (П 1.4) зависит от квадрата плотности, а знаменатель — от плотности в первой степени). Легко видеть, что если при фиксированном значении T плотность возрастает, то степень ионизации уменьшается. Однако вследствие того, что температура входит в формулу в показателе экспоненты, зависимость степени ионизации от T значительно более существенна.

Реальные условия в атмосферах звезд отклоняются от локального термодинамического равновесия, однако во многих случаях отклонения незначительны и все сказанное выше остается в силе; при абсолютно строгом выполнении условий термодинамического равновесия никаких спектральных линий, конечно, не возникло бы.

Итак, пусть населенность энергетических уровней приближенно описывается уравнениями (П 1.3) и (П 1.4), а фотоны, которые могут поглотиться, имеют частоты, близкие к максимуму функции Планка (П 1.2). Заметим, что степень ионизации вещества звездной атмосферы зависит как от температуры, так и (слабо) от плотности. Поскольку плотности у поверхности звезд-гигантов ниже, чем у поверхности звезд-карликов, некоторые химические элементы в гигантах сильнее ионизованы, чем в карликах. Поэтому, даже если гиганты и карлики имеют одинаковую температуру поверхности и одинаковый химический состав, их спектры могут быть различными. Это обстоятельство позволило разработать *критерии светимости*, приведенные в табл. 2.1.

Если атом элемента имеет такие энергетические уровни, что может поглощать (к примеру) видимое излучение, то обсуждавшиеся выше условия позволяют определить, находится ли атом в таком состоянии, в котором он способен поглотить излучение. Неионизованный атом водорода может поглощать видимое излучение, если только он не находится в своем основном состоянии. Линии водорода не наблюдаются в видимой области спектров горячих звезд, в которых водород ионизован, и холодных звезд, где атомы водорода находятся в основном состоянии. Некоторые элементы не имеют спектральных линий, потенциально доступных наблюдениям в спектрах большинства звезд. Примером является бор, который оказалось очень трудно обнаружить.

Приложение 2

Теорема вириала

Рассмотрим систему, состоящую из N точечных масс, взаимодействующих друг с другом только гравитационно. Пусть i -я масса m_i имеет координаты (x_i, y_i, z_i) в момент времени t . Тогда уравнения ее движения под влиянием сил гравитации всех остальных частиц имеют вид

$$m_i \ddot{x}_i = \sum_{j \neq i} \frac{Gm_i m_j (x_j - x_i)}{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]^{3/2}} = \sum_{j \neq i} \frac{Gm_i m_j (x_j - x_i)}{r_{ij}^3},$$

$$m_i \ddot{y}_i = \sum_{j \neq i} \frac{Gm_i m_j (y_j - y_i)}{r_{ij}^3}, \quad m_i \ddot{z}_i = \sum_{j \neq i} \frac{Gm_i m_j (z_j - z_i)}{r_{ij}^3}. \quad (\text{П } 2.1)$$

Здесь точки означают дифференцирование по времени, суммирование проводится по всем частицам, кроме i , а r_{ij} — расстояние между массами m_i и m_j . Умножим теперь первое из уравнений (П 2.1) на x_i , второе — на y_i , третье — на z_i и просуммируем уравнения по всем частицам.

Рассмотрим сначала левую часть результирующего уравнения.

$$\sum_i m_i (x_i \ddot{x}_i + y_i \ddot{y}_i + z_i \ddot{z}_i) = \frac{d}{dt} \sum_i m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) \quad (\text{П 2.2})$$

Второй член правой части (П 2.2) отличается лишь знаком от величины $2T$, где T — полная кинетическая энергия системы. Первый член можно переписать в следующем виде:

$$\sum_i m_i (x_i \ddot{x}_i + y_i \ddot{y}_i + z_i \ddot{z}_i) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sum_i m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) \quad (\text{П 2.3})$$

Введем обозначение

$$I \equiv \sum_i m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) \quad (\text{П 2.4})$$

Назовем эту величину моментом инерции системы; она представляет собой сумму трех главных моментов инерции.

Рассмотрим теперь правую часть уравнения, получившегося в результате суммирования. Взаимодействие любых двух частиц описывается членом $Gm_i m_j (x_i - x_j)/r_{ij}^3$ и соответствующим ему членом $Gm_i m_j (x_j - x_i)/r_{ij}^3$. Их сумма равна $-Gm_i m_j (x_i - x_j)^2/r_{ij}^3$. Если сложить это выражение с аналогичными выражениями, записанными для y_i и y_j , z_i и z_j , то числитель будет содержать величину r_{ij}^2 , которая сокращается с аналогичной величиной в знаменателе. Таким образом, полный вклад от взаимодействия двух частиц с массами m_i и m_j окажется равным

$$-Gm_i m_j / r_{ij}.$$

Эта величина представляет собой энергию гравитационного взаимодействия двух частиц. Суммирование по всем парам частиц приведет теперь к выражению

$$-\sum_{i,j \neq i} Gm_i m_j / r_{ij} \equiv \Omega \quad (\text{П 2.5})$$

где Ω — полная гравитационная энергия системы.

С помощью соотношений (П 2.2) и (П 2.5) уравнение, получившееся в результате суммирования, можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T + \Omega \quad (\text{П 2.6})$$

Это и есть запись теоремы вириала в общем виде для системы частиц, параметры которой меняются со временем. Если же интегральные характеристики системы не зависят от времени, то левая часть уравнения (П 2.6) будет равна нулю, и теорема вириала примет вид

$$2T + \Omega = 0 \quad (\text{П 2.7})$$

Это уравнение часто использовалось в настоящей книге; из него следует, что полная энергия E системы отрицательна и равна

$$E \equiv T + \Omega = \Omega/2 \quad (\text{П 2.8})$$

ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРЕМЫ ВИРИАЛА ДЛЯ СФЕРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Гравитационная потенциальная энергия сферически симметричной системы

$$\Omega = -\alpha GM^2/R, \quad (\text{П 2.9})$$

где величина α зависит от распределения массы в системе; ее значение обычно близко к единице. Мы имеем также выражение для кинетической энергии:

$$T = M \langle v^2 \rangle / 2, \quad (\text{П 2.10})$$

где угловые скобки означают соответствующее среднее значение. Совокупность уравнений (П 2.7), (П 2.9) и (П 2.10) для сферической системы, находящейся в состоянии равновесия, показывает, что средняя скорость частиц близка к скорости убегания, которая равна

$$v_{\text{esc}}^2 = 2GM/R. \quad (\text{П 2.11})$$

Если сферическая самогравитирующая система, первоначально находившаяся в состоянии покоя, сжимается и приходит в конечном счете к состоянию, для которого теорема вириала имеет вид (П 2.7), то ее радиус должен при этом быть меньше или равен половине начального радиуса. Действительно, если не происходит потери энергии, то мы можем приравнять начальную энергию системы (полностью обусловленную гравитацией) энергии в конечном состоянии, равной половине соответствующей гравитационной энергии. Таким образом, будем иметь

$$\alpha GM^2/R_i = \alpha GM^2/2R_f \quad (\text{П 2.12})$$

В действительности энергия, вероятнее всего, теряется, и поэтому левая часть уравнения будет меньше правой (поскольку гравитационная энергия отрицательна). Поэтому мы получаем

$$R_f \leq R_i/2 \quad (\text{П 2.13})$$

(Это доказательство не является абсолютно строгим, поскольку неочевидно, что величина α останется неизменной, однако для большинства случаев полученный результат верен.)

Приложение 3

Гравитационные поля, создаваемые сферами и эллипсоидами

Здесь мы приводим некоторые результаты, использованные в гл. 5. Доказательства большинства из них выходят за рамки настоящей книги, и мы не будем их приводить. Их можно найти в книгах, посвященных данной теме, например, в книге *W. D. MacMillan. The Theory of the Potential*, Dover Publ., New York.

Для нас важны следующие выводы:

1. Если мы имеем тело со сферически симметричным распределением массы, центр которого находится в начале сферической системы координат $r = 0$, то

а) на расстоянии $r = r_1$ внутри тела не ощущается гравитационного влияния со стороны вещества, расположенного за пределами радиуса r_1 ; на этом расстоянии от центра гравитационное поле такое же, как если бы вся масса внутри r_1 находилась в точке $r = 0$;

б) на расстоянии $r = r_0$ за пределами тела гравитационное поле, такое же, как если бы вся масса тела была сосредоточена в его центре ($r = 0$).

2. Если тело состоит из концентрических эллипсоидальных слоев с одинаковыми эксцентриситетами и постоянной плотностью в пределах тонкого слоя, то

а) в данной точке эллипсоидального слоя не ощущается действия гравитационного поля внешних (по отношению к этой точке) эллипсоидальных слоев;

б) на достаточно большом расстоянии от тела (как и от тела произвольной формы и с произвольным распределением массы) гравитационное поле, такое же, какое было бы, если бы вся масса тела была сосредоточена в его центре масс.

3. Если сплюснутый эллипсоид однороден по плотности, имеет массу M_{sph} , большую полуось a , эксцентриситет e и форму, описываемую уравнением

$$(\tilde{\omega}^2/a^2) + [z^2/a^2(1 - e^2)] = 1, \quad (П 3.1)$$

то гравитационное поле в плоскости эллипсоида будет характеризоваться величиной

$$g_{\tilde{\omega}} = -(3GM_{sph}/2a^3e^3)(\beta - \sin\beta \cos\beta), \quad (П 3.2)$$

где

$$\sin\beta = e \quad (П 3.3)$$

внутри эллипсоида и

$$\sin\beta = ae/\tilde{\omega} \quad (П 3.4)$$

за его пределами.

4. Если тело состоит из концентрических эллипсоидальных слоев с одинаковым эксцентриситетом e , и если плотность слоя равна $\rho(\alpha)$, где α — его большая полуось, то гравитационное поле в экваториальной плоскости эллипсоида опи-

сывается выражением

$$g_{\tilde{\omega}} = -4\pi G(1 - e^2)^{1/2} \int_0^{\tilde{\omega}} \frac{\rho(\alpha)\alpha^2 d\alpha}{\tilde{\omega}(\tilde{\omega}^2 - \alpha^2 e^2)^{1/2}} = -G \int_0^{\tilde{\omega}} \frac{dM(\alpha)}{\tilde{\omega}(\tilde{\omega}^2 - \alpha^2 e^2)^{1/2}}. \quad (П 3.5)$$

Эта формула применима как для областей внутри, так и вне тела, хотя при $\alpha > a$, где a — большая полуось тела, подынтегральное выражение обращается в нуль.

Большинство книг по астрономии содержит главы, посвященные галактикам, или материал, относящийся к теме настоящей книги. Однако некоторые из недавно полученных результатов, приведенных здесь, нельзя найти ни в одной из рекомендуемых книг.

К книгам, имеющим скорее описательный, чем строгий математический характер, относятся следующие:

W. Baade. Evolution of Stars and Galaxies. ed. C. Payne-Gaposchkin, MIT Press.

(Имеется перевод: Бааде В. Эволюция звезд и галактик. — М.: Мир, 1966.)

B. J. Bok, P. E. Bok. The Milky Way, 4th ed. Harvard. (Имеется перевод:

Бок Б., Бок П. Млечный Путь. — М.: Мир, 1978.)

S. Mitton. Exploring the Galaxies, Cambridge. (Имеется перевод: Миттон С. Исследование галактик. — М.: Мир, 1980.)

H. Shapley. Galaxies, 3rd ed., revised by P. W. Hodge, Harvard. (Имеется перевод: Шепли Х. Галактики. — М. — Л.: Гостехиздат, 1947.)

История открытия красных смещений галактик и определения шкалы расстояний во Вселенной описана в книге

E. P. Hubble. The Realm of the Nebulae, Dover.

Много отличных фотографий галактик и общие принципы классификации галактик можно найти в атласе

A. Sandage. The Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Inst. of Washington.

Среди учебников, посвященных галактикам, можно отметить следующие:

J. Lequeux. Structure and Evolution of Galaxies, Gordon and Breach.

D. Mihalas, P. M. Rautiy. Galactic Astronomy, Freeman.

L. Spitzer, Jr. Physical Processes in the Interstellar Medium, Wiley.

Книга Михаласа и Рутли посвящена нашей Галактике, а книга Спитцера — межзвездной среде. Для меня книга Михаласа и Рутли оказалась наиболее полезной в моей преподавательской работе и при подготовке настоящей книги. Книга Спитцера — пересмотренное издание его более ранней работы

L. Spitzer, Jr. Diffuse Matter in Space, Interscience.

Менее трудной для чтения и содержащей большое количество материала о галактиках является книга

A. Unsöld. The New Cosmos, Springer, 2nd ed. translated by R. C. Smith.

Перечислим четыре книги по космологии:

G. Gamow. The Creation of the Universe, Mentor.

P. J. E. Peebles. Physical Cosmology, Princeton. (Имеется перевод: Пиблс П. Физическая космология. — М.: Мир, 1975.)

D. W. Sciama. Modern Cosmology, Cambridge. (Имеется перевод: Шама Д. Современная космология. — М.: Мир, 1973.)

S. Weinberg. The First Three Minutes, André Deutsch.

Гамов дает довольно красочное, но несколько устаревшее с современной точки зрения описание теории расширяющейся Вселенной, а в книге Вейнберга дан современный анализ тех же проблем. Книга Пиблса рассчитана на подготовленного читателя, а книга Шама почти не содержит математических выкладок.

Настоящую книгу дополняют две книги, написанные автором и выпущенные в серии Wykeham:

R. J. Tayler, A. S. Everest. The Stars: Their Structure and evolution. (Имеется перевод: Тейлер Р. Структура и эволюция звезд. — М.: Мир, 1973.)

R. J. Tayler, A. S. Everest. The Origin of the Chemical Elements. (Имеется перевод: Тейлер Р. Происхождение химических элементов. — М.: Мир, 1975.)

Многие учебные пособия для колледжей содержат отдельные главы, посвященные вопросам звездной эволюции, галактикам и космологии. Недавно выпущена очень своеобразная книга

F. Hoyle. Astronomy and Cosmology. A Modern Course. Freeman.

Журнал Scientific American регулярно печатает очень хорошо написанные полупопулярные статьи по астрономии. Недавно вышли два сборника таких статей: New Frontiers in Astronomy, Readings from Scientific American with introductions by O. Gingerich, Freeman.

Cosmology + 1, Readings from Scientific American with introduction by O. Gingerich. Freeman.

Много очень подробной информации о свойствах галактик содержится в статье

A. Sandage, M. Sandage, J. Kristian. Galaxies and the Universe, Stars and Stellar Systems, Vol. 9, Chicago.

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие к русскому изданию	8
Предисловие	9
Обозначения	10
Численные значения	12
Глава 1. Введение	13
Открытие галактик	13
Чем галактики отличаются от звезд	15
Эволюция галактик	16
Как узнали строение Галактики	17
Распределение шаровых скоплений	20
Межзвездные газ и пыль	20
Другие галактики	21
Расширяющаяся Вселенная	23
Постоянная Хаббла	24
Шкала расстояний во Вселенной. Космические эталонные источники	24
Цефеиды	25
Метод совмещения главных последовательностей скоплений	26
Следующие шаги в построении шкалы расстояний	28
Эволюция свойств галактик	31
Краткое содержание книги	32
Глава 2. Наблюдения Галактики	34
Введение	34
Свойства звезд	34
Спектральные классы	35
Критерии светимости	36
Зависимость масса — светимость и возрасты звезд	38
Положение и движение Солнца	40
Локальная система отсчета скоростей	42
Движение Солнца и случайные скорости звезд	42
Звезды с большими пространственными скоростями	43
Зависимость химического состава звезд от их возраста и положения в Галактике	44
Вращение Галактики	46
Вращение Галактики в окрестностях Солнца	47

Постоянные Оорта	48
Определение постоянных Оорта	50
Межзвездная среда	52
Линия 21 см	55
Вращение Галактики по радионаблюдениям	56
Кривая вращения Галактики	58
Распределение газа	60
Межзвездная пыль	62
Поляризация света звезд	62
Межзвездное магнитное поле и космические лучи	63
Межзвездные молекулы	63
Краткое содержание гл. 2	65
Глава 3. Свойства галактик	67
Введение. Классификация галактик по Хабблу	67
Эллиптические (сфероидальные) галактики	68
Спирали, спирали с перемычкой и линзовидные галактики	70
Неправильные галактики	72
Возможные объяснения классификации Хаббла	74
Как наблюдают вращение спиральных галактик	77
Вращение галактик и спиральная структура	79
Свойства галактик различных типов	80
Массы галактик	80
Зависимость масса — светимость для галактик	82
Распределение галактик во Вселенной. Местная группа галактик	84
Скопления галактик	86
Крупномасштабное распределение галактик	88
Расширение Вселенной	89
Занимает ли наша Галактика особое положение во Вселенной?	89
Пекулярные галактики и квазары	90
Квазары	90
Линии поглощения в спектрах квазаров	91
Радиогалактики	93
Энергия радиоисточников	94
Другие галактики с активными ядрами. Сейфертовские галактики	96
Источник энергии активных ядер галактик	97
Краткое содержание гл. 3	99
Глава 4. Звездная динамика	101
Введение	101
Функции распределения	102
Распределение Максвелла	102
Столкновения звезд	103
Как записывается функция распределения	106
Интегралы движения звезды	108
Интегралы движения в сферических и осесимметричных галактиках	108
Изолирующие и неизолирующие интегралы	110
Третий интеграл и Галактика	112

Функция распределения для звездных систем с высокой пространственной плотностью звезд	112
Движение отдельных звезд в Галактике	113
Эпициклическое движение	115
Движение перпендикулярно плоскости Галактики	117
Поле гравитации в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики	118
Амплитуда колебательных движений Солнца	120
Резонансные орбиты	121
Краткое содержание гл. 4	121
Глава 5. Массы галактик	123
Введение	123
Массы двойных галактик	123
Использование теоремы вириала для определения масс отдельных галактик и их групп	125
Определение масс сильно сплюснутых галактик	127
Кривые вращения галактик и распределение масс в них	127
Простые модели распределения масс в галактиках	129
Масса Галактики	130
Модель Шмидта для нашей Галактики	135
Существуют ли массивные короны галактик?	138
Возможные методы обнаружения массивных коронок	139
Краткое содержание гл. 5	140
Глава 6. Межзвездная среда	142
Введение	142
Космические лучи и магнитные поля	143
Время затухания межзвездного магнитного поля	144
Взаимодействие магнитного поля с движущейся средой	145
Силы, действующие в диске Галактики	146
Эволюция диска Галактики	147
Равновесие системы газ — космические лучи — магнитное поле	148
Свойства межзвездной среды в окрестностях Солнца	150
Предел Оорта	152
Гало Галактики и межгалактическая среда	154
Приблизительное равенство давлений газа, космических лучей и магнитного поля	155
Утечка космических лучей из Галактики	155
Простейшая неустойчивость системы газ — космические лучи — магнитное поле	156
Взаимодействие газа и магнитного поля	157
Образование звезд	158
Спиральные волны плотности и звездообразование	159
Краткое содержание гл. 6	161
Глава 7. Химическая эволюция галактик	163
Введение	163
Основные идеи, касающиеся химической эволюции галактик	164

Простая модель эволюции Галактики в окрестностях Солнца	166
Сравнение с наблюдениями	171
Модификации простой теории	174
Быстрое начальное обогащение тяжелыми элементами	175
Звездообразование, стимулированное присутствием металлов	176
Аккреция вещества	177
Вариации химического состава в галактиках	178
Эффекты быстрого начального обогащения тяжелыми элементами и аккреции	179
Немгновенный крутоворот вещества	180
Изотопный состав вещества	182
Удержание газа галактиками	183
Потеря газа при взаимодействии с межгалактической средой	184
Различные темпы эволюции галактик	185
Краткое содержание гл. 7	185
Глава 8. Галактики и Вселенная	187
Введение	187
Космологическая теория горячей Вселенной	188
Средняя плотность вещества во Вселенной	190
Оценка параметра замедления	191
Изменение светимости галактик с возрастом	193
Роль столкновений галактик	194
Другие способы проверки замкнутости Вселенной	195
Образование и ранняя эволюция галактик	197
Красное смещение как мера времени, истекшего с момента излучения света	197
Объяснение сплюснутости галактик	200
Конечные стадии эволюции галактик	202
Конечная стадия эволюции галактик в открытой Вселенной	203
Конечная стадия эволюции галактик в замкнутой Вселенной	204
Краткое содержание гл. 8	204
Глава 9. Заключительные замечания	206
Массы галактик	206
Размер и масса нашей Галактики	207
Скопления галактик	207
Проблемы космологии	208
Происхождение галактик	208
Образование галактик различных типов	209
Химическая эволюция галактик	209
Другие важные проблемы	210
Приложение 1. Некоторые факторы, влияющие на спектры звезд	212
Приложение 2. Теорема вириала	213
Приложение 3. Гравитационные поля, создаваемые сферами и эллипсоидами	216
Рекомендации для дальнейшего чтения	218