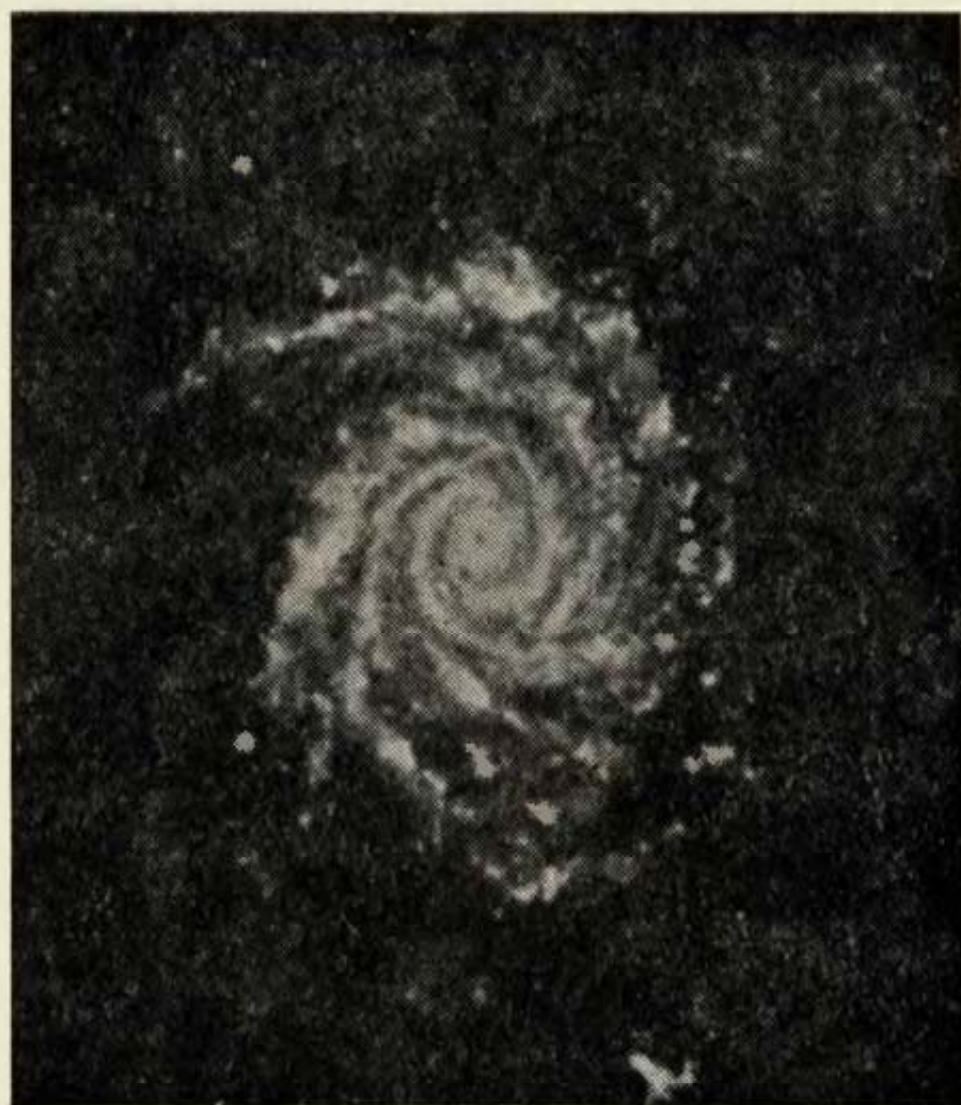


Л. Э. ГУРЕВИЧ, А. Д. ЧЕРНИН

**ПРОИСХОЖДЕНИЕ
ГАЛАКТИК
И ЗВЕЗД**



ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГАЛАКТИК И ЗВЕЗД

Л. Э. ГУРЕВИЧ, А. Д. ЧЕРНИН

ПРОИСХОЖДЕНИЕ
ГАЛАКТИК
И ЗВЕЗД



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1983

22.68

Г 95

УДК 523.12

Гуревич Л. Э., Чернин А. Д.

Г 95 Происхождение галактик и звезд. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. — 192 с.

Книга содержит научно-популярное изложение современных представлений об образовании и эволюции звезд, звездных скоплений, галактик. Эта область астрофизики переживает сейчас бурное развитие, связанное с крупными открытиями в астрономии, новыми гипотезами, глубокими теоретическими разработками. Рассказывается о космологическом расширении и реликтовом излучении, о физических процессах, приведших к формированию крупномасштабной структуры Вселенной, и о многих других интересных проблемах космогонии.

Для читателей со средним образованием, интересующихся актуальными проблемами современной астрономии и физики, студентов, преподавателей, лекторов.

Г $\frac{1705070000 - 106}{052(03)-83}$ 164-83

ББК 22.68
528

Г $\frac{1705070000 - 106}{052(03)-83}$ 164-83

© Издательство «Наука»,
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1983

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава первая. Вселенная	7
Звезды и галактики	7
Космологическое расширение	14
Геометрия Вселенной	18
Горизонт	20
Реликтовое излучение	23
Глава вторая. Происхождение крупномасштабной структуры Вселенной	29
Звезды, галактики и космологическое расширение	29
Гравитационная неустойчивость	31
Догалактическая структура	38
Энтропийные возмущения	43
Первичные возмущения и реликтовый фон	48
Формирование скоплений галактик	50
Крупномасштабная структура	55
Глава третья. Звездные вихри	59
Вращение галактик	63
Вихревая космогония	65
Протогалактическая турбулентность	67
Первичные вихри?	72
Приливные силы?	78
Рождение вихрей	79
Протоскопление — турбулентный слой	84
Спиральная структура	95
Глава четвертая. Рождение и эволюция звезд	102
Солнце и звезды	102
Гравитационная конденсация	104
Каскадная фрагментация	106
Межзвездная среда	110
Молодые звезды	118
Неустойчивости и облака	127

Жизнь звезды	130
Тесные двойные звезды	137
Глава пятая. Эволюция звездных систем	148
От протогалактики к звездной системе	148
Движение звезд в галактиках	153
Бурная релаксация	154
Эволюция звездных скоплений	156
Глава шестая. «Скрытые массы», нейтрино и эйнштейновский вакуум	160
«Скрытые массы»	161
Масса покоя нейтрино	169
Нейтринные короны	171
Закрытая Вселенная?	175
Эйнштейновский вакуум	177
Заключение	183
Литература	191

Эта книга посвящена одной из новых областей астрофизики — космогонии звезд и галактик. Современное развитие космогонии связано с астрономическими открытиями последних двух десятилетий, начиная с открытия квазаров в 1963 г. и обнаружения реликтового излучения в 1965 г. Исследования в этой области опираются на достижения космологии, науки о Вселенной в целом, используют данные различных разделов астрономии, физики, математики.

Возникающие в космогонии задачи сложны и многообразны и решение далеко не всех из них доведено сейчас до конца. Но уже теперь получен целый ряд надежных наблюдательных сведений и теоретических выводов относительно процессов звездообразования и формирования звездных систем; постепенно вырисовывается общая картина происхождения крупномасштабной структуры Вселенной.

О новейших успехах космогонии, о ее проблемах и перспективах развития рассказывается в этой книге на простом языке школьной физики и астрономии. Основные идеи и гипотезы действительно допускают наглядное изложение, не требующее даже математических формул, и мы надеемся, что они смогут привлечь внимание самого широкого круга читателей, интересующихся новостями науки.

Эта научно-популярная книга написана вслед за нашей монографией для специалистов «Введение в космогонию» (М.: Наука, 1978), в которой подводились итоги исследований авторов и их коллег, давался общий обзор состояния космогонической науки. Главные результаты

монографии отражены и в этой книге. Кроме того, мы добавили здесь новый материал по таким темам, как образование звезд в современную эпоху, конечные стадии звездной эволюции, роль нейтрино в космогонии.

Мы глубоко благодарны нашим товарищам по работе В. А. Антонову, А. С. Зенцовой, А. С. Зильберглейту, В. А. Рубану, Э. А. Тропцу, А. Ю. Ушакову, в совместных исследованиях с которыми получены многие из излагаемых в книге результатов.

Мы особенно признательны А. С. Зильберглейту, И. Д. Новикову, Э. А. Тропцу, А. В. Тутукову, прочитавшим рукопись книги и сделавшим ряд полезных замечаний.

Л. Э. Гуревич, А. Д. Чернин

ВСЕЛЕННАЯ

Возраст Солнца превышает 5 миллиардов лет, самым старым звездам во Вселенной более 10 миллиардов лет, а самые молодые звезды рождаются и начинают свою эволюцию на наших глазах в облаках газа и космической пыли. Звезды образуют системы различных размеров и масс — звездные пары и группы, комплексы и ассоциации, звездные скопления, галактики. Иерархия астрономических систем не кончается на галактиках и продолжается к скоплениям и сверхскоплениям галактик — самым большим образованиям во Вселенной.

История космических структур насчитывает 12—15 миллиардов лет, возраст Вселенной в целом не менее 15—18 миллиардов лет, и до образования современных планет, звезд, галактик все их вещество представляло собой горячую водородно-гелиевую плазму, равномерно распределенную в мировом пространстве. Накопленные за многие столетия знания о строении и эволюции небесных тел, наблюдательные открытия XX века и особенно обнаружение расширения Вселенной и существования в ней реликтового излучения позволяют составить сейчас определенное представление о свойствах космической среды в дозвездную, догалактическую эпоху, о физических процессах, приведших к формированию наблюдаемой структуры Вселенной, о продолжающемся и в современную эпоху космогоническом процессе.

В первой главе книги мы расскажем об общих чертах современной астрономической картины мира и об основных идеях космологии — науки о Вселенной в целом.

ЗВЕЗДЫ И ГАЛАКТИКИ

Солнце — одна из ста миллиардов звезд, образующих гигантскую звездную систему, Галактику, которая представляется нам на небе широкой полосой Млечного Пути (рис. 1). В Галактике различают плоскую подсистему, имеющую вид диска с утолщением посередине, и сфе-

рическую подсистему, в которую этот диск погружен (рис. 2). Диск Галактики и ее сферическая подсистема содержат приблизительно одинаковое число звезд. Солнце принадлежит галактическому диску и отстоит от его центра на расстоянии двух третей радиуса диска. Радиусы

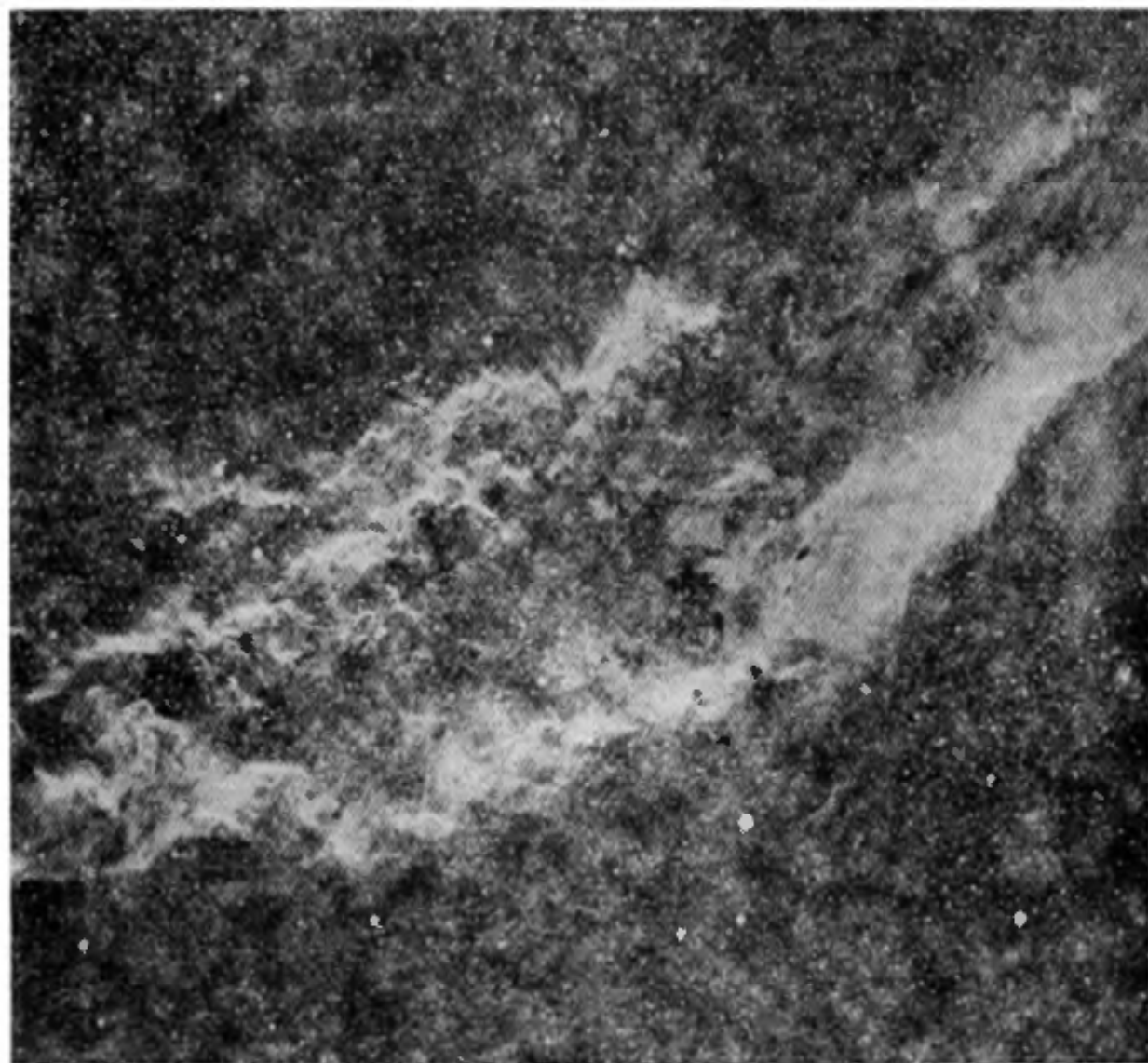


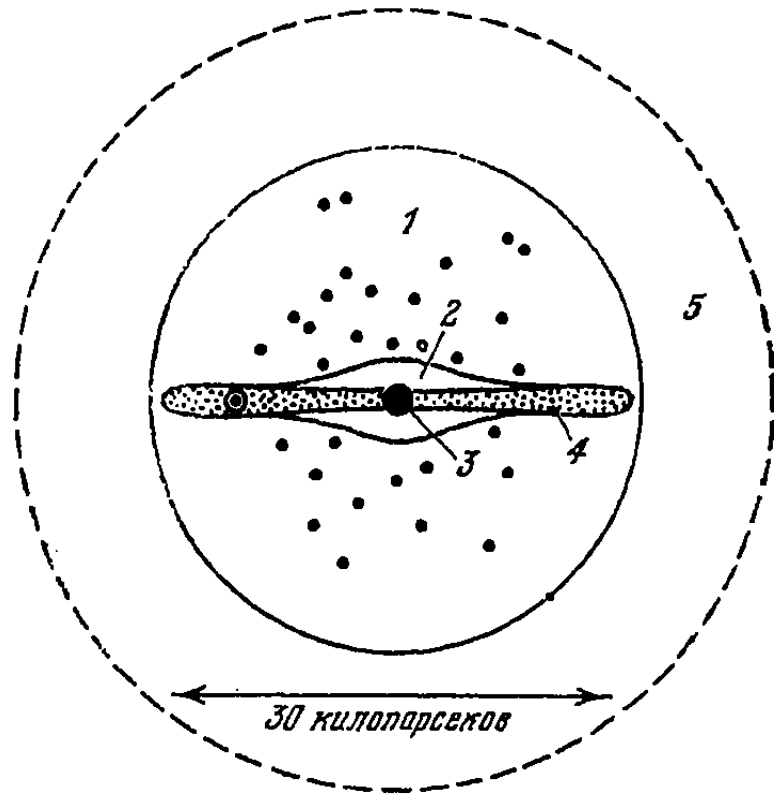
Рис. 1. Один из участков Млечного Пути, содержащий звезды и газо-пылевые облака (туманность Калифорния).

диска и сферической подсистемы близки друг другу и составляют 15 килопарсеков (1 парсек (пс) — это около трех световых лет или $3 \cdot 10^{18}$ см, 1 килопарсек (кпс) = =1000 пс).

В диске Галактики, кроме звезд, имеется еще межзвездный газ и космическая пыль, масса которых составляет несколько процентов массы звезд; в сферической подсистеме газа и пыли практически нет. Среди звезд диска имеется заметное количество молодых ярких звезд, тогда как в сферической подсистеме такие звезды почти

полностью отсутствуют. Диск Галактики вращается как целое; угловая скорость вращения разная на разных расстояниях от его центра. В области, где находится Солнце, линейная скорость вращения диска составляет 220—250 км/с. Звезды диска обращаются вокруг центра по

Рис. 2. Схема строения Галактики. Точками показаны некоторые шаровые скопления. Положение Солнца отмечено значком ☉, который встречается еще в древнеегипетских надписях. 1 — сферическая составляющая, 2 — диск, 3 — ядро, 4 — слой газопылевых облаков, 5 — корона. Размеры на рисунке условные; радиус короны в действительности в несколько раз больше радиуса диска.



почти круговым орбитам; отклонения от кругового движения характеризуются скоростями, которые не превышают 20 км/с. У звезд сферической подсистемы, находящихся поблизости от Солнца, скорость общего регулярного вращения вокруг центра Галактики по крайней мере раз в пять меньше, чем у звезд диска. Звезды сферической подсистемы движутся по вытянутым орбитам, их типичные скорости измеряются двумя-тремя сотнями километров в секунду.

Значительная часть звезд диска Галактики входит в различного рода группы. Не менее половины всех звезд входит в звездные пары, крупными образованиями являются рассеянные скопления, содержащие до тысячи звезд, связанных взаимным тяготением. Самые молодые звезды диска вместе с облаками газа и пыли располагаются широкими полосами — спиральными рукавами, которые яркими широкими дугами выходят из центральной области Галактики.

Распределение звезд в сферической подсистеме более или менее сферически-симметрично. Приблизительно ты-

сячая их доля входит в большие скопления, содержащие до миллиона звезд, которые называют шаровыми скоплениями (рис. 3).

Звезды обеих подсистем Галактики сгущаются к центральной области — ее ядру, которое проявляет себя как источник повышенного радиоизлучения, а также излучения в инфракрасных, рентгеновских и гамма-лучах. Из ядра происходит, по-видимому, также истечение газа.

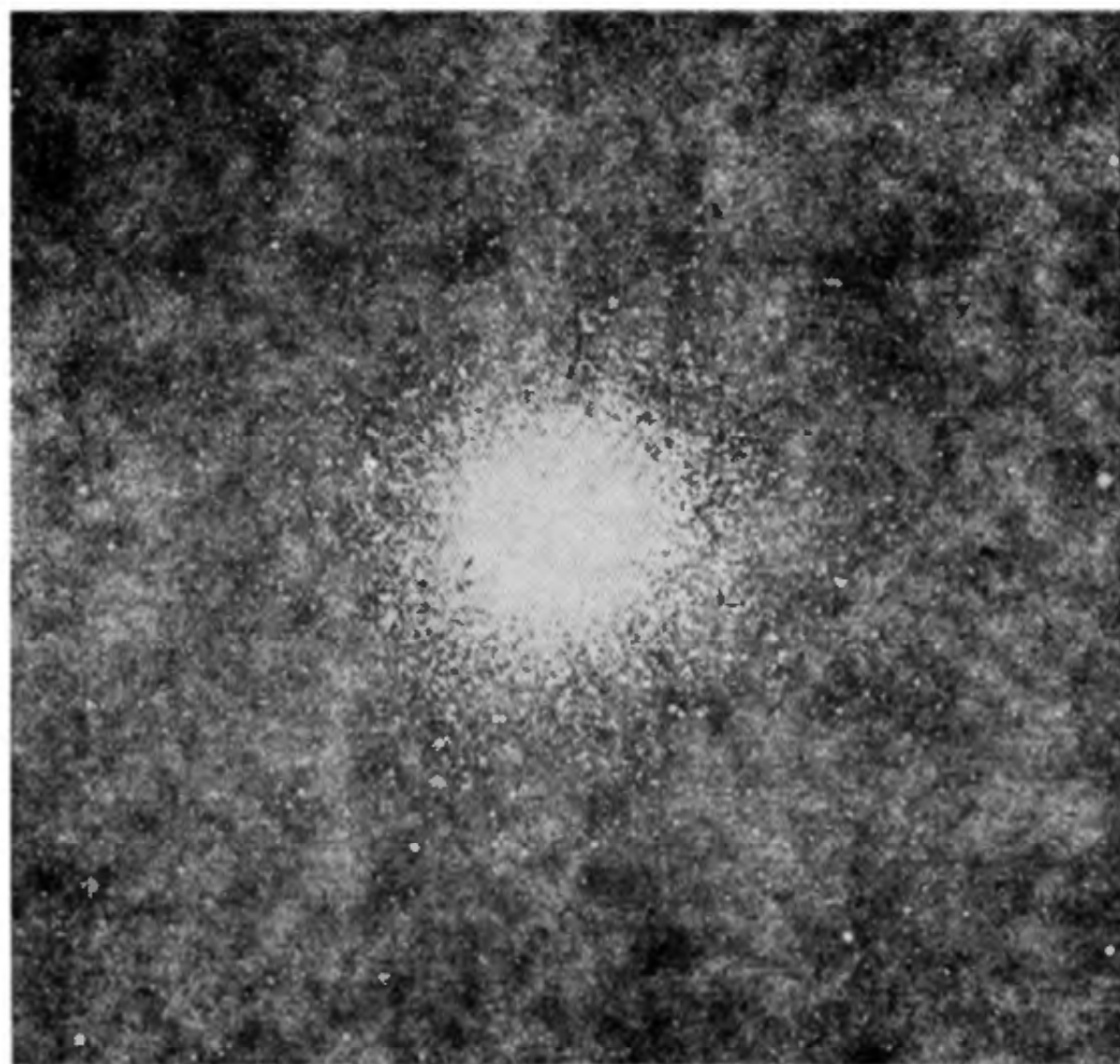


Рис. 3. Шаровое скопление в созвездии Геркулеса.

Светимость Галактики, т. е. полная энергия, излучаемая всеми ее звездами в единицу времени, составляет $3 \cdot 10^{37}$ Вт; это приблизительно в сто миллиардов раз больше светимости Солнца ($4 \cdot 10^{26}$ Вт). Полная масса звезд Галактики оценивается в $2 \cdot 10^{44}$ г, что составляет сто миллиардов масс Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г). Массой и светимостью Солнца как мерой масс и светимостей звезд и звездных систем широко пользуются в астрономии и астрофизике.

В последние годы выясняется, что Галактика обладает протяженной короной, простирающейся на расстояния, в десятки раз превышающие размеры диска и сферической подсистемы. Полная масса короны в несколько раз превышает суммарную массу всех звезд Галактики, но из-за больших размеров ее плотность невелика по сравнению с плотностью, создаваемой звездами и газо-пылевыми облаками. Корона проявляет себя тяготением, но не излучает света и в ней не обнаруживают ни звезд, ни облаков. О природе этих корон, окружающих галактики, об их «скрытых массах» будет рассказано подробнее в главе шестой.

Во Вселенной имеется большое число других звездных систем, галактик, подобных нашей Галактике. Галактики, обладающие дисковой подсистемой со спиральным узором, называют спиральными. Ближайшей к нам гигантской спиральной галактикой является знаменитая Туманность Андромеды (см. рис. 17 на с. 61). Ее масса и светимость раза в два больше, чем у Галактики. Другие спиральные галактики не так массивны; чаще всего их массы составляют миллиард или десять миллиардов масс Солнца, а светимости соответственно в 10—100 раз ниже светимости Галактики.

Кроме спиральных, существуют эллиптические галактики, по своему строению и звездному населению подобные сферической подсистеме нашей Галактики. В них практически нет газо-пылевого вещества и молодых ярких звезд. Самые крупные эллиптические галактики имеют массу и светимость раз в десять больше, чем у Галактики. Имеются и карликовые эллиптические галактики с массами и светимостями, в десятки тысяч раз меньшими (см. рис. 46 на с. 153). Очень часто эллиптические галактики, особенно самые массивные, имеют плотные ядра, которые по своим проявлениям обычно больше и активнее ядер спиральных галактик.

Еще один тип галактик — неправильные. Их массы и светимости в десятки раз меньше, чем у Галактики. Звездный состав подобен населению дисков спиральных галактик. Но эти звезды, а также и значительные массы газо-пылевого вещества, не образуют регулярной структуры и не обладают выраженным общим вращением. Кроме ярких молодых звезд, в неправильных галактиках имеются еще и звезды старые, менее яркие, подобные звездам сферической подсистемы Галактики, также образующие общий сферический остов.

Эти три типа галактик были впервые обнаружены и изучены Э. Хабблом и другими астрономами в двадцатые — тридцатые годы нашего века. С тех пор стали известны и галактики иных типов, не всегда укладывающиеся в первоначальную классификацию. Это относится в первую очередь к галактикам с активными ядрами и значительным радиоизлучением. Экстремальными объектами такого рода являются открытые в шестидесятые годы квазары*). В них звездная составляющая не обнаруживается; она либо вообще отсутствует, либо, что более вероятно, имеется, но незаметна на фоне огромной светимости плотного ядра, достигающей до 10^{39} — 10^{40} Вт, что в десятки тысяч раз больше светимости Галактики. Эта энергия исходит из областей с размером 10^{16} — 10^{18} см, что в десятки и сотни тысяч раз меньше размера Галактики. Радиоизлучение квазаров сравнимо по интенсивности с их оптическим излучением, а инфракрасное излучение часто и еще больше. Имеется распространенная разновидность квазаров с низким радиоизлучением; такие объекты называют квазагами, т. е. квазигалактиками.

Вследствие исключительно большой светимости квазары видны на очень больших расстояниях. Самые удаленные объекты, доступные наблюдениям на современных астрономических инструментах, — это именно квазары. Они как бы очерчивают границы Метагалактики — наблюдаемой области Вселенной. Расстояние до самых далеких квазаров оценивается тысячами мегапарсек (1 мегапарсек (Мпс) = 1 000 000 пс). Свет от них идет к нам миллиарды лет.

Большая часть галактик входит в те или иные группы или скопления, насчитывающие от десятков до тысяч членов. Имеются скопления галактик относительно правильной сферической или эллипсоидальной формы. Таково, например, одно из самых больших известных скоплений, скопление в созвездии Волос Вероники (Coma), имеющее радиус около 4 Мпс и содержащее приблизительно десять тысяч галактик, среди которых преобладают эллиптические галактики.

Как обнаружено в последние годы, многие богатые скопления галактик содержат значительные количества горячего газа, проявляющего себя рентгеновским излуче-

*) Их название — сокращение английских слов *quasistellar radio source* — квазизвездный радиоисточник.

нием. Температура газа достигает ста миллионов градусов и он находится в состоянии плазмы, т. е. в состоянии ионизации, при котором электроны оторваны от ядер. Масса горячего газа в скоплениях сравнима с суммарной массой галактик. Судя по динамике галактик в скоплениях, по температуре межгалактического газа, эти системы содержат еще большие (в 3—10 раз) количества другого вещества, которое проявляет себя только создаваемым им тяготением. Это «скрытые массы», о которых мы уже упоминали, когда речь шла о коронах галактик, и еще будем говорить специально в главе шестой.

Скопления и группы галактик распределены в пространстве не вполне случайным образом. Местная группа галактик, в которую входят наша Галактика, галактика Андромеды и еще три десятка менее крупных объектов, образует вместе с двумя-тремя другими близкими группами галактик систему, называемую Местным Сверхскоплением. Это уплотненное образование, размером до 50 Мпс; его плоскость перпендикулярна к плоскости диска нашей Галактики; центр Местного Сверхскопления лежит в направлении созвездия Девы в крупном скоплении галактик, отстоящем от нас на 20 Мпс. Известны и другие сверхскопления с размерами от 20 до 100 Мпс и массами 10^{15} — 10^{16} масс Солнца.

На крупномасштабной карте неба, на которой галактики выглядят просто точками, скопления галактик часто представляются собранными в протяженные цепочки, — вероятно, сверхскопления. Цепочки соединяются и пересекаются, складываясь в сетчатую или ячеистую структуру. Универсальность ячеистой «сверхструктуры» еще предстоит проверить наблюдениями, но несколько примеров ячеек уже надежно изучено.

Иерархия космических структур обрывается на скоплениях и сверхскоплениях. Более крупных образований в Метагалактике не находят.

Подсчитывая число галактик в больших объемах, с размерами 300 мегапарсек и более, содержащих много скоплений и сверхскоплений, находят их среднюю концентрацию в пространстве, а зная массы галактик, можно оценить и среднюю плотность вещества в таких объемах. Эта плотность оказывается одинаковой, где бы на небе ни выбрать такой объем; по современным данным она составляет $3 \cdot 10^{-31}$ г/см³ или, в пересчете на атомы водорода, примерно один атом на тридцать кубических метров объема.

Правда, астрономические оценки масс не очень надежны. Задача осложняется тем, что помимо светящегося вещества самих галактик, в пространстве вокруг них существуют, по-видимому, значительные массы вещества, наблюдать которые непосредственно не удается, — может быть звезды низкой светимости или газ, или даже черные дыры, а может быть, и нейтрино (если у них есть масса покоя, — см. главу шестую). Скрытые массы проявляют себя, как мы говорили, только тяготением, которое сказывается на движении галактик в группах и скоплениях. По этим признакам оценивают связанную с ними среднюю плотность, которая, как полагают Я. Э. Эйнасто и его коллеги в Тартуской обсерватории, может быть в 2—3 раза или даже в 5—10 раз больше усредненной плотности галактик.

То обстоятельство, что число галактик и плотность вещества оказываются одинаковыми по достаточно большим объемам, где бы эти области ни находились, означает, что Вселенная, рассматриваемая в большом масштабе, является в среднем однородной. Это одно из фундаментальных свойств окружающего нас мира.

КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ

Другим фундаментальным свойством Вселенной является ее общее расширение. Наблюдения показывают, что скопления (и сверхскопления) галактик, разделенные расстояниями, превышающими 100—300 Мпс, удаляются друг от друга. Этот факт установлен Э. Хабблом в конце 20-х годов.

Давно известно, что когда источник звука удаляется от нас, воспринимаемая нами частота звуковых колебаний уменьшается, а при приближении источника она, наоборот, возрастает. Аналогичное явление имеет место и при распространении света и вообще любых электромагнитных волн. Оно получило название эффекта Доплера. Если источник излучения движется от нас, и притом с большой скоростью, то частота воспринимаемых колебаний также понижается. Цвет при этом меняется, переходя, скажем, от синего к желтому или от желтого к красному. Э. Хаббл, наблюдая свет, испускаемый далекими галактиками, установил, что спектральные линии в их излучении смещены в красную сторону спектра. При этом чем дальше от нас галактика, тем больше это «красное смещение» приходящего от нее излучения. Отсюда следует, что галактики

удаляются от нас и скорость их удаления тем больше, чем дальше находится галактика. Но ведь наша собственная Галактика, из которой мы ведем наблюдения, — отнюдь не центр мира, и, очевидно, нужно считать, что галактики или, точнее, скопления галактик, разбегаются не от нас, а вообще все они удаляются друг от друга.

Если расстояние между скоплениями есть L , то скорость их взаимного удаления $v=HL$. Это соотношение называют законом Хаббла; H — постоянная Хаббла, ее величина не зависит от положения скоплений в пространстве. По современным оценкам $H=55-75$ км/(с·Мпс).

За несколько лет до открытия Хаббла нестационарность Вселенной была предсказана А. А. Фридманом, основоположником современной космологии. Опираясь на общую теорию относительности А. Эйнштейна, Фридман разработал модель однородной Вселенной, которая, как оказалось, не может находиться в состоянии покоя, а должна быть нестационарной. Эта нестационарность и проявляется в разбегании галактик и их скоплений. Оно происходит так, что общая однородность распределения скоплений (или сверхскоплений) не нарушается. Как показывает теория, сохранение однородности требует, чтобы скорости удаления тел друг от друга были прямо пропорциональны расстояниям между ними; именно это и найдено в астрономических наблюдениях.

Скорости космологического разбегания весьма значительны. Если скопление галактик находится от нас на расстоянии, скажем, тысячи мегапарсеков, то, — по закону Хаббла, — оно удаляется от нас со скоростью не меньше 55 тысяч км/с. Самые далекие квазары имеют скорости удаления, лишь немногим уступающие скорости света, равной 300 000 км/с.

Расширение происходит с большими скоростями, а всемирное тяготение, взаимное притяжение космических систем, стремится его затормозить и обратить расширение в сжатие. Тяготение, очевидно, тем сильнее, чем больше массы систем и меньше расстояния между ними, и потому можно ожидать, что судьба расширения зависит от плотности вещества во Вселенной. Чтобы тяготение преодолело расширение, плотность должна быть достаточно большой, а именно превышать некоторое критическое значение (рис. 4).

Критическую плотность можно найти, оценивая запас энергии разлета по наблюдаемым скоростям космических систем. Современные данные приводят к величине от

10^{-29} до $5 \cdot 10^{-30}$ г/см³, что соответствует примерно десяти или пяти атомам водорода в кубическом метре. Это больше усредненной плотности галактик, но не превосходит, по видимому, ту плотность, которую могли бы дать «скрытые массы».

Вопрос о судьбе космологического расширения остается, таким образом, открытым: если «скрытые массы»

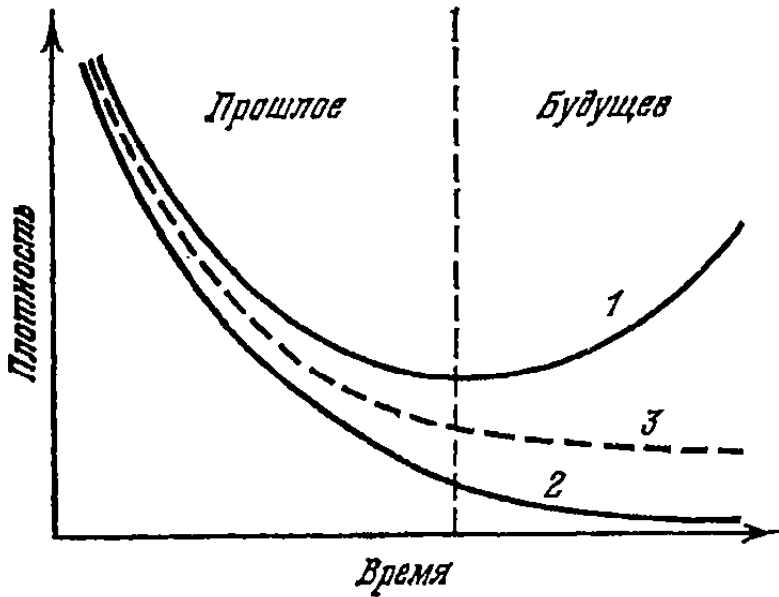


Рис. 4. Космологическое расширение: три модели; 1 — плотность мира больше критической плотности; 2 — плотность мира меньше критической; 3 — плотность равна критической.

действительно существуют и создаваемая ими плотность соответствует максимальной оценке, то начального «разгона» недостаточно, чтобы расширение Вселенной продолжалось неограниченно. В этом случае тяготение способно остановить в будущем расширение и через 10—15 миллиардов лет привести к сжатию Вселенной. Мы вернемся к этому вопросу в главе шестой.

Обратимся теперь не к будущему, а к прошлому Вселенной, к ее истории. Если сейчас космические системы удаляются друг от друга, то когда-то в прошлом они были ближе друг к другу или даже «касались» друг друга. В еще более ранние времена ни скопления, ни галактики, ни даже отдельные звезды не могли, очевидно, существовать в их современном виде, а вещество, из которого они состоят, должно было быть равномерно перемешано и составляло единую космическую среду. Чем дальше в прошлое, тем больше плотность этой среды.

До каких же пор продолжается, если смотреть в прошлое, это возрастание плотности? Согласно теории Фридмана, плотность мира возрастает в прошлое неограниченно и в определенный момент становится сколь угодно большой или, выражаясь математически, бесконечной. Этот момент

берется в теории Фридмана за начало отсчета — за нуль времени. Все, что было еще «ранее» этого момента, лежит уже за пределами применимости модели Фридмана, да и в самый момент нулевого времени и бесконечной плотности эта модель уже неприменима.

История физики учит, что всякий раз, когда в теоретических моделях или формулах возникает бесконечность, это означает, что мы сталкиваемся с каким-то новым явлением, принципиально отличным от того, что эти модели и формулы сами по себе описывают. Например, в формулах аэродинамики бесконечность возникала при приближении скорости тела к скорости звука в среде, в которой это тело движется; бесконечным оказывалось сопротивление среды такому движению. Если понимать это буквально, то отсюда следовал бы вывод о невозможности сверхзвуковых движений. Но мы хорошо знаем, что самолеты вполне могут летать со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе. Все дело в том, что упомянутые аэродинамические формулы описывали сопротивление в непрерывной среде, в среде без скачков плотности и давления. Однако переход от дозвукового движения к сверхзвуковому связан с нарушением этого условия: в среде перед телом возникает ударная волна, и на ее фронте плотность и давление среды претерпевают резкий скачок. Учет этого нового явления, обобщение аэродинамики на случай разрывов в среде, устраняет бесконечность из теоретических формул, дает конечные, правильные величины для сопротивления движению.

Несомненно, и в космологии бесконечная плотность означает, что в тот момент, когда она возникает, происходит нечто совсем особенное. Это должно быть грандиозное явление, сообщившее всему веществу Вселенной огромные скорости разлета. Природа этого явления, т. е. причина космологического расширения остается пока неизвестной.

Но то, что происходило после начала космологического расширения при конечной, хотя бы и очень большой плотности, всю динамику космологического расширения, физические процессы в расширяющемся веществе можно уверенно изучать на основе общих законов физики и опирающейся на них модели Фридмана.

Космология Фридмана позволяет проследить, как с течением времени менялась плотность мира. Оказывается, что возраст Вселенной т. е. время t , протекшее от начала расширения до некоторого момента в истории Вселенной,

связано с плотностью ρ в этот момент приближенным *) соотношением $t \sim 1/\sqrt{G\rho}$ (здесь $G=6,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2) = 7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ — гравитационная постоянная). При возрасте в одну секунду плотность мира составляла приблизительно $5 \cdot 10^5 \text{ г/см}^3$; плотность, сравнимая с плотностью атомных ядер, 10^{15} г/см^3 , осуществлялась при возрасте в 20 микросекунд, а плотность 1 г/см^3 была достигнута уже через десять минут после начала расширения.

Соотношение между временем и плотностью получено в модели Фридмана в результате решения сложных уравнений общей теории относительности. Но когда оно уже стало известно, обратили внимание на то, что это простое соотношение можно было бы получить совсем иным путем — на основе анализа размерностей, фигурирующих в теории физических величин. Это один из мощных методов теоретической физики, а исходит он просто из того, что если в левой части уравнения стоит величина, скажем, времени или массы, то и величины в правой части уравнения должны быть той же размерности, т. е. это тоже должны быть величины времени или массы. Когда в теории имеется небольшое число размерных величин, то иногда оказывается возможным найти связь между ними, лишь требуя одинаковой размерности в левой и правой частях уравнения. В нашем случае речь идет о связи между временем и плотностью среды, причем среда является гравитирующей и никаких иных сил, кроме гравитационных, нет. Естественно ожидать, что допустимо такое соотношение между временем и плотностью, в которое помимо этих двух величин входит только величина гравитационной постоянной, отражающая наличие сил гравитации. Легко убедиться, что из этих трех величин можно составить одну и только одну комбинацию, удовлетворяющую соображениям размерности, и это как раз то соотношение, которое имеется в космологической модели Фридмана. Это соотношение нам еще не раз встретится.

ГЕОМЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Свойства пространства и времени не абсолютны, не заданы раз навсегда, а зависят от распределения и движения тяготеющих масс. Это — центральная идея реля-

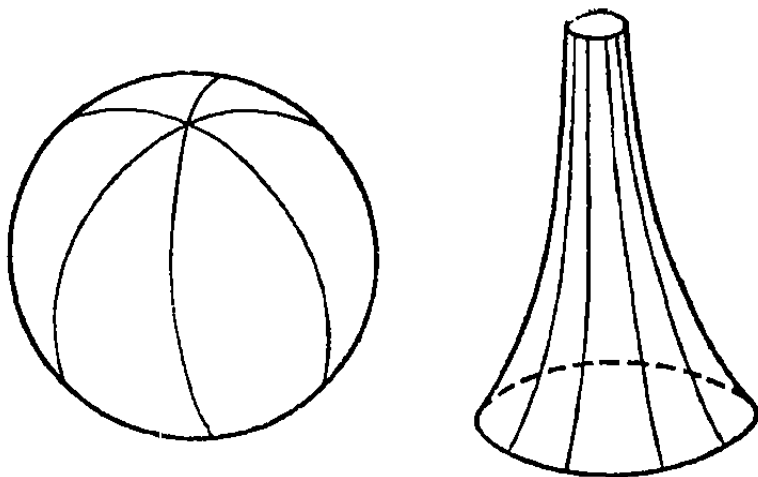
*) Точные формулы имеют такой вид:

$$t = 1/\sqrt{32\pi G\rho}/3 \text{ при } t \text{ меньше } 1 \text{ миллиона лет;}$$

$$t = 1/\sqrt{6\pi G\rho} \text{ при } t \text{ больше } 1 \text{ миллиона лет.}$$

тивистской физики, общей теории относительности Эйнштейна. Поэтому пространство, однородно заполненное материей, и само должно быть однородным, всюду одинаковым по своим геометрическим свойствам. Распространяя свойство однородности, установленное наблюдениями близкого к нам объема Вселенной, на всю Вселенную, мы

Рис. 5. Сфера и псевдосфера — примеры искривленных поверхностей с неевклидовой геометрией. Площадь поверхности сферы конечна, псевдосферы — бесконечна (на рисунке показана лишь часть псевдосферы).



делаем, конечно, предположение (по-видимому, разумное), что наблюдаемый участок ничем специально не выделен во Вселенной и вся она всюду одинакова.

Физическое пространство однородно, но оно может быть искривлено тяготением материи, гравитацией. Трехмерное пространство способно быть кривым, неевклидовым, подобно тому, как искривлены двумерные поверхности, скажем, поверхность сферы или псевдосферы (рис. 5). Хотя наглядное представление искривленных трехмерных пространств затруднительно, переход к ним от двумерных кривых поверхностей можно вообразить по примеру перехода от плоскости (евклидовой двумерной поверхности) к привычному трехмерному евклидову пространству, перенося на трехмерные образы геометрические свойства двумерных прототипов. Так, можно ожидать, что трехмерный аналог сферы должен иметь конечный объем, подобно тому, как сфера имеет конечную площадь. Это пример конечного трехмерного пространства. Напротив, трехмерный аналог псевдосферы должен иметь бесконечный объем, как бесконечна полная площадь псевдосферы. Это — пример бесконечного пространства. Промежуточная возможность — неискривленное, евклидово трехмерное пространство; у него тоже бесконечный объем (как бесконечна площадь неограниченной плоскости).

Каково же реальное пространство однородной Вселенной? Ответ могли бы дать непосредственные геометри-

ческие измерения с помощью лучей света, посылаемых галактиками. Но на тех расстояниях, на которых они видны, отклонения от свойств привычного евклидова пространства еще неуловимы. Пространство могло бы проявить свою кривизну только на гораздо больших расстояниях. Но там реальные измерения невозможны: мало ярких источников света.

Возможно, однако, иное решение вопроса, исходящее из общих представлений релятивистской физики о связи между геометрией пространства и тяготеющими массами. Если взаимное разбегание космических тел — скоплений, сверхскоплений — будет продолжаться неограниченно и расстояния между телами будут возрастать, стремясь с течением времени к бесконечности, то, по теории Фридмана, неограниченным, бесконечным должен быть и объем пространства, в котором они движутся. По геометрическим свойствам такое пространство должно быть подобно псевдосфере. Напротив, ограниченность расширения во времени и возможность перехода в будущем к сжатию означает и пространственную ограниченность, конечность объема Вселенной, которая в этом случае подобна сфере по своей геометрии. Подробнее о геометрии Вселенной можно прочитать в книгах Л. Э. Гуревича и А. Д. Чернина (1970) и И. Д. Новикова (1983) (см. литературу в конце книги).

ГОРИЗОНТ

Когда говорят об однородности распределения вещества, подразумевают, что видят сразу всю картину разбегающихся космических систем как бы одновременно. В самом деле, так как плотность вещества во Вселенной убывает в ходе космологического расширения, то считать среднюю плотность мира всюду одинаковой можно только при том условии, что каждый участок Вселенной рассматривается на одном и том же этапе расширения — в этом и состоит в данном случае смысл одновременности. Иначе один участок выглядел бы более плотным (т. е. «молодым»), а другой — менее плотным («старым»), если бы мы видели первый на более раннем, а второй на более позднем этапе расширения. Можно сказать, что однородность плотности существует лишь на «мгновенной» фотографии Вселенной, снятой в таких воображаемых «лучах», которые распространяются мгновенно, с бесконечной ско-

ростью, и именно на таком снимке мир в целом и предстает перед нами однородным.

Конечно, мгновенно распространяющихся волн или лучей в природе нет; любые сигналы распространяются с конечными скоростями и самая большая из них — скорость света. Как выглядел бы мир, «снятый» в реальных световых лучах?

Астрономические наблюдения — оптические и радио-, в инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-лучах — производятся с помощью электромагнитных волн различной частоты и длины волны. Они показывают картину неба с запаздыванием, так как волнам требуется определенное время, чтобы пройти разделяющее нас и наблюдаемый объект расстояние. Солнце мы видим с задержкой на 8 минут. Свет от звезд Галактики идет десятки и сотни лет, а от далеких галактик и скоплений, — миллионы и сотни миллионов лет. Чем дальше объект, тем в более раннюю эпоху мы его видим. Дальше всех находятся квазары и мы видим их такими, какими они были миллиарды лет назад. Наблюдая распределение и движение галактик, скоплений, сверхскоплений, мы узнаем эти их свойства такими, какими они были в очень отдаленном, по нашим обычным понятиям, прошлом. Но по масштабам Вселенной разница в сотни миллионов лет не очень велика: ее расширение происходит в таком темпе, что плотность вещества Вселенной на современной стадии ее расширения заметно меняется лишь за миллиарды лет. Поэтому-то плотность в близкой к нам области Вселенной, где видны галактики, и представляется нам одинаковой, однородной.

Если бы, однако, можно было заглянуть на более далекие расстояния, т. е. в более далекое прошлое, то мы, очевидно, обнаружили бы, что там (т. е. тогда) плотность больше, чем вблизи (т. е. сейчас). Снимок, сделанный в реальных лучах, показал бы таким образом Вселенную неоднородной по плотности: чем дальше от нас, тем плотнее.

На таком снимке и само пространство, в соответствии с общими принципами эйнштейновской теории, должно быть неоднородным по своим геометрическим свойствам. Более того, на снимке в реальных лучах пространство всегда конечно по объему, независимо от того, какова судьба космологического расширения.

Дело в том, что свет, приходящий к нам от далеких источников, испытывает за время своего распространения

красное смещение: длины волн в электромагнитных колебаниях возрастают, а частоты убывают. Это, как мы говорили, следствие эффекта Доплера, обязанного космологическому расширению, относительному движению галактик. По закону Хаббла, чем дальше от нас источник, тем больше скорость его удаления от нас и, следовательно, больше красное смещение линий в его спектре. При этом существует такое большое, но вполне определенное, конечное расстояние, для которого длина волны приходящего света оказывается бесконечной, а частота принимаемого света обращается в нуль, и из-за этого источник становится для нас невидимым. Таким образом, можно говорить о существовании во Вселенной горизонта, в пределах которого только и возможны наблюдения. Объем пространства, доступный наблюдениям, оказывается по этой причине конечным: конечна и содержащаяся в нем масса вещества. Расстояние до горизонта, которое в современную эпоху равно примерно 15—18 миллиардам световых лет, есть путь, который свет успеваеет пройти за 15—18 миллиардов лет от начала космологического расширения до настоящего момента.

Вывод о существовании горизонта никак не зависит от того, есть ли в действительности астрономические объекты, которые так ярки, что могут посылать нам свет со сколь угодно больших расстояний. Он имеет характер принципиального ограничения, вытекающего фактически из того обстоятельства, что все волны и лучи проходят за конечное время конечное расстояние.

Горизонт как предел видимости — это, очевидно, и предел любого обмена сигналами, а значит, и предел причинной связи. Два события могут быть между собой причинно связаны, — так, например, чтобы одно было следствием другого, — только если оба они происходят в пределах горизонта.

Горизонт расширяется вместе с расширением Вселенной; его радиус возрастает как путь, проходимый светом за время от начала расширения, и в каждую последующую эпоху в пределах горизонта оказывается больше вещества, чем в предыдущую. Те области Вселенной, которые сейчас находятся в пределах современного горизонта и заняты видимыми галактиками, были когда-то раньше разделены горизонтом. Горизонт, как непроницаемая стена, изолировал их, они ничего «не знали» тогда друг о друге. Но, войдя сейчас в контакт, они «обнаруживают», что имеют одну и ту же плотность. Почему? Каким обра-

зом распределение и движение вещества оказались скоррелированными в этих различных и далеко отстоящих друг от друга участках мира?

Ответ на этот вопрос пока не найден. Остается лишь полагать, что мир «с самого начала» был однородным, а космологическое расширение всегда происходило в одинаковом темпе во всех его областях. Но что значит «с самого начала», и что было «до этого» — вопросы, ответить на которые, может быть, еще труднее, чем на вопрос о причинной связности Вселенной.

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Опираясь на теорию космологического расширения А. А. Фридмана и общие законы физики, Г. А. Гамов выдвинул в 40-е годы предположение о том, что в далеком прошлом Вселенной ее вещество было не только очень плотным, но и очень горячим. Эта идея нашла прочное наблюдательное подтверждение в 1965 г., когда А. Пензиас и Р. Вилсон обнаружили существование реликтового излучения. Оказалось, что вся Вселенная заполнена радиоволнами миллиметрового диапазона, распространяющимися равномерно по всем направлениям.

Квантовая теория уже давно установила, что всякое электромагнитное излучение проявляет как волновые, так и корпускулярные свойства, примирив и согласовав таким образом издавна соперничавшие в физике взгляды на природу света. О космических радиоволнах тоже можно говорить и как о совокупности частиц, квантов электромагнитного излучения, называемых фотонами. Этот «фотонный газ» равномерно заполняет всю Вселенную. Температура газа фотонов близка к абсолютному нулю — около 3 кельвинов, но энергия, содержащаяся в нем, больше световой энергии, испущенной всеми звездами за время их жизни. На каждый кубический сантиметр пространства Вселенной приходится приблизительно пятьсот квантов излучения, а полное число фотонов в пределах видимой Вселенной в несколько миллиардов раз больше полного числа частиц вещества, т. е. атомов, ядер, электронов, из которых состоят планеты, звезды и галактики.

Это общее фоновое излучение Вселенной называют, вслед за И. С. Шкловским, реликтовым, т. е. остаточным, и оно действительно представляет собой остаток, реликт плотного и горячего начального состояния Вселенной. Возможность обнаружения реликтового излучения на фоне

излучения галактик и звезд в области сантиметровых радиоволн была обоснована расчетами А. Г. Дорошкевича и И. Д. Новикова, выполненными по предложению Я. Б. Зельдовича в 1964 г., за год до открытия А. Пензиаса и Р. Вилсона.

Известно, что нагретое вещество всегда излучает фотоны, оно светится. Согласно общим законам термодинамики, в этом проявляется стремление к равновесному состоянию, при котором достигается, так сказать, насыщение: рождение новых фотонов компенсируется обратным процессом, поглощением фотонов веществом, так что полное число фотонов в среде не меняется. При таком термодинамическом равновесии вещества и излучения средняя энергия фотона пропорциональна температуре, а концентрация фотонов, т. е. их число в единице объема, пропорциональна кубу температуры.

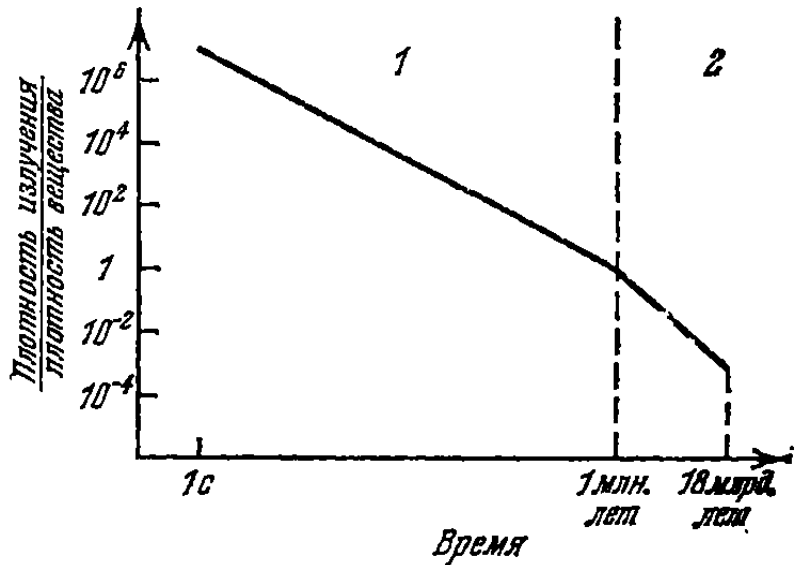
Предположив, что вещество ранней Вселенной было горячим, Гамов предсказал, что фотоны, которые находились тогда в термодинамическом равновесии с веществом, должны сохраниться в современную эпоху. Эти фотоны и удалось непосредственно обнаружить в 1965 г. Испытав общее расширение и связанное с ним охлаждение, газ фотонов образует сейчас фоновое излучение Вселенной, приходящее к нам равномерно со всех сторон.

Квант реликтового излучения не имеет массы покоя, как всякий квант электромагнитного излучения, но обладает энергией, а следовательно, по знаменитой формуле Эйнштейна $E=Mc^2$, и массой, соответствующей этой энергии. Для большинства реликтовых квантов эта масса очень мала: гораздо меньше массы атома водорода — самого распространенного элемента звезд и галактик. Поэтому, несмотря на значительное преобладание по числу частиц, реликтовое излучение уступает звездам и галактикам по вкладу в общую массу Вселенной. В современную эпоху плотность излучения составляет $3 \cdot 10^{-34}$ г/см³, что приблизительно в тысячу раз меньше усредненной плотности вещества галактик.

Но так было не всегда — в далеком прошлом Вселенной фотоны давали главный вклад в ее плотность. Дело в том, что в ходе космологического расширения плотность излучения падает быстрее плотности вещества. В этом процессе убывает не только концентрация фотонов (в том же темпе, что и концентрация частиц), но уменьшается и средняя энергия одного фотона, так как при расширении падает температура газа фотонов. Плотность энергии излучения

есть произведение средней энергии кванта на их концентрацию; массовая плотность излучения получается делением плотности энергии на квадрат скорости света. Если восстановить плотность излучения в отдаленные эпохи в прошлом, то окажется, что в первый миллион лет космологического расширения она превосходила плотность вещества (рис. 6). В эту раннюю эпоху, которую естественно

Рис. 6. Отношение плотности излучения к плотности вещества в расширяющейся Вселенной. 1 — эпоха преобладания излучения, 2 — эпоха преобладания вещества. По обеим осям — логарифмическая шкала величин.



назвать эпохой преобладания излучения, тяготение космической среды, а следовательно, и вся ее динамика определялась излучением. При переходе от стадии преобладания излучения к стадии преобладания вещества плотность Вселенной составляла приблизительно $3 \cdot 10^{-22}$ г/см³.

Космологическая теория указывает закон, по которому изменяются все расстояния и длины во Вселенной. Оказывается, что сначала расстояния и длины увеличиваются пропорционально корню квадратному из времени, а затем, после момента равенства плотностей вещества и излучения, они увеличиваются несколько быстрее — как время в степени $2/3$. В обе эти эпохи космологическое расширение происходит с замедлением, в чем и проявляется действие собственного тяготения среды. Без этого торможения скорости разлета космических тел оставались бы, очевидно, постоянными; но тогда расстояния и длины изменялись бы просто пропорционально времени. В действительности же расширение всегда происходит медленнее, чем по закону прямой пропорциональности времени.

Если мысленно выделить во Вселенной шар, образуемый данными частицами, то его радиус будет возрастать со временем по закону, о котором мы сказали. Полная масса частиц (точнее, их масса покоя) не меняется в ходе космологического расширения. Суммарная же масса

фотонов, т. е. полная масса излучения, убывает обратно пропорционально радиусу шара. Плотность вещества падает, изменяясь обратно пропорционально объему шара, т. е. кубу его радиуса. По тому же закону изменяется и концентрация фотонов, заключенных в шаре. В соответствии с этим отношение массы (плотности) излучения к массе (плотности) вещества убывает при расширении обратно пропорционально радиусу шара и вообще всем расстояниям и длинам во Вселенной. Это и показано на рис. 6.

В течение всей эпохи преобладания излучения вещество Вселенной было таким горячим, что электроны тепловыми движениями были оторваны от ядер. Нейтральные атомы не могли тогда существовать, и космическая среда находилась в состоянии полной ионизации, в состоянии плазмы. В первые мгновения космологического расширения, в первые доли секунды после его начала температура среды превышала сотни миллиардов градусов, и в этом горячем «котле» достигалось термодинамическое равновесие, устанавливались сохранившиеся и до настоящего времени соотношения между составляющими космическую среду частицами и квантами. Помимо фотонов, в этом равновесии с веществом находился еще газ нейтрино, которых было по числу почти столько же, сколько и фотонов. Как и фотоны, нейтрино должны «дожить» и до современной эпохи, и хотя они непосредственно не регистрируются, нет никаких сомнений, что реликтовые нейтрино действительно существуют. Согласно одной из гипотез, именно они и составляют «скрытую массу», проявляющую себя в динамике галактик и скоплений галактик.

При указанных высоких температурах не могли существовать не только нейтральные атомы, но даже и сложные атомные ядра; среда представляла собой смесь элементарных частиц, таких как нейтроны, протоны, электроны, нейтрино, фотоны и т. д. Тепловые движения не позволяли нейтронам и протонам соединяться и связываться ядерными силами, а случайно возникавшие ядра немедленно разбивались налетающими на них частицами. Но в ходе расширения температура среды падала, и образование ядер стало возможным через 3—5 минут после начала расширения, когда температура снизилась до значения в несколько миллиардов градусов.

Одно из самых значительных достижений космологии — теория образования химических элементов в ранней Вселенной, или, как ее еще называют, теория первичного нук-

леосинтеза. Оказывается, что большая часть протонов осталась свободной, и не вошедшие в сложные ядра протоны определили общее космическое содержание водорода — самого легкого атома, ядром которого является протон. Водорода во Вселенной 70—75% по массе. Следующий за водородом элемент таблицы Менделеева, гелий, вобрал в себя почти все оставшиеся протоны и равное им число нейтронов (в ядре основного изотопа гелия, гелия-4, содержится два протона и два нейтрона), по массе гелия около 25—30%. Другие ядра — ядра тяжелых изотопов водорода (дейтерия и трития), легкого изотопа гелия (гелия-3), а также таких легких элементов, как литий, бериллий, бор — образовались в количествах, не превышающих сотые доли процента. Более тяжелые ядра в этом процессе, продолжавшемся около четверти часа, не могли образоваться; они возникли гораздо позднее при ядерных реакциях в недрах звезд.

Соотношение между водородом и гелием, указываемое космологической теорией образования элементов, находится в очень хорошем согласии с астрономическими данными о химическом составе атмосфер самых старых звезд, где, как можно полагать, преобладает «первичное» вещество, из которого эти звезды образовались.

Нужно сказать, что первые расчеты космологического нуклеосинтеза были сделаны еще в конце 40-х годов, задолго до открытия реликтового излучения. Из условия согласия результатов с наблюдательными данными о космической распространенности водорода и гелия удалось тогда предсказать ожидаемую температуру современных реликтовых фотонов; по оценкам Г. А. Гамова выходило, что она должна лежать между одним и десятью кельвинами выше абсолютного нуля. Действительная температура, 3 кельвина, на самом деле находится в этом интервале.

Подробнее о разнообразных физических процессах на самых ранних стадиях космологического расширения можно прочитать в книге С. Вайнберга (1981).

После образования гелия и малой примеси других легких ядер эволюция космической среды происходила без изменения ее состава; только соотношение между плотностями излучения и вещества постепенно менялось в пользу последнего. Падала и температура, убывая обратно пропорционально всем расстояниям и длинам, т. е. по тому же закону, что и отношение плотности излучения к плотности вещества (рис. 7). При возрасте Вселенной около одного миллиона лет температура снизилась до значения в три

тысячи кельвинов, и тогда произошла рекомбинация космической плазмы; электроны и протоны, прежде разделенные их тепловыми движениями, объединились теперь в нейтральные атомы водорода. Несколько ранее произошла и рекомбинация гелия — ядра гелия, присоединив по два

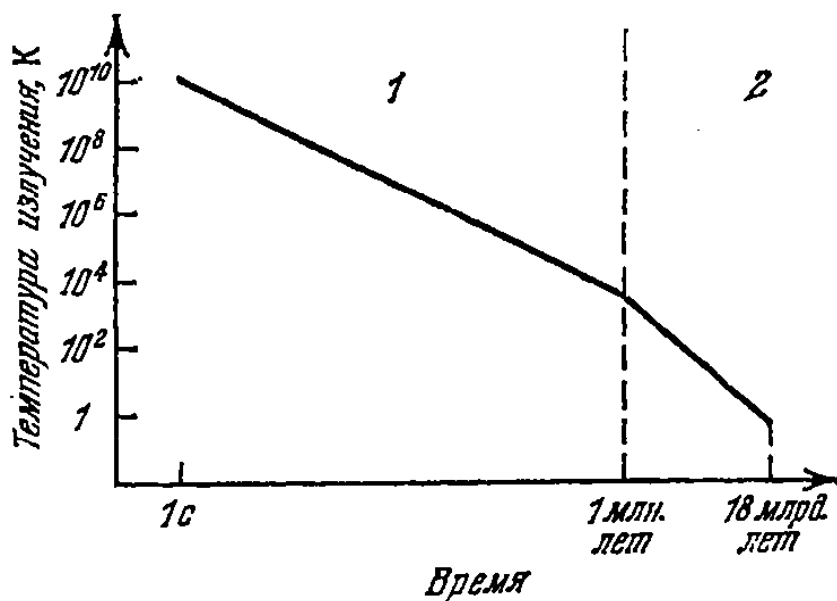


Рис. 7. Температура излучения в расширяющемся мире. В эпоху преобладания излучения (1) она совпадает с температурой вещества. По обеим осям — логарифмическая шкала величин. Стоит обратить внимание на подобие графиков этого рисунка и рис. 6 (см. текст).

электрона, образовали нейтральные атомы гелия. Превращение ионизованной среды, первичной водородно-гелиевой плазмы, в газ нейтральных атомов приблизительно совпадало по времени — неизвестно, случайно или нет. — с переходом от эпохи преобладания излучения к эпохе преобладания вещества.

Если до рекомбинации излучение и ионизованное вещество взаимодействовали между собой благодаря электромагнитным силам и находились между собой в термодинамическом равновесии, то после рекомбинации взаимодействие излучения с нейтральным веществом было уже невозможно. Прекратилось и состояние равновесия между ними, так что в дальнейшем вещество, остывая при космологическом расширении быстрее, чем излучение, имело уже иную, более низкую температуру, чем газ фотонов; а фотоны именно после рекомбинации и превратились, собственно, в реликтовые, остаточные.

Вслед за рекомбинацией во Вселенной начался процесс формирования наблюдаемых космических структур, о котором рассказывается в последующих главах книги.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ

При высоких температурах и плотностях в ранней Вселенной не было ни звезд, ни галактик. Даже атомные ядра тяжелее протона не могли существовать изначально, а атомы возникли только в эпоху рекомбинации, спустя миллион лет после начала космологического расширения. Можно сказать, что «с самого начала» во Вселенной не было никаких связанных образований — ни микроскопического масштаба, т. е. масштаба атомных ядер, ни астрономического масштаба.

Однако полная бесструктурность, идеальная однородность и изотропия во всех масштабах, была невозможна. Какие-то отклонения от однородности и изотропии существовали, вероятно, всегда, и охватывали значительные массы вещества, соответствующие массам наблюдаемых космических систем — от звезд до самых крупных скоплений и сверхскоплений галактик. Это была дозвездная, догалактическая структура Вселенной. Но ее элементами служили не изолированные сгущения вещества, а слабые и расплывчатые нерегулярности среды, которые в физике принято называть малыми возмущениями.

В этой главе мы расскажем о дозвездной, догалактической структуре Вселенной, о ее эволюции в ходе общего расширения мира, о формировании самых крупных астрономических систем — скоплений и сверхскоплений галактик.

ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ И КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ

Современные представления о возникновении астрономических структур целиком опираются на космологическую теорию, дающую общую схему развития Вселенной как целого. Космология отвлекается от таких «деталей» устройства Вселенной, как звезды, галактики или даже целые скопления и сверхскопления галактик, рассматривая их как случайно движущиеся «точки», из которых складывается, как газ из молекул, метagalактическая среда. Сред-

няя плотность метагалактической среды однородна, т. е. одинакова в масштабах, превышающих 100—300 Мпс; это следует из подсчета звезд и галактик в соответствующих объемах пространства — число звезд и галактик в любом объеме достаточно большого размера одинаково, где бы такой объем мы ни выбрали.

Космология указывает нам, что все вещество Вселенной находится в состоянии расширения. Этот вывод тоже относится лишь к крупным объемам, с размером 100—300 Мпс и больше. Внутри же этих объемов звезды и галактики «не замечают» космологического расширения. Никакого собственного расширения, связанного хотя бы как-то с общим расширением мира, не происходит ни в звездах, ни в звездных системах; тем более нет такого расширения и в пределах нашей Солнечной системы.

Астрономические объекты — от планет до скоплений галактик — «забыли», что в далеком прошлом составляющее их вещество было гораздо более плотным и горячим, что оно было тогда почти равномерно перемешано в пространстве и тоже испытывало общее расширение. Формирование астрономических систем требовало в первую очередь подавления этого общего расширения в соответствующих объемах среды. Единственной силой, способной это сделать, является сила тяготения, собственная гравитация вещества Вселенной.

Сила тяготения всегда и везде стремится сблизить тела или частицы вещества. Она действует во всей Вселенной, и потому еще со времен Ньютона ее называют всемирной. Мы не знаем, почему происходит общее разбегание космических систем, но не сомневаемся, что с самых первых мгновений космологического расширения всемирное тяготение мешало расширению, тормозило его. Остановить расширение всей Вселенной тяготение не смогло — слишком сильным был начальный разгон; тяготению удалось сделать это только для ограниченных, хотя и очень больших по размеру и массе объемов мира.

Можно думать, что возраст Галактики как звездной системы близок к возрасту ее самых старых звезд, оцениваемому в 10—12 миллиардов лет. Вероятно, процесс формирования наблюдаемых астрономических тел начался 12—15 миллиардов лет назад, в эпоху, когда от начала расширения протекло приблизительно от 1 до 3 миллиардов лет.

Но с чего это началось — с самых малых или с самых крупных тел? Многое указывает на то, что первыми

«отключились» от космологического расширения огромные массы вещества, сравнимые с массами скоплений и сверхскоплений галактик. Затем развивался процесс дробления этих масс и внутри них постепенно сформировалась вся иерархия астрономических систем. Это точка зрения Я. Б. Зельдовича. Основанная на ней картина формирования крупномасштабной структуры Вселенной представляется сейчас наиболее убедительной и подробно разработанной. Мы расскажем о ней далее.

Другая точка зрения предполагает возникновение сначала каких-то более мелких тел, которые впоследствии скучиваются и образуют тела большего масштаба. Такая идея развивалась Дж. Пиблсом и Р. Дикке. Они предполагали, что первыми объектами во Вселенной могли быть тела с массами около миллиона масс Солнца; постепенно объединяясь, они образовывали галактики, а объединение галактик давало их скопления. Некоторые из первоначальных тел сохранились до сих пор и представляются нам шаровыми звездными скоплениями, известными и в нашей Галактике, и в других галактиках.

ГРАВИТАЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Роль собственного тяготения среды в формировании астрономических тел ощущалась задолго до современных космогонических исследований. И здесь первым был Исаак Ньютон.

10 декабря 1692 г. Ньютон писал Ричарду Бантли, ректору Тринити Колледжа в Кембридже: «Мне кажется, что если бы вещество нашего Солнца и планет и вообще все вещество Вселенной было бы равномерно распределено по всему пространству небес, а каждая частица вещества испытывала бы врожденное тяготение ко всем остальным, и полный объем пространства, в котором рассеяно это вещество, был бы конечным, то вещество с краев этого объема стремилось бы благодаря тяготению ко всему тому веществу, что в середине, и потому падало бы к центру этого пространства и составило бы там единую большую сферическую массу. Но если бы это вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не слилось бы в единую массу; какая-то его часть сгущалась бы в одну массу, а другая в другую, так что возникло бы бесконечное число больших масс, разбросанных по всему этому бесконечному пространству на большие расстояния друг от друга. И так могли бы образоваться Солнце

и неподвижные звезды, если предположить еще, что по своей природе это вещество было светящееся. Но вот каким образом вещество могло бы разделиться на две части и та, что годится на это, слилась в светящееся тело, тогда как другая осталась темной или превратилась в темную, когда первая осталась неизменной,— это уже, на мой взгляд, нельзя объяснить одними только естественными причинами и я должен приписать это мысли и деянию исполненного волей Творца».

В этом знаменитом космогоническом наброске Ньютон разделяет проблему на то, что подлежит и что не подлежит научному исследованию и объяснению. К последнему он отнес вопрос, почему звезды (светящееся вещество) светят, а планеты (темное вещество) — нет. Это действительно трудный вопрос, и только через два с половиной века после Ньютона источник светимости звезд и Солнца был, наконец, понят и объяснен, но для этого понадобилось сначала создать ядерную физику вместе со специальной теорией относительности и квантовой механикой.

Однако первая сторона проблемы — формирование небесных тел из однородного вещества — оказалась у Ньютона принципиально раскрытой. Значительна прежде всего сама идея эволюции Вселенной, подчиняющейся естественным физическим законам. Это сейчас мы впрямую наблюдаем эволюционные процессы в астрономии на различных уровнях — на поверхности Солнца, в кометах, в звездах и пульсарах, ядрах галактик. Но во времена Ньютона не было никаких фактических указаний на что-либо подобное. Идея и механизм космической эволюции родились из открытого Ньютоном закона всемирного тяготения и оказались определяющими для всего дальнейшего развития космогонии. Тяготение формировало космическую структуру, а ее усложнение и дифференциация дали начало эволюции совсем иного рода, в результате которой материя, существовавшая 12—15 миллиардов лет назад в состоянии однородно распределенной по пространству плазмы, достигла высокой организации и во Вселенной возникла жизнь, а потом и разум, изучающий, среди прочего, и свою космическую предысторию.

Механизм формирования небесных тел из однородно распределенного вещества действует у Ньютона благодаря одному лишь тяготению; никакие другие силы, если они вообще имеются, этому не препятствуют. Но в однородном веществе и не должно быть никаких сил, способных действовать против тяготения. Сила давления, например, воз-

никает только при наличии неоднородности, перепадов давления от одного места к другому. И в звезде тяготение действительно уравновешено давлением, ибо звезда неоднородна — в ее центре давление больше, чем у поверхности. Однородная же гравитирующая среда не может находиться в покое — вот исходная мысль Ньютона. Среда не может покоиться, когда в ней действует ничем не уравновешенная сила тяготения. Такое состояние неустойчиво.

Первая попытка развить идею Ньютона была предпринята лишь в начале нашего века Дж. Джинсом. В книге «Астрономия и космогония» Джинс приводит знаменитое космогоническое письмо Ньютона (мы цитировали его выше именно по этой книге) и ясно указывает, что ключевой механизм формирования небесных тел — это гравитационная неустойчивость однородной среды.

Этот процесс легко проследить, если представить себе, что в каком-то участке однородной среды ее плотность стала несколько выше. Тогда возросло и тяготение в этом участке. Тяготение стремится сблизить частицы среды и тем самым еще больше увеличить там плотность. Но из-за нового повышения плотности тяготение и само станет еще сильнее и т. д. Раз начавшись, такой процесс сам собою продолжается и развивается, ведя к нарастающим отклонениям от исходного состояния. Явление такого рода и называют неустойчивостью.

Джинс заметил, что фактором, препятствующим развитию гравитационной неустойчивости, является упругость среды: из-за сжатия в данном участке среды возрастает давление и сила давления, появляющаяся из-за разности давления в сгущении и в окружающей его среде, стремится расширить сгущение. Но силы давления уступают силам тяготения, если размер области уплотнения достаточно велик. Это и естественно, так как сила тяготения тем больше, чем больше масса, а следовательно, и размер сгущения. Сила же давления тем меньше, чем больше размер, на котором имеется данный перепад давления.

Критический размер, при котором обе силы — тяготения и давления — сравнимы друг с другом, называют джинсовой длиной. Эта длина тем меньше, чем больше плотность среды, и тем больше, чем выше давление в ней. Такая зависимость от давления и плотности естественна: давление отражает упругость среды, ее способность противостоять сжатию, а от плотности среды зависит сила тяготения. Упругость среды можно характеризовать также и

скоростью звука в ней; джинсова длина прямо пропорциональна скорости звука. Чаще всего критическую длину и выражают через скорость звука: $u/\sqrt{G\rho}$. Здесь u — скорость звука, ρ — плотность среды, G — гравитационная постоянная (напомним ее значение: $G=6,7\cdot 10^{-8}$ см³/(с²·г)).

Если, скажем, плотность среды $3\cdot 10^{-22}$ г/см³, а скорость звука в ней 6 км/с (это условия во Вселенной в эпоху рекомбинации и мы к ним еще вернемся), то джинсова длина составляет $2\cdot 10^{20}$ см. В области такого размера содержится при указанной плотности масса, приблизительно равная миллиону масс Солнца.

Вместе с джинсовой длиной в наших рассуждениях часто будет фигурировать и джинсова масса, т. е. масса вещества в области с размером, равным джинсовой длине, — например, в шаре этого радиуса.

В теории Джинса идея гравитационной неустойчивости возродилась и слишком поздно — через два столетия после Ньютона, — и слишком рано — до космологии Фридмана. У Джинса сжимаются ограниченные участки однородной среды; таких участков может быть сколько угодно, судьба каждого из них не зависит от остальных. Но вся бесконечная однородная среда покоится. Совершенно очевидно, что этот покой невозможен — сила тяготения действует на всю среду в целом и эта сила ничем не уравновешена. Кроме того, как возникла сама эта однородная среда? Что с ней было до начала гравитационной неустойчивости?

На эти вопросы ответила последовательная теория гравитационной неустойчивости, развитая в 1946 г. Е. М. Лифшицем на основе фридмановской космологии. В этой теории детально изучено поведение слабых уплотнений и вообще любых малых возмущений в однородной расширяющейся среде. Открытие реликтового излучения внесло в теорию Лифшица новые важные черты, и сейчас она служит исходным пунктом всех исследований, гипотез, космогонических схем, развиваемых для объяснения природы крупномасштабной структуры Вселенной.

Гравитационная неустойчивость, действующая в однородной расширяющейся среде, проявляется в том, что отдельные области, плотность которых по каким-то причинам оказалась немного больше, чем общая плотность среды, расширяются чуть медленнее, чем среда в целом. Это вызвано, очевидно, тем, что в таких областях тяготение сильнее и потому оно эффективнее тормозит расширение. Хотя плотность областей возмущения, как и среды в целом, убывает со временем, но эти области все больше и больше

отстают от общего расширения и потому различие в плотностях возрастает (рис. 8).

В картине Ньютона (или Джинса), в которой процесс развивается из состояния покоя, области уплотнения сжимаются; в расширяющейся среде области уплотнения продолжают расширяться. Но в обоих случаях первоначальное

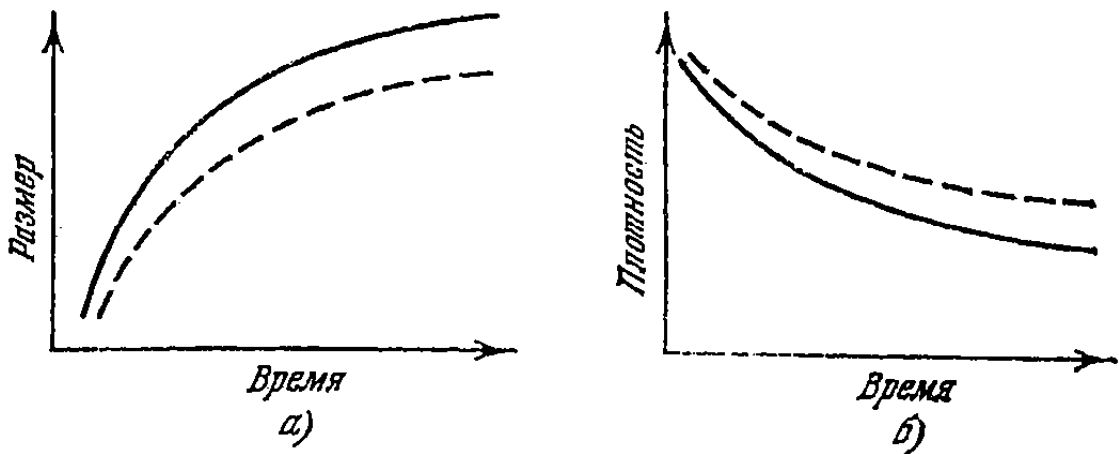


Рис. 8. Гравитационная неустойчивость в расширяющемся мире; а) размер области возмущения (прерывистая кривая) увеличивается медленнее, чем размер такой же области «невозмущенной» среды (сплошная кривая); б) плотность области возмущения (прерывистая кривая) убывает медленнее, чем плотность среды в целом (сплошная кривая).

слабое отклонение от общей плотности среды самопроизвольно усиливается. Можно сказать, что в обоих случаях вещество в области уплотнения приобретает собственные движения и собственную скорость; в картине Ньютона область уплотнения сжимается и собственная скорость — это скорость сжатия; в картине расширяющейся среды собственные движения — это отличия действительных движений в области уплотнения от регулярного расширения всей среды, и собственная скорость — это разность скорости общего расширения и действительной скорости расширения данной области. Собственные движения направлены против общего расширения. В расширяющейся Вселенной гравитационная неустойчивость ведет к усилению слабых возмущений плотности и соответствующих собственных движений.

Постепенное отставание в расширении, торможение расширения в областях уплотнения рано или поздно приводит к тому, что в какой-то момент расширение этих областей вовсе прекращается и они «отключаются» тем самым от общего космологического расширения. Что же касается собственных движений, то такое «отключение» означает, что в областях уплотнения собственные скорости

сравнивались по величине со скоростью регулярного расширения. Все это означает, что слабые в прошлом возмущения превратились в сильные возмущения. При этом в игру вступают новые интересные процессы, о которых мы расскажем ниже.

Теория Лифшица позволяет точно установить, какое время требуется данному возмущению, чтобы превратиться из слабого в сильное. Возмущение плотности характеризуют обычно относительной величиной — разностью плотности в области возмущения и в среде в целом, отнесенной к плотности среды. Эта относительная величина возмущения плотности нарастает пропорционально времени в первый миллион лет от начала расширения, а дальше (после эпохи рекомбинации) — пропорционально времени в степени $2/3$. Если возраст мира изменился в пределах первого миллиона лет, скажем, в тысячу раз, то во столько же раз изменилась и относительная величина возмущения плотности; позднее такое же изменение времени приведет к возрастанию этой величины в сто раз.

Возмущение плотности становится сильным, когда характеризующая его относительная величина приближается к единице, т. е. когда плотность сгущения примерно вдвое превышает плотность среды. По смыслу сказанного выше, в самом начале этой главы, эпоха сильных возмущений — это время обособления первых сгущений, и отвечающий ей возраст мира составляет 1—3 миллиарда лет. Легко подсчитать, что за время от одной секунды *) до трех миллиардов лет относительная величина возмущения возрастет не более, чем в 10^{17} раз.

Такой рост означает, что при возрасте мира в одну секунду в метагалактической среде должны были иметься возмущения, относительная величина которых не меньше, чем 10^{-17} . Теория указывает, таким образом, состояние слабых «затравочных» возмущений в весьма отдаленном прошлом Вселенной; она позволяет судить о том, в какой степени космическая среда была в ту эпоху возмущена. И мы видим, что возмущения плотности при возрасте мира в одну секунду были действительно очень и очень слабыми.

Но вместе с тем они были не так уж и малы. Сравним эти возмущения с тепловыми флуктуациями в среде. Тепловые флуктуации имеются всегда, когда температура

*) Т. е. от эпохи, начиная с которой мы уверенно можем пользоваться для описания Вселенной «стандартной» физикой.

среды отлична от абсолютного нуля. Они возникают из-за того, что хаотические блуждания частиц при их тепловых движениях (вспомним броуновское движение) могут приводить к тому, что в каких-то областях среды плотность частиц случайно повысится, а в других упадет.

Заметим, что в теории Джинса именно тепловым флуктуациям среды отводилась роль исходных «затравок» для гравитационной неустойчивости.

По общим соотношениям термодинамики можно найти характерные величины флуктуаций плотности, охватывающих данное число частиц. Эти характерные величины не зависят от температуры (требуется лишь, чтобы она не была равной нулю) и выражаются только через число частиц, вовлеченных в флуктуацию. Относительная величина такого флуктуационного возмущения плотности равна обратной величине корня квадратного из числа частиц. Пусть мы интересуемся флуктуацией, в которую вовлечено такое число частиц, которое содержится в галактике. В нашей Галактике приблизительно 10^{68} частиц. Относительная величина флуктуационного возмущения плотности составит для этого числа частиц 10^{-34} . Как мы видим, это во много раз меньше *) возмущений, которые должны были существовать во Вселенной при ее возрасте в одну секунду.

Отсюда следует очень важный вывод: исходные возмущения, усиливаемые гравитационной неустойчивостью, должны быть много выше уровня тепловых флуктуаций на протяжении фактически всей эволюции мира, которая вообще может изучаться на основании установленных физических законов. В этом смысле можно говорить об этих возмущениях как о некоей дозвездной, догалактической структуре, существовавшей во Вселенной задолго до звезд и галактик.

Вопрос о природе этой изначальной структуры принадлежит к числу самых трудных в космологии. Поиски подходов к его решению ведутся сейчас на основе новейших идей, объединяющих представления общей теории относительности и квантовой теории. Скорее всего, происхождение первоначальных возмущений обязано тем же процессам, которые вызвали и само космологическое расширение; об этом, однако, мы еще слишком мало знаем.

*) Более аккуратные расчеты только усиливают этот разрыв.

Но замечательно уже и то, что мы вообще можем делать определенные заключения о характере догалактической структуры в столь ранние времена, как первые секунды от начала космологического расширения. Дальнейшая же эволюция структуры вплоть до стадии сильных возмущений может быть изучена с нужной полнотой.

ДОГАЛАКТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Как и в первоначальной теории Джинса, в современной теории гравитационной неустойчивости фигурирует критическая джинсова длина. Она полностью сохраняет свое значение, и даже ее выражение через скорость звука и плотность среды имеет прежний вид (см. выше). Это и понятно; ведь джинсова длина появляется в рассуждениях об относительной роли давления и тяготения в среде, и эти рассуждения столь просты и естественны, что сами по себе и не требуют, собственно, знания общей картины гравитационной неустойчивости.

Очень важным является то обстоятельство, что в расширяющейся среде соотношение между размером области возмущения и джинсовой длиной меняется с течением времени. Мы увидим ниже, что в эпоху до рекомбинации космической плазмы джинсова длина возрастала пропорционально времени, отсчитываемому от начала расширения. Размеры же возмущений росли лишь как корень квадратный из времени, в соответствии с общим законом изменения всех расстояний в расширяющемся мире. (Размеры сгущений, усиливаемых гравитационной неустойчивостью, возрастали и еще медленнее, так как их расширение немного отставало от общего космологического расширения.) Если в какие-то ранние времена размер возмущения превосходил джинсову длину, то позднее он мог оказаться и меньше ее. Тогда гравитационная неустойчивость в этой области прекращалась и, как показывает теория, возмущения масштабов, меньших джинсовой длины, превращались в пульсирующие сгущения и разрежения, подобные звуковым волнам в среде. Амплитуда таких волн не менялась в ходе расширения (до эпохи рекомбинации), а их длины волн возрастали вместе с общим расширением мира.

Космическая среда в первый миллион лет расширения представляла собой смесь плазмы и излучения, взаимодействующих между собой благодаря связывающим их электромагнитным силам. Фотоны преобладали и по

числу, и по плотности. Фотонов во Вселенной приблизительно в миллиард раз больше, чем электронов и протонов. Что же касается плотности, то фотоны не имеют массы покоя и потому их «плотность покоя» равна нулю; однако они обладают энергией, а с энергией всегда связана определенная масса. По формуле Эйнштейна $E=Mc^2$ всякой массе M отвечает энергия E и наоборот, всякой энергии E отвечает масса M ; масса и энергия пропорциональны друг другу и коэффициентом пропорциональности служит квадрат скорости света.

В этой смеси космической плазмы и излучения доминировало излучение, и именно от него зависела упругость среды, давление в ней. Соответственно этому и скорость звука в такой среде определялась излучением, фотонами. В обычном газе скорость звука почти точно совпадает со средней скоростью тепловых движений молекул. В газе фотонов тепловая скорость — это скорость света, с которой движутся все фотоны. По этой причине и скорость звука в газе фотонов (с незначительной примесью плазмы) близка к скорости света: $u=c/\sqrt{3}$.

Зная скорость звука, можно оценить и джинсову длину по общему соотношению, которое было приведено выше: джинсова длина есть $u/\sqrt{G\rho}$. Здесь под ρ нужно понимать полную плотность космической среды — сумму плотностей вещества и излучения. Но мы знаем, что существует простая связь между плотностью мира ρ в данный момент и временем t , протекшим до этого момента от начала космологического расширения: $t \simeq 1/\sqrt{G\rho}$. Сравнение двух соотношений показывает, что в ранней Вселенной джинсова длина возрастала пропорционально возрасту мира. С точностью до не очень существенного численного множителя эта длина представляет собой просто произведение скорости света на время, протекшее до данного момента от начала космологического расширения: ct .

Мы видим, что (с той же точностью) джинсова длина в ранней Вселенной совпадает с расстоянием до горизонта мира: ведь расстояние до горизонта — это путь, проходимый светом за время от начала расширения. В первый миллион лет растущие возмущения в горячей Вселенной выходят своими размерами за горизонт. В сгущении такого размера невозможна причинная связь его краев: один край «не знает», что происходит с другим. Но гравитационная неустойчивость в одинаковом темпе действует во всем объеме сгущения и потому усиливает каждое такое

возмущение как целое. По существу, ситуация здесь та же, что и со Вселенной в целом: размер Вселенной больше расстояния до горизонта, причинная связь с «загоризонтными» ее областями отсутствует, и тем не менее Вселенная как целое расширяется регулярно, одинаково во всех своих областях.

Для исследования гравитационной неустойчивости в ранней Вселенной важно знать, как изменяется от одного

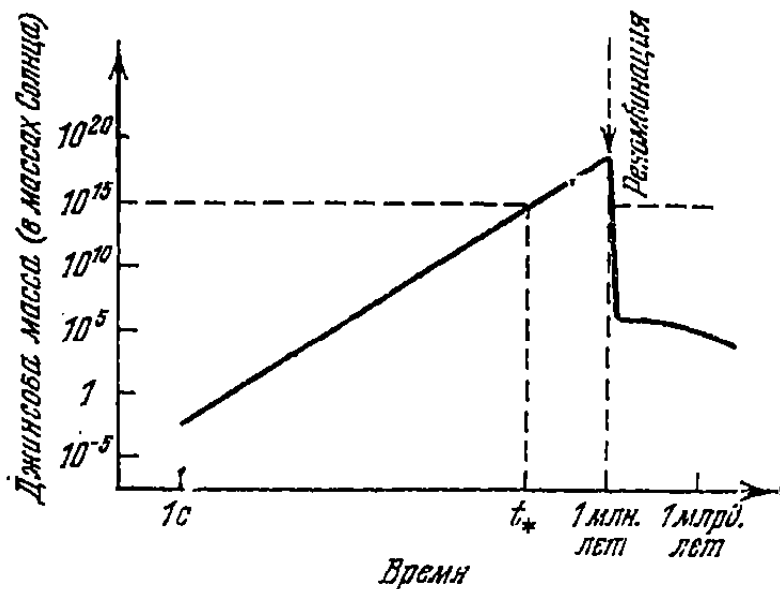


Рис. 9. Джинсова масса в расширяющейся горячей Вселенной. По обеим осям — логарифмическая шкала.

момента времени к другому Джинсова масса, т. е. масса вещества, заключенная в области с размером, равным Джинсовой длине. Джинсова масса представлена на рис. 9. При возрасте мира в одну секунду эта масса относительно мала — меньше массы Солнца. Но она быстро возрастает в ходе расширения и при возрасте мира в один миллион лет составляет огромную величину — 10^{18} масс Солнца, что в тысячу раз больше масс самых крупных скоплений галактик. Под Джинсовой массой мы понимаем здесь именно массу вещества, массу частиц плазмы, заключенных в области с размером, равным Джинсовой длине; сюда не включается излучение — оно все равно потом «улетучится» и галактика или скопление галактик образуются только из частиц плазмы.

Возмущение, включающее в себя столько частиц плазмы, сколько их содержится в крупном скоплении галактик с массой в 10^{15} солнечных масс, почти все время имеет размер, превышающий Джинсову длину (см. рис. 9).

При возрасте мира в один миллион лет произошла рекомбинация плазмы, повлекшая за собой резкое изменение физических условий в метагалактической среде. До этого вещество находилось в состоянии плазмы и

электроны были оторваны от ионов (главным образом, протонов) тепловыми движениями; однако общее охлаждение среды при космологическом расширении постепенно ослабляло тепловые движения. Наконец, температура упала до значения в 3 тысячи градусов, при котором электроны и ионы объединились и образовали нейтральные атомы. Очень важно, что рекомбинация прекращает взаимодействие излучения и вещества, которое теперь становится нейтральным.

После рекомбинации излучение и вещество ведут себя уже независимо друг от друга. Уплотнения в веществе продолжают усиливаться гравитационной неустойчивостью, но соответствующая новым условиям джинсова длина и отвечающая ей джинсова масса резко падают (см. рис. 9). Это связано с тем, что теперь уже не фотоны, а собственная упругость газа определяет скорость звука в нем. При температуре в 3 тысячи градусов она составляет приблизительно 6 километров в секунду. Плотность мира в эпоху рекомбинации оценивается величиной $3 \cdot 10^{-22}$ г/см³. Мы уже делали оценку джинсовой массы для таких значений скорости звука и плотности среды и нашли ее равной миллиону солнечных масс. Падение джинсовой массы при рекомбинации от значения в 10^{18} до значения 10^6 масс Солнца и показано на рис. 9.

В послерекомбинационную эпоху возмущения в масштабах, превышающих по массе миллион масс Солнца, развиваются гравитационной неустойчивостью в одинаковом темпе. Это иллюстрирует рис. 10, на котором показано изменение со временем относительной величины возмущений плотности в масштабе с массой 10^{15} солнечных масс, соответствующем скоплению галактик.

В тот промежуток времени, когда гравитационная неустойчивость в данном масштабе не действует, сгущение испытывает, как мы уже говорили, колебания плотности, амплитуда которых остается постоянной; это и показано на рисунке.

Крупномасштабные возмущения обладают преимуществом — они практически не подвержены действию диссипативных процессов. Диссипативные процессы — это вязкость и теплопроводность среды, стремящиеся сглаживать любые возмущения в среде и переводить в тепло связанную с ними энергию собственных движений. Эти процессы не действуют на общее космологическое расширение, так как оно оставляет среду однородной и не вызывает в ней скольжения одних слоев по другим. Но возмущения плот-

ности могут испытывать их действие. Действие теплопроводности очень существенно в ранние эпохи космологического расширения.

В дорекомбинационную эпоху, когда вещество и излучение тесно связаны между собой, они ведут себя как единая среда. В возмущениях плотности, усиливаемых гравитационной неустойчивостью, участвуют вместе и

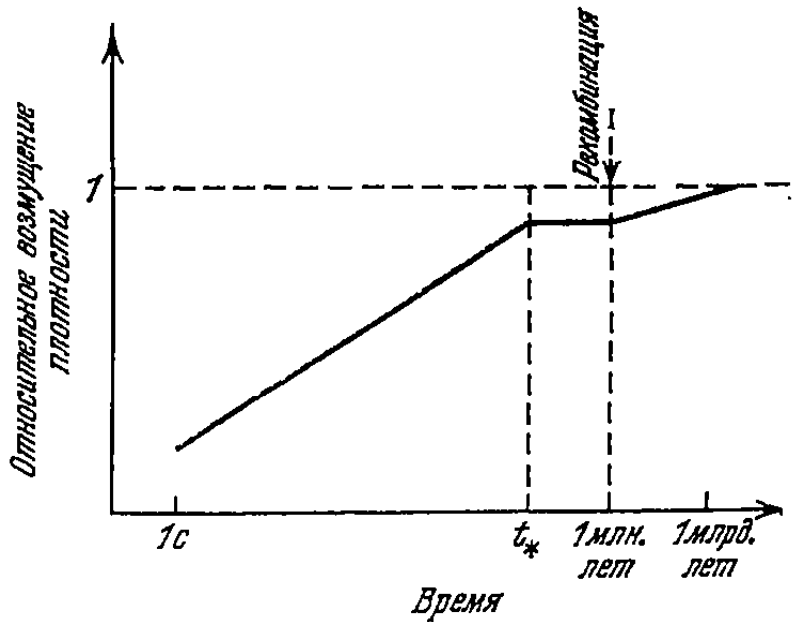


Рис. 10. Рост возмущений в горячей Вселенной. Относительное возмущение плотности растет со временем, когда масса возмущения превышает джинсову массу. Если масса меньше джинсовой, возмущение плотности не усиливается; оно имеет характер звуковых колебаний с постоянной амплитудой. Здесь не учитывается затухание возмущений в масштабах, меньших масштаба самых крупных скоплений галактик; — см. текст. По обеим осям — логарифмическая шкала.

частицы плазмы и фотоны излучения. Такие совместные возмущения плазмы и излучения принято называть адиабатическими возмущениями. В адиабатических сгущениях плотность и температура выше, чем в окружающей среде. Но перепад температуры вызывает, как всегда, поток тепла из более нагретой области в более холодную. Перенос тепла, т. е. теплопроводность в среде, представляющей собой смесь плазмы и излучения, осуществляют лучше всего фотоны: они просачиваются из области сгущения наружу, унося тем самым из сгущения его избыточное тепло. То же происходит и с частицами плазмы, но фотонная, или, как говорят, лучистая, теплопроводность эффективнее: во-первых, фотоны преобладают над частицами плазмы и по числу и по плотности; во-вторых, фотонам легче покинуть область сгущения, чем электро-

нам или ионам. Уходящие из области сгущения фотоны увлекают за собой также и электроны и ионы, и поэтому происходит общее рассасывание сгущения.

Как показали Дж. Силк и Г. В. Чибисов, такая лучистая теплопроводность сглаживает перепады температуры, а вместе с тем и гасит сами адиабатические возмущения плотности в космической смеси вещества и излучения. Ее действие тем эффективнее, чем меньше масштаб возмущения. Последнее связано просто с тем, что избыточные, «лишние» фотоны быстрее покидают сгущение малого размера, чем сгущение большого размера. В результате к эпохе рекомбинации, когда действие лучистой теплопроводности прекращается, уничтоженными оказываются все адиабатические возмущения, содержащие массы, меньшие, чем 10^{15} масс Солнца.

Это очень важный результат. Он означает, что после первого миллиона лет космологического расширения во Вселенной выживают лишь такие адиабатические возмущения, которые отвечают по массе самым крупным образованиям — скоплениям и сверхскоплениям галактик. В разрабатываемой Я. Б. Зельдовичем и его сотрудниками космогонической теории, основанной на предположении о существовании первичных адиабатических возмущений, этот факт имеет ключевое значение: развитие гравитационной неустойчивости приводит в послерекомбинационную эпоху к обособлению сгущений с массами 10^{15} солнечных масс и более.

ЭНТРОПИЙНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

И все же «условия выживания» возмущений во Вселенной не так суровы, как это может показаться. Дело в том, что совместные возмущения плазмы и излучения (адиабатические возмущения, о которых мы до сих пор говорили) — это только один из двух типов слабых возмущений плотности в ранней Вселенной. Возмущения другого типа затрагивают только частицы: это сгущения и разрежения плазмы на фоне полностью однородного излучения. Такие возмущения, называемые энтропийными, изучали еще в 50-е годы Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский в условиях массивных звезд с большим лучистым давлением. В 1966 г. Я. Б. Зельдович обратил внимание на их важную роль в космологии горячей Вселенной.

Неоднородности плазмы как бы заморожены в «невозмущенный» фон излучения, они не рассасываются и не

усиливаются в течение всего первого миллиона лет, пока вещество остается ионизованным и тесно связанным с излучением их электромагнитным взаимодействием.

Так как концентрация фотонов не испытывает возмущения и одинакова внутри сгущений и вне их, никакого потока фотонов от сгущения наружу, естественно, нет, и потому лучистая теплопроводность здесь не действует. Только в самых малых по размеру возмущениях происходит постепенное расплывание сгущений плазмы; но таким путем могут исчезнуть сгущения лишь с массой около одной массы Солнца, а все сгущения большего масштаба остаются к эпохе рекомбинации совершенно неизменными. Точнее, нужно сказать, что неизменным остается относительное возмущение плотности, т. е. не меняется отношение избытка плотности в сгущении к «невозмущенной» плотности плазмы. Само же сгущение как целое участвует в космологическом расширении и его размер возрастает точно так же, как и все размеры в расширяющемся мире.

Рекомбинация прекращает взаимодействие вещества и излучения и освобождает возмущения вещества из плена излучения. В результате от прежних энтропийных возмущений остаются сгущения нейтральных атомов, которые могут теперь беспрепятственно усиливаться гравитационной неустойчивостью. Для этого нужно только, чтобы размер возмущения превышал джинсову длину. Как мы видели, в эпоху рекомбинации джинсова длина резко падает, и в области сравнимого с ней размера содержится около миллиона солнечных масс.

Гравитационная неустойчивость действует на эти возмущения обычным образом — она стремится замедлить их расширение. Она сообщает возмущениям собственные скорости, которые направлены против скорости космологического расширения. Эти собственные скорости растут со временем, и соответственно сгущения все больше и больше отстают от общего расширения среды.

Собственные движения, наложенные, так сказать, на регулярное общее расширение, можно характеризовать относительной величиной — отношением собственной скорости в данном возмущении к регулярной скорости расширения в том же масштабе. Поведение относительного возмущения плотности и относительной скорости собственного движения в сгущении, порожденном первичными энтропийными возмущениями, показано на рис. 11. До рекомбинации относительное возмущение плотности не

менялось, а собственная скорость в таком сгущении отсутствовала. После рекомбинации начинается рост возмущения плотности и возникает собственная скорость. Обе относительные величины изменяются по одному закону (пропорционально времени в степени $2/3$) после первоначального быстрого «подтягивания» скорости под возмущение плотности.

В 1968 г. Дж. Пиблс и Р. Дикке выдвинули предположение о том, что вся наблюдаемая структура Вселенной

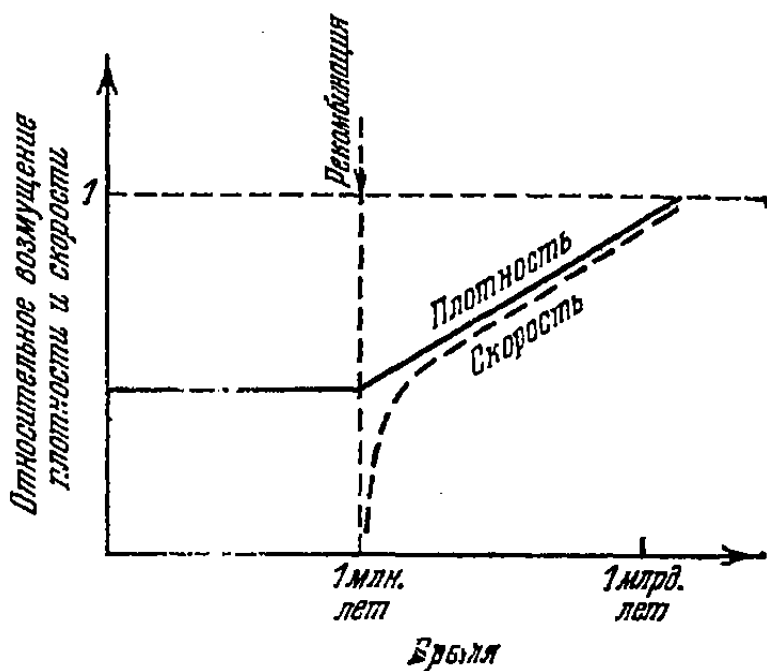


Рис. 11. Относительное возмущение плотности и относительная собственная скорость в энтропийных возмущениях. По обеим осям — логарифмическая шкала.

возникла из первоначальных энтропийных возмущений. Исходя из этого, они разработали довольно детальную картину, представляющую последовательность событий, развивающихся от эпохи рекомбинации до современной эпохи. При этом считалось, что в исходных сгущениях плазмы, «вмороженных» в фон излучения, относительное возмущение плотности было (в среднем) тем больше, чем меньше масса сгущения. Зависимость величины возмущений от их массы или масштаба называют спектром возмущений; если возмущения в больших масштабах слабее, чем в меньших, то говорят, что возмущения имеют падающий спектр.

Падающий спектр возмущений в картине Пиблса и Дикке означает, что первые сгущения, способные выделиться и обособиться, «отключиться» от общего космологического расширения, должны иметь массы, сравнимые с миллионом солнечных масс. Это минимальные по заключенной в них массе сгущения, способные усиливаться гравитационной неустойчивостью после рекомбинации;

исходная же величина возмущения плотности в них больше, чем во всех более крупных по массе сгущениях. Гравитационная неустойчивость превращает эти сгущения в довольно плотные облака, имеющие более или менее правильную сферическую форму.

Дальнейшая эволюция каждого облака сопровождается постепенным охлаждением (преимущественно благодаря возбуждению и высвечиванию уровней энергии молекул водорода, которые, хотя и в небольшом числе, возникают в нейтральном атомарном водороде после рекомбинации). Из-за охлаждения становится возможной фрагментация газового облака на мелкие сгущения — протозвезды. В конце концов облако превращается в скопление звезд, которое по массе, по форме и размерам подобно современным шаровым звездным скоплениям. Как полагают Пиблс и Дикке, именно так и возникли шаровые скопления нашей Галактики и других галактик. (О процессах фрагментации и звездообразования мы рассказываем подробно в главе четвертой.)

Гравитационная неустойчивость, благодаря которой формируются шаровые скопления, действует и в больших масштабах; она развивается в «газе», частицами которого являются сами эти звездные скопления. Из-за этого происходит сгущение шаровых скоплений в галактики, а галактики собираются затем в скопления.

Наблюдательные данные о звездном составе шаровых скоплений указывают на то, что они представляют собой наиболее старые образования во Вселенной. Это обстоятельство и послужило исходным пунктом гипотезы Пиблса и Дикке. Хотя галактики различны по массам, размерам и форме, составляющие их звезды в основном различаются между собой гораздо слабее. Звездное население сферической составляющей нашей Галактики похоже на звезды эллиптических галактик, а население диска Галактики — на звезды неправильных галактик. Сходство между галактиками проявляется также и в том, что во многих из них действительно обнаруживаются шаровые звездные скопления. Шаровые скопления в нашей Галактике населяют сферическую подсистему; их около полутора сотен и все они похожи друг на друга. Шаровые скопления в некоторых близких галактиках весьма сходны с шаровыми скоплениями нашей Галактики.

В картине Пиблса и Дикке универсальность шаровых скоплений и их большой возраст находят прямое объяснение. Однако ряд других важных свойств звездных систем

объяснить на этом пути не удастся. В первую очередь это относится к таким свойствам галактик, как их типичная масса и плотность. Кроме того, в последнее время появились возражения и против исходного пункта всей картины: по мнению астрономов, изучающих шаровые скопления, последние все же различаются по своим свойствам; так, содержание тяжелых элементов в их звездах зависит от положения скопления в Галактике, а в других галактиках химический состав звезд в шаровых скоплениях коррелирует со светимостью и массой галактики. Трудно ожидать, наконец, что чуть ли не все шаровые скопления могли собраться в галактики; скорее многие из них должны были бы остаться в межгалактическом пространстве, чего на самом деле не наблюдается.

Картина Пиблса и Дикке представляет собой пример одной из современных космогонических гипотез. Построенная на основании астрономических данных и физической теории, такая эволюционная схема способна дать представление о возможной последовательности событий, приведших к наблюдаемой космической структуре. Это не единственная гипотеза, а лишь одна из целого их ряда; каждая из таких гипотез выбирает в качестве исходного, ключевого тот или иной астрономический факт или физический процесс, но такой выбор остается неоднозначным. Это относится и к картине сильных гидродинамических движений, которую мы далее подробно рассмотрим (и, скажем сразу, которой мы отдаем предпочтение).

В 1919 г. Джинс писал: «При современном состоянии наших знаний любая попытка диктовать окончательные заключения по основным проблемам космогонии была бы ничем иным, как чистым догматизмом». Астрономические знания с тех пор невероятно возросли, огромные изменения произошли и в теоретической физике, но они не отменили это соображение.

Возвращаясь к энтропийным возмущениям, заметим, что падающий спектр, который приписывали им Пиблс и Дикке, совсем не обязателен. Вполне допустимо и иное предположение, по которому наибольшая величина возмущений плотности приходилась не на самые малые по масштабу сгущения, а, напротив, на сгущения, соответствующие по массе самым крупным астрономическим системам — скоплениям и сверхскоплениям галактик. Тогда именно эти сгущения и выделятся первыми в виде гигантских облаков, распадающихся впоследствии на мелкие фрагменты.

Изучив особенности поведения обоих типов слабых возмущений в ранней Вселенной — адиабатических и энтропийных, — следует поставить вопрос: из чего же в действительности складывалась дозвездная, догалактическая структура? Были ли ее элементами адиабатические или энтропийные возмущения или, может быть, какая-то их комбинация?

На этот вопрос невозможно ответить, исходя только из теоретических соображений. Теория допускает в принципе самые разнообразные варианты космогонических схем, и выбор между ними может быть сделан лишь на основании наблюдательных астрономических критериев. В этом отношении очень важны наблюдательные данные о реликтовом излучении.

Реликтовое излучение «оторвалось» от вещества в эпоху рекомбинации, и потому оно несет к нам картину Вселенной, какой она была в конце первого миллиона лет от начала расширения. Регистрируя реликтовые фотоны, мы «фотографируем» раннюю Вселенную. Можно надеяться увидеть на такой «фотографии» сгущения в разрежения, собственные движения вещества, существовавшие в ту эпоху и давшие затем начало наблюдаемым космическим структурам. Чтобы увидеть это, нужно исследовать распределение по небу интенсивности реликтового излучения. На эту возможность обратил внимание Дж. Силк в 1968 г.

Реликтовое излучение удивительно однородно и изотропно — оно приходит к нам равномерно по всем направлениям. И все же какие-то нерегулярности, вариации обязательно должны иметься; ведь излучение было когда-то прочно связано с веществом, и неравномерности в распределении и движении вещества обязательно оставляли следы в излучении.

В адиабатических возмущениях вещество и излучение участвовали совместно; поэтому естественно ожидать, что адиабатические возмущения оставили следы в излучении в виде хотя бы слабых вариаций его яркости от одного места к другому или, что то же, от одного направления на небе к другому. Можно подсчитать, что возмущения масштаба скоплений галактик создают различия интенсивности фона в направлениях, различающихся по углу на несколько минут дуги.

Поиски «отпечатков» догалактических возмущений в реликтовом излучении пока не дали результатов: реликтовый фон предстает перед нами полностью бесструктурным. Наивысшая чувствительность в наблюдениях реликтового излучения достигнута в 1977—1980 гг. на новом советском радиотелескопе РАТАН-600 (Радиотелескоп Академии наук СССР диаметром 600 м). Как сообщают Ю. Н. Парийский и его сотрудники, если какие-то угловые вариации в интенсивности реликтового фона вообще имеются, они не превышают сотых или даже тысячных долей процента.

Нужно сказать, что ранее теоретики, исходя из представлений об адиабатических возмущениях, предсказывали для угловых масштабов в несколько минут вариации такой величины (десятые доли процента), что они были бы замечены сейчас на РАТАНе.

Отрицательный результат наблюдений не означает полного отсутствия угловых вариаций в реликтовом фоне; чувствительность инструмента устанавливает верхний предел их величины. Чем точнее наблюдения, тем жестче, а следовательно, информативнее такой предел. И теория тем самым не зачеркивается, а получает скорее новый импульс к развитию.

Оказалось, что жесткому наблюдательному пределу могла бы удовлетворить теоретическая схема, в которой догалактическая структура строится не из адиабатических, а из энтропийных возмущений. В отличие от адиабатических возмущений, возмущения этого типа затрагивают в ранней Вселенной только плазму, а излучение остается однородным. Этим и определяется относительная слабость и незаметность следов, которые они способны оставить в реликтовом фоне.

Можно сказать, что наблюдения реликтового фона свидетельствуют в пользу энтропийных возмущений как строительных элементов дозвездной, догалактической структуры Вселенной.

И все же вопрос о типе первоначальных возмущений нельзя считать окончательно решенным. Дело в том, что теоретическая оценка ожидаемого уровня вариаций реликтового фона существенно зависит от того, ... имеют ли нейтрино массу покоя. Такая связь между космологией и физикой элементарных частиц не должна казаться слишком странной. Нейтрино существуют во Вселенной почти в том же количестве, что и фотоны, причем подавляющая их доля имеет, как и в случае фотонов, реликтовое,

космологическое происхождение. Если масса покоя нейтрино отлична от нуля, хотя бы она была и в тысячи раз меньше, чем масса электрона, космические нейтрино дают основной вклад в плотность Вселенной и тем самым определяют поля тяготения — в масштабе мира в целом и в масштабе скоплений галактик. При таких условиях эволюция адиабатических возмущений масштаба скоплений галактик сопровождается лишь очень слабыми вариациями реликтового фона, не нарушающими наблюдательного предела, полученного на РАТАН-600.

ФОРМИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Какова бы ни была природа слабых первичных возмущений в ранней Вселенной, они рано или поздно превращаются в сильные возмущения под действием гравитационной неустойчивости. Независимо от своей предыстории, сильные возмущения — это сгущения вещества, в которых космологическое расширение полностью или почти полностью преодолено их собственным тяготением.

Выше, на примере космогонической гипотезы Пиблса и Дикке, мы описали возможный ход эволюции сильных возмущений, имеющих размер, близкий к джинсовой длине в эпоху после рекомбинации. Соответствующие сгущения были как бы на грани баланса сил давления и тяготения: при размере, равном джинсовой длине, обе эти силы точно сбалансированы, при небольшом превышении размера сгущения над джинсовой длиной гравитация преобладает, но давление все же еще существенно. Именно из-за этого сгущение принимает более или менее сферическую форму, к которой всегда стремится гравитирующий сгусток вещества, если, как, например, в звезде, силы тяготения и давления уравниваются друг друга.

Совсем иначе протекает эволюция сильного сгущения, размер которого значительно превышает джинсову длину. Мы рассмотрим сейчас, следуя Я. Б. Зельдовичу, физические процессы в сгущении с массой, сравнимой с массами самых крупных скоплений галактик. Размер такого сгущения в послерекомбинационную эпоху действительно много больше джинсовой длины (см. рис. 9).

В первую очередь форма сгущения облака большого размера никак не стремится к сферической: сила давления в нем слишком слаба по сравнению с силой тяготения, чтобы было возможно хотя бы какое-то приближение к равновесию и равновесной сферической форме. Наоборот,

если облако, обособившееся от общего космологического расширения, и имело сначала сферическую форму, оно быстро ее теряет. Представим себе, что в какой-то момент расширение данного участка среды остановилось. После этого должно начаться его сжатие — ведь покой невозможен, раз сила собственного тяготения ничем не сбалансирована. Беспрепятственное сжатие под действием собственного тяготения — это, по существу, свободное падение частиц облака в их общем поле тяжести. Но свободное сжатие не может происходить одинаково, в одном темпе по всем направлениям. Любое сколь угодно малое отклонение от равномерности сжатия, а такие отклонения неизбежны, будет усиливаться при сжатии. В самом деле, если скорость сжатия в каком-либо направлении случайно немного больше, чем в двух других, то в этом направлении облако быстрее уменьшается в размере, и потому сжимающая его сила тяготения оказывается в данном направлении больше. Это в свою очередь приводит к еще большему ускорению сжатия в выделенном направлении и, значит, к еще большему уплотнению облака. Поэтому в результате процесса сжатия первоначально более или менее сферическое облако должно неизбежно превратиться в сильно уплотненное образование.

По мере сжатия давление газа, которое сначала не играло никакой роли, постепенно возрастает и в конце концов оно должно было бы остановить сжатие. Однако еще до этого возникает новое явление, радикально влияющее на дальнейшую судьбу облака. Дело в том, что когда скорость падения газа в облаке становится сравнимой со скоростью теплового движения его частиц или, что то же самое, со скоростью звука в среде, а потом и превосходит ее, плавное сжатие газа сменяется образованием так называемой ударной волны. При этом возникает скачок давления, температуры и плотности в сжимающемся газе.

Космическая ударная волна очень сильно отличается по своим масштабам от ударных волн, известных нам на Земле; но по своему физическому существу это явление того же рода, что и ударные волны, возникающие, например, при взрыве, или ударные волны, сопровождающие полет сверхзвукового самолета. Во всех случаях ударные волны возникают при сверхзвуковом движении газа, т. е. при движении со скоростью, превышающей скорости теплового движения частиц среды.

Ввиду важной роли ударных волн в космогонии галактик и скоплений расскажем о них подробнее. Это явление

принадлежит к числу нелинейных гидродинамических процессов, т. е. процессов, в которых возмущения гидродинамических величин уже нельзя считать слабыми. Рассмотрим пример обычной звуковой волны. Это волна возмущений плотности, давления и скорости, в которой места максимальной плотности чередуются с местами, где эти величины минимальны; они распределены периодически и перемещаются в среде со скоростью звука. Расстояние между двумя соседними максимумами плотности называется длиной волны. Это слабое возмущение, в котором относительная величина амплитуды плотности (т. е. наибольшее значение плотности, отнесенное к средней плотности среды) мало по сравнению с единицей. И все же в звуковой волне достаточно большой амплитуды давление и температура в максимумах плотности заметно больше средних величин; вместе с ними в этих максимумах больше и скорость звука. По этой причине гребни волн распространяются по среде несколько быстрее, чем волна в целом. Точно так же в минимумах плотности скорость звука меньше средней, и впадины движутся поэтому несколько медленнее, чем вся волна. В результате гребни будут, так сказать, догонять впадины. По мере приближения гребня к впадине область падения плотности будет становиться все уже, или, как говорят, фронт волны будет становиться все круче (рис. 12). Наконец, в некоторый момент гребень мог бы догнать и даже перегнать впадину — при этом происходило бы то, что можно назвать опрокидыванием фронта*). Однако в действительности опрокидывание не происходит: когда расстояние от гребня до впадины, т. е. толщина фронта волны, становится сравнимой с длиной свободного пробега частиц, возникает ударная волна, в которой уже весь фронт, т. е. узкий слой, в котором происходит резкое изменение гидродинамических величин, распространяется со скоростью, большей скорости звука в среде.

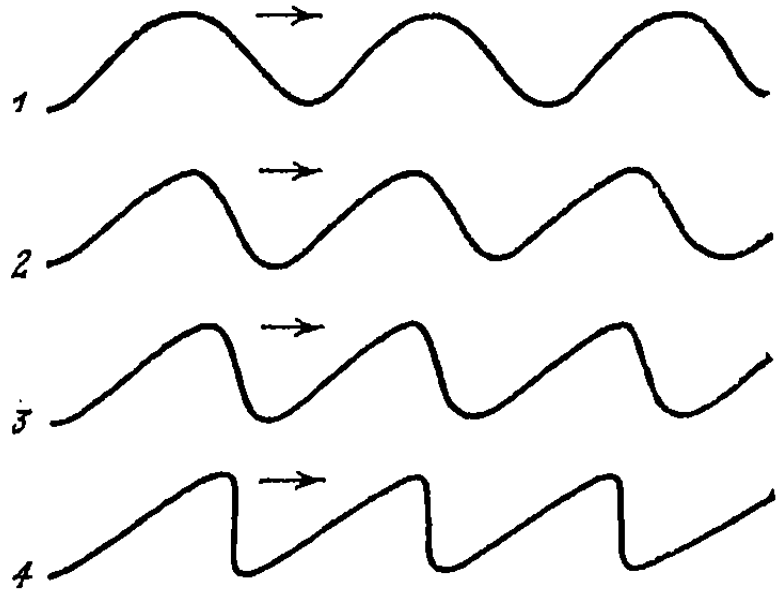
Ударные волны могут возникать не только описанным нами плавным образом, но и, например, при ударе со сверхзвуковой скоростью поршня о газ в цилиндре или при сверхзвуковых столкновениях газовых масс.

Вернемся к ударной волне в сжимающемся облаке — протоскоплении. Она возникает несколько иначе, чем в рассмотренном выше примере звуковой волны. В начале

*) Опрокидывание фронта известно каждому, кто видел волны набегающие на морской берег, — но это волны на свободной поверхности, а не в объеме среды,

сжатия облако было более или менее однородным по плотности; но по мере сжатия и уплотнения его средние слои становятся плотнее, чем наружные слои, и облако оказывается все более неоднородным. Внутренние слои разогреваются при уплотнении и потому в них возрастает давление, обусловленное тепловым движением частиц. Перепад

Рис. 12. Эволюция звуковой волны. Показан профиль плотности в четыре последовательных момента времени. Стрелки указывают направление распространения волны.



давления от самых внутренних слоев к наружным начинает постепенно тормозить сжатие внутренних слоев. Поэтому их свободное падение под действием одной только силы тяжести сменяется более медленным сжатием. Наружные же слои продолжают еще свободное падение и потому постепенно все сильнее «прижимаются» к внутренним слоям. Изменение скорости, а с ней и плотности от слоя к слою происходит при таком сближении слоев на все меньших и меньших расстояниях. При этом разность скоростей двух сближающихся слоев превосходит скорость звука в среде. Рано или поздно все это приводит к явлению, очень похожему на то, о котором мы говорили на примере звуковой волны: по обе стороны среднего слоя возникают резкие скачки скорости и плотности, т. е. образуются две ударные волны, отделяющие сжатый газ внутренних слоев от внешнего «свежего» газа.

С течением времени все большая часть газа сгущения втекает через фронты ударных волн в область между фронтами, испытывая сжатие и торможение. На фронтах ударных волн происходит превращение в тепло части кинетической энергии набегающего снаружи газа. Поэтому сжатый газ нагревается, его температура повышается.

Структура плотного и горячего слоя — протоскопления — детально изучена Я. Б. Зельдовичем и его сотрудниками

ками. В их работах такие слои газа получили название «блинов». На рис. 13 представлено распределение концентрации частиц (т. е. их числа в единице объема) и температуры газа в «блине» с учетом процессов нагрева и охлаждения. Приблизительно половина газа, заключенного

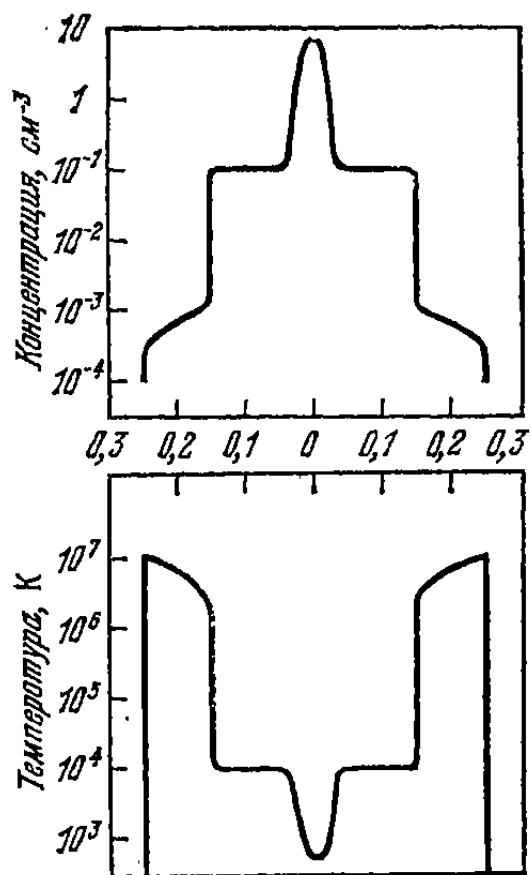


Рис. 13. Распределение концентрации частиц и температуры в слое-протоскоплении в момент, когда между фронтами ударных волн находится половина массы облака — протоскопления. По горизонтальной оси — доля массы облака по разные стороны от центральной плоскости слоя. Фронты ударных волн находятся там, где доля массы до центральной плоскости составляет одну четверть. По вертикальным осям — логарифмическая шкала величин.

между фронтами ударных волн, составляет горячую фракцию слоя, прилегающую к его границам. Температура здесь достигает десятков миллионов градусов; плотность же газа невелика, концентрация частиц составляет 10^{-3} см^{-3} . Внутренний более холодный слой содержит газ с температурой около десяти тысяч градусов и концентрацией в тысячу раз большей, чем в горячем газе. Имеется и сравнительно тонкий слой, где плотность еще в десятки раз больше, а температура соответственно ниже. Слой устроен так, что давление в нем всюду (почти) одинаково, так что произведение температуры на концентрацию (почти) не меняется от центральной плоскости до фронтов ударных волн.

Предполагается, что плотные внутренние области слоя — протоскопления претерпевают фрагментацию и дают начало галактикам, тогда как горячая фракция газа может сохраниться до настоящего времени. Собственное тяготение вещества превращает формирующееся таким путем скопление галактик в гравитационно связанную и стационарную систему. Предполагается также, что при

этом скопление становится постепенно все более сферическим по форме и приобретает вид правильного скопления, подобного скоплению Кома (Волосы Вероники).

В правильных скоплениях имеется более или менее выраженная концентрация галактик к центру. Преобладающий тип их населения — эллиптические галактики. Скопление Кома и некоторые другие крупные скопления галактик обнаруживают рентгеновское излучение. Установлено, что рентгеновские лучи испускаются не галактиками, а межгалактическим газом в скоплениях, причем температура газа достигает десятков миллионов градусов. Описанная картина формирования скопления дает естественное объяснение происхождению горячего межгалактического газа.

Один из центральных моментов этой картины — распад плотных холодных областей и образование из них галактик — находится пока в стадии теоретической разработки, и до сих пор не вполне ясно, распадаются ли эти области на протогалактики или, может быть, возникают сначала отдельные звезды или группы звезд, а они уже потом объединяются в галактики. Сложная гидродинамика формирующихся скоплений активно изучается многими астрофизиками, теория «блинов» служит для этого хорошей основой.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА

Процессы, приведшие к возникновению скоплений галактик, развивались на фоне еще более грандиозной гидродинамики, на фоне движений гораздо большего масштаба, которые формировали сверхскопления, а возможно и наиболее крупные образования во Вселенной — клетчатые, или ячеистые структуры. Сверхскопления представляют собой группы из трех — пяти скоплений различных масс и размеров, изучаемые астрономами в последние 25—30 лет. О ячейках же стало известно лишь в последние три — четыре года.

Трудами советских и американских астрономов было обнаружено, что группы, скопления и сверхскопления галактик расположены преимущественно в сравнительно тонких слоях или даже цепочках. Такова, например, цепочка скоплений галактик в направлении созвездия Персей. Эти слои и цепочки соединяются друг с другом, пересекаются и т. д., образуя ячейки неправильной формы, и всё в целом представляется какой-то квазиупо-

рядоченной структурой, напоминающей пчелиные соты или, быть может, кружева. Размеры ячеек достигают ста мегапарсеков. Их стенки — это сверхскопления весьма уплощенной формы (отношение характерных размеров приблизительно 1:5), внутри же ячеек ни отдельных галактик, ни их групп практически не обнаруживается.

Нужно, правда, сказать, что эти исследования находятся в самой начальной своей фазе; надежно изучено

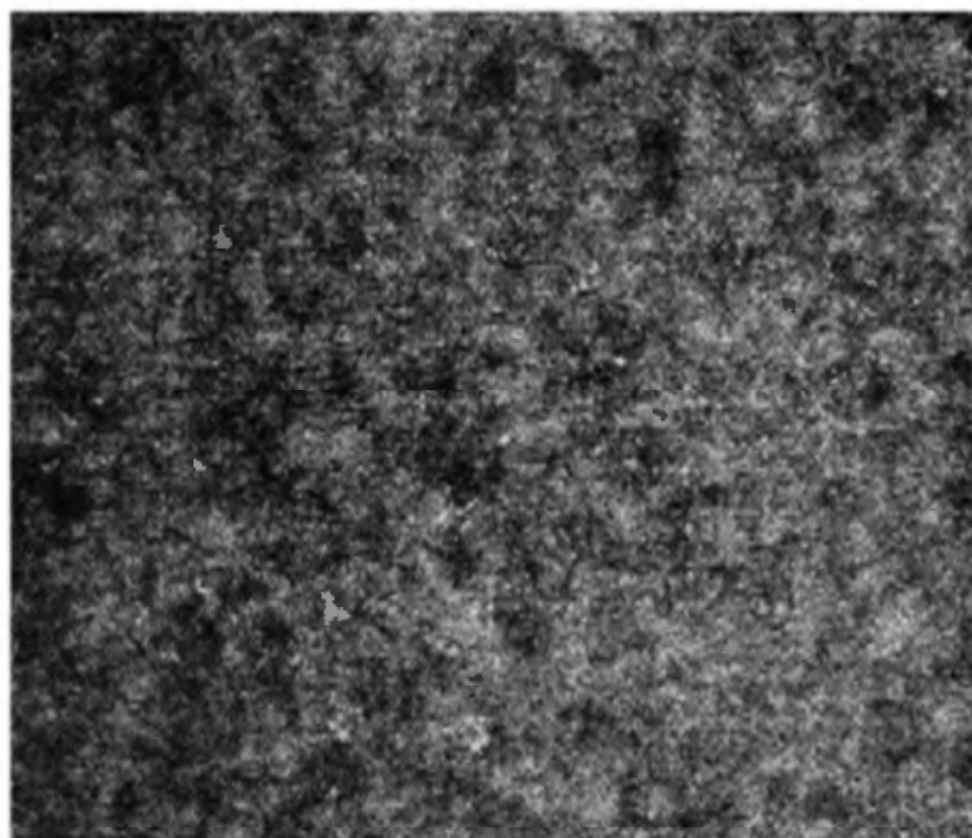


Рис. 14. Картина крупномасштабного распределения галактик (по Дж. Пиблсу).

всего три или четыре примера ячеек, т. е. пустот, ограниченных цепочками скоплений. Среди астрономов нет еще полного единодушия в оценке основных параметров этих систем, иногда высказываются и сомнения в самом факте существования ячеистой структуры. Действительно, пока что в распоряжении астрономов имеется не слишком много фактического наблюдательного материала, иногда сверхскопления приходится выявлять, так сказать, на глазок рассматривая видимое распределение галактик на небесной сфере. На крупномасштабной карте мира галактики выглядят лишь точками и эти точки, в общем, довольно беспорядочно рассеяны (рис. 14). Сверхскопления проявляются на такой карте в виде нитей или волокон. Но давно известно, что человеческому глазу свойственно намечать

линейные последовательности даже в полностью хаотическом распределении точек на плоскости. Чтобы убедиться, что цепочки, ячейки и т. п.—не иллюзия, не обман зрения, потребуется, очевидно, еще очень длительная, кропотливая и тонкая работа по отбору действительных структур, их отделению от кажущихся и мнимых.

Детальную эволюционную теорию, способную объяснить феномен ячеистой структуры, считая, что он действительно существует, предложили Я. Б. Зельдович

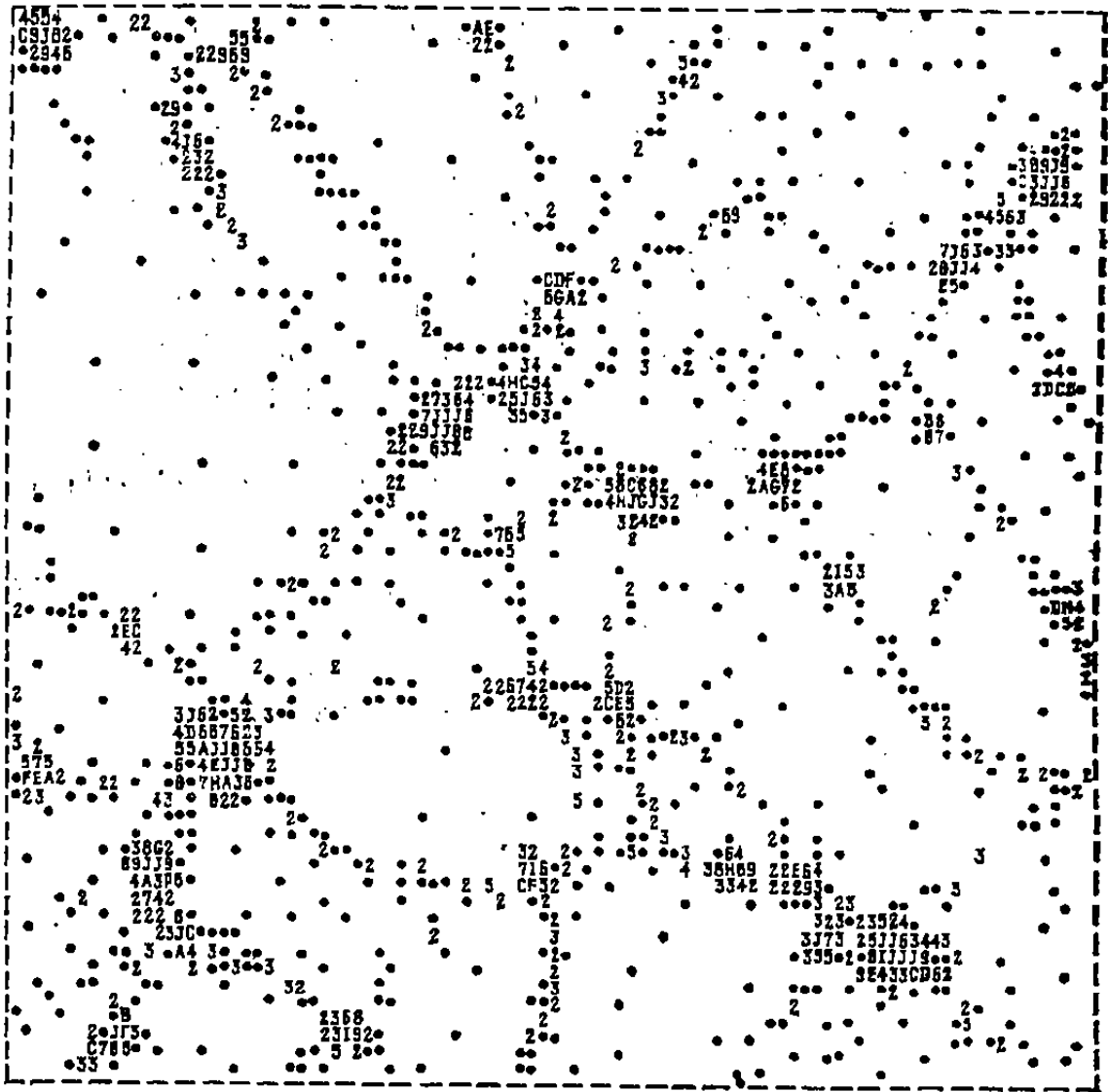


Рис. 15. Ячеистая структура в численном исследовании гравитационной неустойчивости.

и его сотрудники А. Г. Дорошкевич, С. Ф. Шандарин и А. А. Клыпин. Развивая теорию «близов», ее применяют теперь и к изолированным скоплениям и к целым сверхскоплениям, составляющим «стенки» ячеистой структуры. Процесс сферизации в сверхскоплениях происходит, вероятно, медленнее, чем в скоплениях, и потому они сохраняют исходную форму. Теория делает понятным, таким

образом, почему сверхскопления имеют столь значительное уплощение.

Более того, было выяснено, что «блины» формируются не изолированно друг от друга, а всегда во взаимодействии друг с другом, причем они как бы делят между собой все имеющееся вещество. Возникают огромные пустоты, ограниченные стенками — «блинами», которые в совокупности складываются постепенно в нечто, действительно напоминающее ячеистую структуру (рис. 15). Теоретическая модель, служащая основанием этой картины, математически сложна и строится с помощью численного эксперимента на крупной вычислительной машине. В эксперименте отдельные элементы непрерывной среды представляются «тяжелыми точками», которые имеют соответствующую массу и взаимодействуют между собой благодаря взаимному тяготению. Вычислительная машина проделывает расчет движения всей совокупности этих частиц, на основе которого можно судить об эволюции среды от начального состояния слабых возмущений к состоянию сильных возмущений.

Ячеистая структура возникает и в совсем новом варианте теории «блинов», учитывающем возможность ненулевой массы покоя нейтрино. Считается, что сначала формируются сгущения самого большого масштаба, соответствующего сверхскоплениям; захваченный этими сгущениями — уже нейтринными «блинами» — газ испытывает сжатие и нагрев, а потом наступает фрагментация наиболее плотных его слоев на протоскопления и протогалактики. При этом основная масса скоплений связана с нейтрино, а все галактики в них раз в десять легче в соответствии с общим космологическим соотношением между нейтрино и другими частицами.

ЗВЕЗДНЫЕ ВИХРИ

На фотографиях, сделанных с помощью больших телескопов, спиральные галактики выглядят яркими вихрями звездных облаков (рис. 16—18). Такова, например, знаменитая Туманность Андромеды, ближайшая к нам гигантская спиральная галактика (рис. 17). Из светящегося сгущения в ее центре выходят широкие длинные дуги спиральных ветвей, усыпанные яркими звездами.

Приблизительно так же должна выглядеть со стороны с больших расстояний и наша собственная Галактика. О ее спиральном узоре приходится судить лишь по косвенным данным: облака газа и пыли заслоняют от нас звезды галактического диска и только радиомлучение нейтрального водорода, почти не поглощаемое ими, указывает нам на то, что межзвездный газ образует протяженные клочковатые и рыхлые рукава, простирающиеся с расстояний в 3 килопарсека (кпс) от центра Галактики до ее края, т. е. до расстояний в 15 кпс.

Спиральный узор служит для астрономов безошибочным указанием на быстрое вращение галактики. Вернее, быстрым вращением обладают плоские подсистемы галактик, подобные диску нашей Галактики. Сферическая подсистема — гало нашей Галактики и гало других галактик вращаются по крайней мере в несколько раз медленнее, чем их плоские подсистемы — диски. Вращение же дисков в некотором смысле максимально: связанная с ним центробежная сила такова, что она точно компенсируется силами притяжения галактики. При более быстром вращении звезды диска просто разлетелись бы, будучи оторваны от галактики центробежными силами.

Вращение — очень распространенное свойство галактик. Фактически все они так или иначе вращаются. Но эллиптические галактики вращаются не быстрее, чем сферические подсистемы спиральных галактик. Скольнибудь существенное регулярное вращение не заметно и в неправильных галактиках. Только диски спиральных

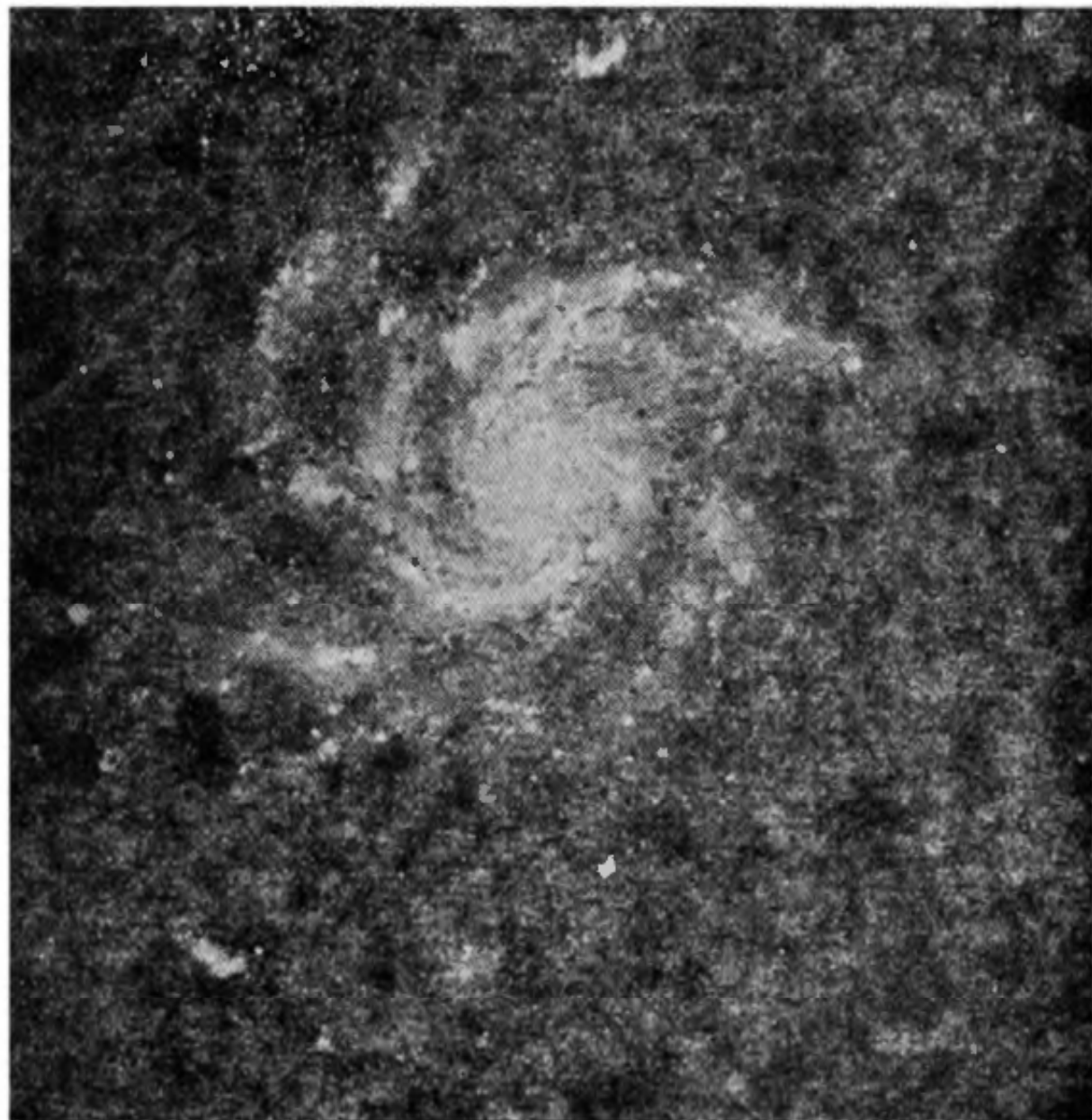


Рис. 16. Спиральная галактика в созвездии Большой Медведицы.

галактик обладают быстрым, предельно сильным вращением. Но зато спиральных галактик больше всего во Вселенной: и по числу, и по сосредоточенной в них массе они превосходят галактики других типов.

Какова же природа вращения галактик? До недавнего времени имелись две гипотезы. Согласно гипотезе К. Вейцеккера, выдвинутой в конце 40-х годов нашего века, вращение галактик имеет космологическое происхождение; оно обязано изначальным вращательным, вихревым движениям космической среды, порожденным в том же процессе, в каком родилась сама Вселенная и возникло ее общее расширение.

В те же годы Ф. Хойл предложил гипотезу приливного происхождения вращения. По его идее, никакого вращения во Вселенной не существовало вплоть до эпохи

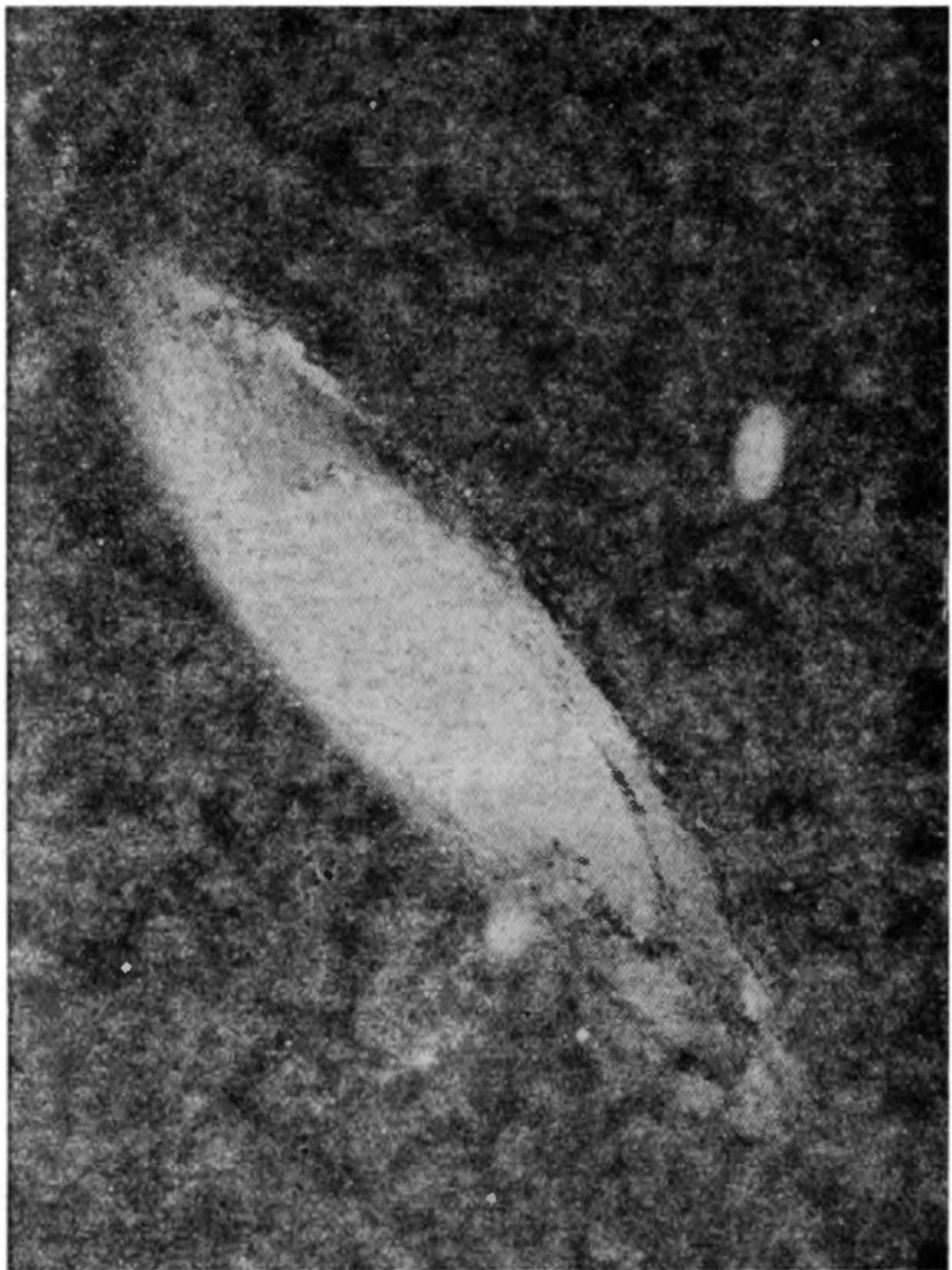


Рис. 17. Туманность Андромеды — гигантская спиральная галактика, вдвое более массивная, чем наша Галактика.

обособления протогалактических облаков. И вот тогда приливное гравитационное взаимодействие этих облаков друг с другом и заставило их вращаться.

Дальнейшее развитие космологии и физики галактик обнаружило слабости и недостатки обеих гипотез.



Рис. 18. Спиральная галактика в созвездии Голчих Псов.

Первая, как выяснилось к концу 60-х годов, приходит в противоречие с картиной горячей Вселенной. Вторая же, хотя она сама по себе ничему и не противоречит, не подтверждается конкретными расчетами: оказалось, что приливное взаимодействие протогалактик слишком слабо, чтобы обеспечить быстрое вращение, наблюдаемое в спиральных галактиках.

В 1970 г. А. Д. Чернин предложил новую гипотезу о природе вращения галактик, согласно которой вращение галактик обязано мощным вихревым движениям, возникшим в разрывных сверхзвуковых движениях метagalактической среды.

В этой главе книги мы расскажем о двух первых гипотезах, представляющих не только исторический интерес, но, что важнее, связанных с глубокими и важными физическими идеями; подробно расскажем о третьей гипотезе, находящей сейчас развитие на основе картины гравитационной неустойчивости в расширяющейся горячей Вселенной. Мы расскажем также о физических механизмах возникновения спирального узора во вращающихся галактиках.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК

Вращение нашей Галактики было открыто в 1926 г., когда Б. Линдبلاد и Я. Оорт установили, что звезды в диске Галактики вращаются вокруг общего центра, расположенного в направлении созвездия Стрельца. Линейная скорость вращения в районе Солнца (вместе с которым и мы вращаемся вокруг центра Галактики) лежит в промежутке между 220 и 250 км/с — точнее определить ее пока не удалось. Вращение других спиральных галактик непосредственно измерено в нескольких десятках случаев; обычно скорости вращения составляют 100—300 км/с.

Линейная скорость вращения непостоянна на разных расстояниях от центра данной галактики. Типичная зависимость скорости от расстояния (в астрономии ее называют кривой вращения) показана на рис. 19. До некоторого радиуса скорость возрастает пропорционально радиусу, и это означает, что соответствующая внутренняя область галактики вращается с постоянной угловой скоростью (как говорят, твердотельно) и с постоянным периодом. После достижения максимума линейная скорость спадает к краю галактики, и там, как оказывается, ее зависимость от радиуса соответствует кеплерову закону (III закону Кеплера): скорость убывает обратно пропорционально корню квадратному из расстояния до центра. Последнее означает, что вращение звезд на периферии происходит в гравитационном поле, создаваемом главным образом массой центральной области галактики, а вклад периферийных масс в это поле не очень существен. На краю

галактики звезды вращаются, как планеты в поле тяготения Солнца *).

Под периодом вращения галактики принято понимать период ее твердотельного вращения, т. е. период вращения внутренней области. По данным Б. А. Воронцова-Вельяминова, периоды вращения всех наблюдавшихся спиральных галактик заключены в сравнительно узких пределах: от 30 миллионов до миллиарда лет.

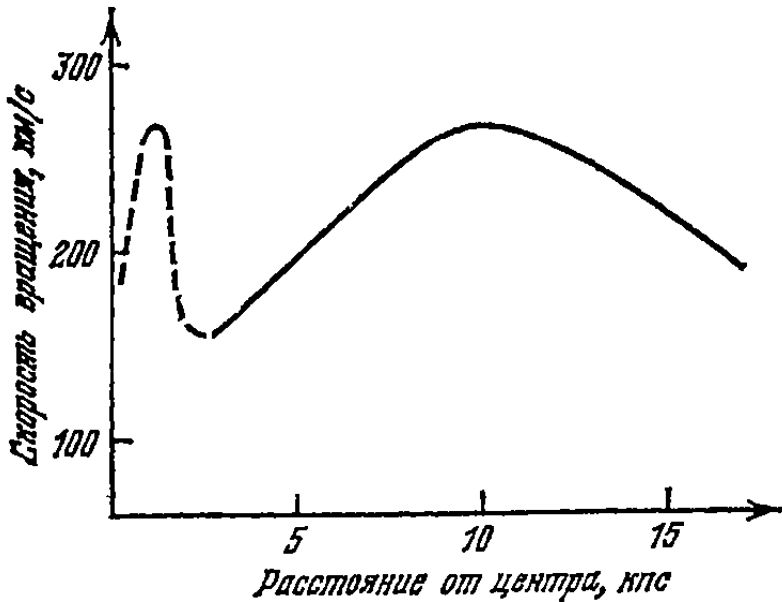


Рис. 19. Типичная кривая вращения для диска гигантской спиральной галактики (прерывистая линия относится к области центрального утолщения).

Распределение галактик по периодам неравномерно: имеется довольно резкий максимум у значения 300 миллионов лет. Если принять это значение периода и взять в качестве типичного возраста спиральной галактики 10 миллиардов лет, то окажется, что за все время жизни спиральные галактики успели совершить всего лишь несколько десятков оборотов.

Вращение галактик можно характеризовать не только скоростью и периодом, но и моментом количества движения **). По величине его можно оценить как произведение массы тела на его размер и линейную скорость вращения. Момент количества движения — величина, сохраняющаяся для изолированного тела (подобно другой сохраняющейся величине — энергии). Для нашей Галактики его можно подсчитать, приняв скорость вращения ~ 300 км/с, размер $\sim 3 \cdot 10^{22}$ см, массу $\sim 10^{44}$ г; это дает приблизительно 10^{74} г·см²/с.

То обстоятельство, что скорость вращения галактики вблизи ее края подчиняется закону Кеплера, позволяет

*) Об исключениях из этого правила см. в главе шестой.

***) Его называют также моментом вращения или угловым моментом.

оценить массу галактики — или, точнее, массу ее внутренней области, которая и создает в основном силу притяжения. Вспомним простые школьные соотношения.

При вращении с линейной скоростью v на расстоянии R центростремительное ускорение составляет v^2/R . Ускорение же силы тяготения, создаваемой массой M , заключенной в пределах радиуса R , есть GM/R^2 . Из равенства обеих величин находим массу $M=v^2R/G$. Если взять в качестве примера нашу Галактику и принять для скорости значение 200 км/с на расстоянии от центра 10 кпс = $3 \cdot 10^{22}$ см, соответствующем положению Солнца, то масса окажется приблизительно равной 10^{44} г, т. е. около 10^{11} масс Солнца, — величина, которая обычно и фигурирует в качестве массы Галактики.

Вращение галактик, не обнаруживающих спиральной структуры, — эллиптических и неправильных, если его и удастся зарегистрировать, всегда оказывается гораздо медленнее, чем у спиральных галактик. Но медленно вращающиеся галактики составляют все же меньшинство в мире галактик: их раза в три меньше, чем спиральных галактик.

ВИХРЕВАЯ КОСМОГОНИЯ

Еще в 1929 г., исследуя образование галактик при гравитационной конденсации, Дж. Джинс предположил, что вращение галактик обязано своим происхождением вращательным, вихревым движениям, существовавшим ранее в той разреженной среде, из которой выделялись протогалактические сгущения. Спиральные галактики — это как бы обособившиеся вихри.

В самом деле, один только вид спиральных галактик определенно подсказывает гидродинамические сравнения, аналогии с вихрями в воздухе или в потоках воды. Конечно, дозвездная, догалактическая среда не очень похожа, например, на земную атмосферу или океан, но в движениях самых разнообразных сред обнаруживаются общие черты, универсальные свойства, знакомство с которыми на каком-то одном примере помогает представить себе в общих чертах и другие случаи. Законы механических движений газовых и жидких масс изучаются гидродинамикой, наукой, возникшей еще в давние времена с наблюдений за текущей водой. Сейчас она превратилась в обширную и сложную науку, применимую ко всем

вообще сплошным средам, но сохранившую, однако, в своем названии первый предмет изучения.

Мы уже не раз говорили в нашей книге о таких гидродинамических движениях, как адиабатические возмущения в метagalактической среде, представляющие собой сгущения и разрежения в смеси излучения и плазмы, о сильных сверхзвуковых движениях, возникающих в результате развития гравитационной неустойчивости. Движения этого типа сами по себе не содержат никакой завихренности: соседние слои среды сближаются друг с другом или расходятся, но никакого вращения друг относительно друга в них нет. Вихревые движения имеют

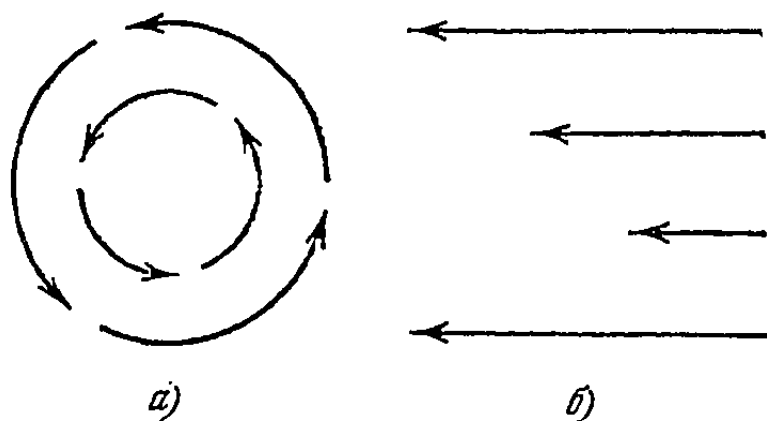


Рис. 20. Два примера вихревых движений. Длина и направление стрелок показывают величину и направление скорости среды.

совсем другой характер. Они могут и не создавать сгущений и разрежений в среде, они совместимы с ее полной однородностью. Кроме очевидного примера общего вращения какой-либо газовой массы (рис. 20, а), присутствие завихренности проявляется и в таких движениях, в которых, скажем, скорость потока меняется поперек течения (рис. 20, б). Щепка, брошенная в такой поток, будет сноситься им не параллельно самой себе, а с разворотом, с вращением.

Очень важным свойством вихревых движений является их «вмороженность» в поток: вихрь, охватывающий данные частицы среды, не переходит от них к другим частицам, а всегда прочно связан с ними и переносится потоком с одного места на другое, только если и сами эти частицы перемещаются.

Традиция применения гидродинамики к проблемам космогонии восходит к истокам науки нового времени, когда ее классики использовали образы космических вихрей и другие гидродинамические идеи и понятия в гипотезах происхождения Солнечной системы. Первым был И. Кеплер; еще в 1609 г. он рисовал Солнце в центре некоего мощного вихря, который разбрасывает планеты

по их орбитам и заставляет их вращаться вокруг Солнца. Р. Декарт, обобщая эту картину на всю Вселенную, писал в 1644 г., что в процессе формирования космических тел мировое пространство было заполнено огромным числом вихрей разнообразной формы и размеров. Эти идеи не прошли мимо внимания Ньютона, хотя он и отнесся к ним критически, высказав подозрение, что космогония Декарта не способна объяснить кеплеровы законы движения планет. Критика Ньютона содержалась в его знаменитых «Началах» (1687 г.), где он писал между прочим, что теория вихрей пренебрегает наблюдаемыми астрономическими явлениями, создает больше проблем, чем объясняет, делает вещи более трудными, а не более легкими и т. п. Для вихрей же самих по себе, как писал Ньютон, нет никаких доказательств существования и, следовательно, их нужно отвергнуть.

Глубокий анализ проблем вихревой космогонии дал позднее И. Кант, а П. Лаплас построил на этой основе свою небулярную гипотезу (1796 г.), которая, по существу, и до сих пор находится в центре космогонических дискуссий, развиваясь и обогащаясь новыми теоретическими идеями и наблюдательными данными. Как говорил А. Пуанкаре (в 1911 г.): «Несмотря на многочисленные возражения, выдвигавшиеся против нее, несмотря на все новые поразительные открытия в астрономии, способные удивить ее творцов, вихревая космогония остается все еще с нами».

ПРОТОГАЛАКТИЧЕСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Идеи космических вихрей распространились с проблемы происхождения Солнечной системы на новую область космогонии — теорию образования галактик. Вслед за Дж. Джинсом, гидродинамику догалактических вихрей исследовал в 1948 г. К. Вейцеккер, привнесший в космогонии концепцию гидродинамической турбулентности, разработанную незадолго до того А. Н. Колмогоровым.

Турбулентность *) — широко распространенное в природе явление, она возникает всегда, когда движения газа или жидкости испытывают запутанные и сложные, хаотические изменения во времени и пространстве. В гидродинамике турбулентное движение, завихренное и бурлящее, противопоставляют слоистому, плавному и регулярному

*) От латинского *turbulentus* — бурный, беспорядочный.

движению, которое называют ламинарным. Турбулентность изучают уже более ста лет, с тех пор как обнаружались казавшиеся тогда непримиримыми противоречия между теоретической гидродинамикой и экспериментами с течением жидкостей и газов. Например, из теории следовало, что при увеличении скорости движения жидкости по трубе сопротивление ее движению должно расти пропорционально скорости (закон Пуазейля). Эксперимент же показывал, что сопротивление растет не как первая степень скорости, а как ее квадрат (закон Шези). Существо дела стало проясняться с 1883 г., когда была опубликована работа О. Рейнольдса, в которой сообщалось о результатах опытов с окрашенными струйками в потоке воды. Рейнольдс установил замечательный факт: движение струек было плавным и регулярным, они оставались всегда четко различными и не перемешивались друг с другом, когда скорость потока была не слишком велика. При больших скоростях (и при тех же прочих условиях в потоке) струйки довольно быстро растворялись и перемешивались, окрашивая более или менее равномерно весь поток. Перемешивание струек означало возникновение при больших скоростях потока нового явления — плавное, ламинарное течение становилось хаотическим, турбулентным. В потоке воды в трубке диаметром 1 см при комнатной температуре такой «срыв» в турбулентность происходит при скоростях, превышающих 30 см/с.

Бурлящий хаотический поток испытывает большее сопротивление, чем плавный и слоистый, и потому было естественно связать результат, который обнаружился в эксперименте, с турбулентным режимом течения. Теоретический же расчет относился к ламинарному течению в трубе и по этой причине был просто неприменим к экспериментальным условиям. Так разрешилось одно из противоречий гидродинамики, послужившее вместе с тем исходным пунктом для развития совершенно нового понятия в механике сплошных сред — понятия турбулентности.

Условия перехода от ламинарного течения к турбулентному изучались экспериментально на многочисленных природных и лабораторных примерах, и оказалось, что дело не в одной только большой величине скорости. При одной и той же скорости и в одинаковых трубах одна жидкость течет ламинарно, а другая турбулентно; турбулентность легче возникает в жидкостях с небольшой вязкостью, а очень вязкие жидкости, например, мед, вообще практически невозможно вывести из ламинарного режима

течения. В уже упомянутой работе 1883 г. О. Рейнольдс дал критерий возникновения турбулентности: произведение масштаба течения (например, радиуса трубы) на скорость должно быть гораздо больше коэффициента вязкости (кинематического) среды. Безразмерную величину, равную скорости течения, умноженной на его масштаб и деленной на коэффициент вязкости, называют числом Рейнольдса. При критическом значении числа Рейнольдса, равном 1000 или 3000, ламинарное течение превращается в турбулентное.

При всей случайности и видимой хаотичности турбулентность в развитом и установившемся состоянии может обладать определенными чертами закономерности. Их не обнаружить в отдельных, единичных вихрях, в которых скорость непредсказуемо меняется от точки к точке и от одного момента времени к другому; черты закономерности имеют статистический характер и проявляют себя в средних характеристиках турбулентных вихрей. Как указал Л. Ричардсон еще в 20-е годы нашего века, турбулентность складывается из совокупностей вихрей, различающихся характерными масштабами и скоростями. Вихри взаимодействуют между собой, обмениваясь энергией, дробятся на движения меньших масштабов или сливаются, образуя вихри больших масштабов. Но при всей случайности единичных движений и их взаимодействий в совокупности вихрей проявляется единая тенденция, стремление установить своего рода каскад вихрей, причем самые большие вихри — по пространственному их размеру и по содержащейся в них кинетической энергии — порождают и питают своим движением вихри меньших масштабов. Когда эта тенденция полностью реализуется, в среде устанавливается универсальное соотношение между средней скоростью и средним размером вихря в турбулентном каскаде: средняя скорость убывает по каскаду сверху вниз пропорционально корню кубическому из размера вихря. Это свойство развитой турбулентности установил в 1941 г. А. Н. Колмогоров.

Пытаясь воссоздать картину Вселенной в эпоху образования галактик, К. Вейцзеккер предположил, что в протогалактической среде существовала турбулентность, охватывавшая массы вещества, сравнимые с массами галактик. Нетрудно оценить скорости и пространственные масштабы соответствующих вихревых движений.

Если некоторая галактика достигла типичной плотности $\sim 10^{-24}$ г/см³, сжимаясь от исходной плотности

$\sim 10^{-27}$ г/м³, характерной для газовых протоскоплений (см. главу вторую), то ее размер в исходном состоянии был, очевидно, в десять раз больше, чем в конечном. Для такой галактики, как наша, это означает, что исходный размер равен приблизительно $3 \cdot 10^{23}$ см. Это и есть пространственный масштаб протогалактических вихрей. Соответствующая скорость может быть найдена, если воспользоваться законом сохранения момента количества движения. Как мы говорили, из этого закона следует неизменность произведения массы тела на скорость вращения и на его размер. Это означает, что при уменьшении размера скорость вращения возрастает обратно пропорционально размеру. Такое возрастание скорости вращения произошло и при сжатии протогалактического облака. Уменьшение размера в 10 раз означает возрастание скорости в том же отношении. Если сформировавшаяся галактика вращается (у своих краев) со скоростью, скажем, 300 км/с, то это означает, что породивший ее вихрь имел в начальном состоянии скорость 30 км/с.

В космогонической картине К. Вейцзеккера вихри играют двойную роль: во-первых, они обеспечивают вращение фрагментов — протогалактик; во-вторых, они способствуют выделению этих фрагментов из непрерывной среды. Вихри как бы наложены на общее космологическое расширение, так что каждый элемент среды участвует сразу в двух движениях — в общем расширении с хаббловской скоростью и в хаотическом вихревом движении со случайной скоростью. Если обе скорости в какой-то области среды сравнимы по величине, то эти движения либо складываются друг с другом, либо вычитаются друг из друга, и можно представить себе, что вихревая скорость в некотором объеме гасит скорость общего расширения, а в соседнем объеме, наоборот, ускоряет взаимное удаление элементов среды. Так в среде появляются сгущения и разрежения; сгущения — это области, в которых общее расширение полностью или частично подавлено, они обособляются из среды и могут дальше уже сжиматься под действием собственного тяготения, еще больше увеличивая свою плотность и превращаясь, таким образом, в протогалактики.

Интересно, что условие сравнимости регулярной и случайной скоростей непосредственно указывает на возраст Вселенной в эпоху образования галактик. Действительно, регулярная хаббловская скорость выражается через возраст мира, т. е. время, протекшее от начала кос-

мологического расширения до данного определенного момента. Скорость космологического разбегания двух элементов среды есть просто расстояние между ними, деленное на возраст мира (с точностью до несущественного множителя, близкого к единице). Если в качестве такого расстояния взять размер протогалактического вихря, а хаббловскую скорость считать равной скорости вращения этого вихря, то из этого легко найти, что возраст мира в эпоху обособления протогалактических вихрей составлял приблизительно 3 миллиарда лет. Возраст современных галактик известен — это 12—15 миллиардов лет; современный возраст мира тогда должен составить 15—18 миллиардов лет. Эта оценка хорошо согласуется со всеми имеющимися данными о возрасте мира.

Стоит заметить, что плотность 10^{-27} г/см³, которую мы приняли для протогалактической среды, приблизительно соответствует тому значению, которое должна иметь средняя плотность мира при его возрасте в 3 миллиарда лет.

В картине Вейцеккера метагалактическая среда считалась холодной и неионизованной, она рассматривалась как газ атомов водорода с температурой не больше десятков или сотен градусов. При таких условиях скорость звука не превышает нескольких километров в секунду. Но это означает, что скорости протогалактических вихрей, — 30 км/с, — были сверхзвуковыми. Вейцеккер и говорит о сверхзвуковой турбулентности в догалактической среде.

Нужно, однако, заметить, что и в 40-е — 50-е годы, когда эта гипотеза развивалась, и сейчас не вполне ясно, что, собственно, нужно понимать под сверхзвуковой турбулентностью. При рассматриваемых условиях критерий Рейнольдса выполняется: вязкость в газе при указанных выше температурах и плотностях такова, что для протогалактических вихрей число Рейнольдса много больше критического значения. Но сам этот критерий, да и вся теория турбулентности развиты только для дозвуковых движений и лишь к ним применимы. Разумеется, это было известно; но, тем не менее, Вейцеккер полагал, что на сверхзвуковую турбулентность распространяются, возможно, закономерности развитой турбулентности и, пользуясь ими, делал оценки параметров спиральных галактик.

Следуя А. Н. Колмогорову, Вейцеккер рассматривал догалактическую турбулентность как совокупность вихрей с установившимися средними характеристиками, с оп-

ределенной зависимостью средней скорости от масштаба вихря, о которой мы уже упоминали. Высказывалась надежда, что, если это верно, то в статистических закономерностях распределения и движения галактик — этих «замороженных» вихрей — могли бы отражаться статистические свойства породившей их турбулентности. В качестве сильного наблюдательного аргумента в пользу завихренного состояния догалактической среды приводился тот факт, что скорости вращения спиральных галактик сравнимы со скоростями их поступательных собственных движений в объеме скоплений. Поступательные скорости отражают динамику скопления как целого, — по ним судят, например, о массах скоплений; вращательные же скорости указывают на развитые вихревые движения в протогалактической среде. Намечался, таким образом, путь, на котором учитывают и активно применяют достижения гидродинамики и, — вспомним упрек Ньютона, — уже отнюдь не пренебрегают наблюдаемыми астрономическими явлениями.

Как это ни называть — турбулентностью или нет, — гидродинамика хаотических сверхзвуковых движений исключительно сложна и потому универсальной и последовательной теории в этой области науки не существует; даже любая частная проблема связана здесь с большим числом трудностей математического и принципиального характера. Список конкретных проблем, из решения которых могла бы сложиться более или менее общая картина «сверхзвуковой турбулентности», был детально разработан Вейцеккером и его сотрудниками, но, несмотря на целое десятилетие интенсивных исследований с участием самых квалифицированных специалистов-гидромехаников, эта программа так и осталась не реализованной.

Этим, однако, проблемы космических вихрей не исчерпываются. Вероятно, наиболее фундаментальной из них является сама природа вихревых движений протогалактической среды, их происхождение в расширяющейся Вселенной.

ПЕРВИЧНЫЕ ВИХРИ?

В 1952 г. Г. А. Гамов, создатель теории горячей Вселенной и, несомненно, наиболее авторитетный космолог того времени, решительно и с энтузиазмом стал на точку зрения вихревой космогонии; он говорил тогда, что в распределении и движении галактик определенно заметны следы догалактической турбулентности, что физика

«сверхзвуковой турбулентности» необычайно интересна и глубока, что на этом пути он видит самые заманчивые перспективы. Что же касается происхождения догалактических вихрей, то Г. А. Гамов высказал предположение, что вихри существуют во Вселенной изначально и имеют ту же природу, что и само космологическое расширение. Так как природа расширения остается, в сущности, неизвестной, то вопрос о происхождении протогалактических вихрей был отнесен тем самым к категории трудных проблем космологии, окончательное решение которых можно ожидать еще очень и очень нескоро.

Но если принять, что вихри сопровождают космологическое расширение «с самого начала», то тогда нужно выяснить, какими они должны были быть в более ранние эпохи расширения, до образования галактик. И здесь немедленно обнаружилось острое противоречие. Дело в том, что скорости вихрей должны падать по мере космологического расширения, и потому существование вихрей со скоростями в несколько десятков километров в секунду при возрасте мира в несколько миллиардов лет требует гораздо более быстрых вращений среды в начале расширения. Это видно опять из закона сохранения момента количества движения, примененного к отдельному вихрю.

Как мы уже говорили, момент количества движения, или вращательный момент, можно по порядку величины оценить произведением массы, охваченной движением, на скорость этого движения и его пространственный масштаб. «Вмороженность» вихря в среду (об этом свойстве вихрей мы упоминали) означает, что суммарная масса частиц, которые он охватывает, не меняется со временем. Величины же скорости и размера должны поэтому изменяться так, чтобы их произведение оставалось неизменным — тогда не будет изменяться и момент количества движения. Отсюда следует, что вихревая скорость падает при расширении обратно пропорционально размеру данного вихря. Размер вихря возрастает в ходе космологического расширения в соответствии с общим законом изменения всех длин и расстояний.

По зависимости скорости от размера вихря легко установить и ее зависимость от плотности в расширяющейся среде: скорость убывает при расширении как корень кубический из плотности. Отсюда появляется возможность находить значение вихревой скорости в отдаленные моменты в прошлом Вселенной, пользуясь теми сведениями о протогалактических вихрях, которыми мы располагаем.

Скорости вихрей в эпоху обособления протогалактик при плотности $\sim 10^{-27}$ г/см³ составляют, как мы видели, приблизительно $3 \cdot 10^6$ см/с. Но отсюда следует, что в более раннюю эпоху, при плотности мира в 10^{12} раз большей, вихревая скорость должна быть равна скорости света $3 \cdot 10^{10}$ см/с (рис. 21). При этом плотность среды остается

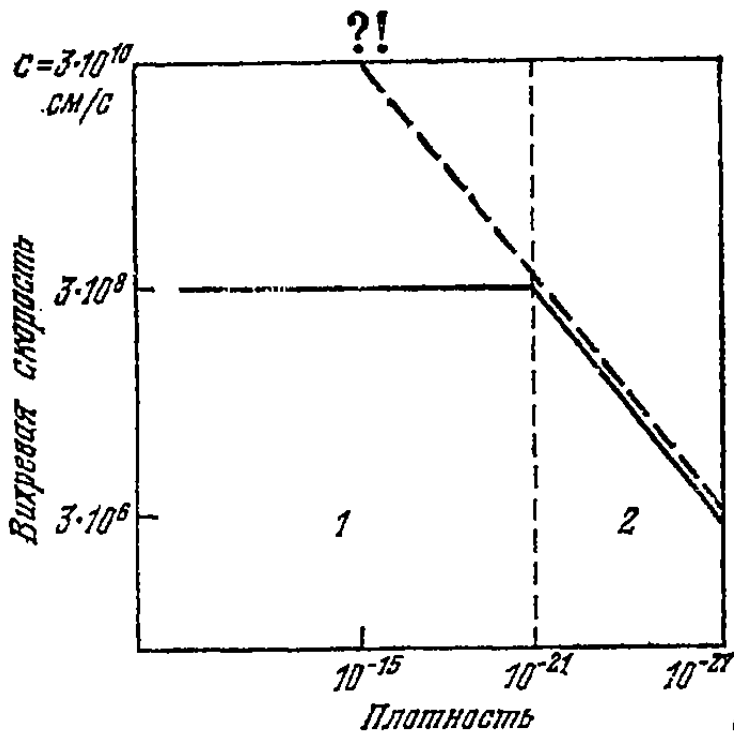


Рис. 21. Изменение вихревой скорости в расширяющейся космической среде. Прерывистая линия — «наивная» теория. 1 — эпоха преобладания излучения, 2 — эпоха преобладания вещества. По обеим осям — логарифмическая шкала.

еще очень малой — 10^{-15} г/см³, и от начала расширения, от космологической сингулярности (на которую все можно было бы «списать») довольно далеко — добрых триста лет.

При еще больших плотностях вихревые скорости оказались бы и вовсе сверхсветовыми, что, конечно, абсурдно.

Этот парадокс ставил, казалось, под сомнение и всю вихревую космогонию Вейцзеккера—Гамова. Однако противоречие исчезло после открытия в 1965 г. реликтового излучения.

Это открытие изменило представление о свойствах метagalактической среды в ранние эпохи. Излучение, газ фотонов был главной компонентой метagalактической среды в течение первого миллиона лет от начала расширения, а «обычное» вещество уступало тогда фотонам по плотности. Гидродинамика фотонного газа (с примесью плазмы) отличается от гидродинамики «обычной» среды, которая имела в виду при изложенных выше рассуждениях. В фотонном газе вихри ведут себя иначе, хотя закон сохранения момента количества движения остается, конечно, в силе.

Дело в том, что масса данной совокупности фотонов, в которые — через связанную с ними плазму — «вморожены»

вихрь, не остается постоянной, а убывает при расширении обратно пропорционально размеру занятой ею области. Но тогда из сохранения момента количества движения следует, что вихревая скорость остается неизменной во всю эпоху преобладания излучения. Значение скорости в раннюю эпоху легко оценить, если учесть, что, начиная с момента, когда плотности обеих компонент космической среды сравниваются (а это происходит, когда они составляют приблизительно $3 \cdot 10^{-22}$ г/см³, и во всю дальнейшую эпоху), справедлива «обычная» связь между плотностью и вихревой скоростью, т. е., что в эту позднюю эпоху скорость убывает как корень кубический из плотности вещества. Тогда в момент равенства плотностей вещества и излучения скорость вихрей равна $3 \cdot 10^8$ см/с, что в сто раз меньше скорости света (см. рис. 21). Таким образом, парадокс сверхсветовых вихрей в горячей Вселенной устраняется.

Но вместе с тем в теории изначальных вихрей обнаружили совсем иные препятствия, одно из которых связано с реликтовым излучением. Скорость вихрей, которую мы только что вычислили, сама по себе не слишком велика, но все же вихри с такой скоростью создавали бы определенные искажения, флуктуации в реликтовом фоне: фотоны, «закрученные» в раннюю эпоху вихревым движением среды, способны сохранить следы этого движения и до сих пор. Поток энергии реликтового излучения, принимаемый радиотелескопами, должен из-за этого мепяться от места к месту по той же причине, о которой мы ранее, в главе второй, говорили в связи с адиабатическими и энтропийными возмущениями. Ожидаемый уровень флуктуаций для скорости вихрей $3 \cdot 10^8$ см/с, согласно расчетам, таков, что на радиотелескопе РАТАН-600 их бы уже заметили. Но, однако, никаких флуктуаций такого рода радиоастрономы не находят.

Другая трудность имеет чисто космологический характер. Изотропная и однородная Вселенная, описываемая моделью Фридмана, принципиально не допускает изначальных вихрей: либо изотропная Вселенная без вихрей, либо вихри, но без изотропии мира. К этому выводу приводит экстраполяция в прошлое вихревого состояния расширяющейся среды. Мы уже видели, что при такой экстраполяции, если учитывать роль излучения в ранней Вселенной, можно избежать парадокса сверхсветовых движений. Имеется и еще одно обстоятельство, с которым неизбежно сталкиваются при попытке «протянуть» завих-

ренность далеко в прошлое. Дело в том, что, глядя назад по времени, мы увидели бы протогалактический вихрь все более и более компактным, так как его размер убывает назад по времени пропорционально всем размерам во Вселенной. Но еще быстрее убывает в прошлое расстояние до горизонта событий. Поэтому, как видно из рис. 22, существует такой момент в прошлом, когда вихрь едва уместится в пределах горизонта; в еще более ранние моменты

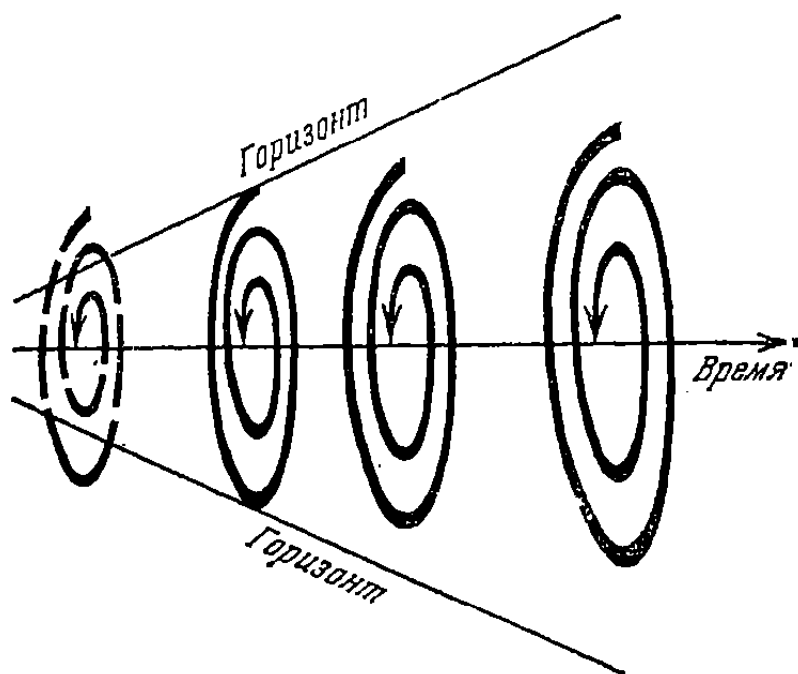


Рис. 22. Вихри и горизонт в расширяющемся мире.

он должен был бы выходить за пределы горизонта. Но такой вихрь неизбежно создает искажения в самой структуре пространства — времени, в геометрии изотропного мира. Чем больше за горизонт выходит вихрь, тем эти искажения значительнее; в пределе, при стремлении ко все бóльшим значениям (математически говоря, к бесконечности), отношения размера вихря к расстоянию до горизонта отклонения от изотропии возрастают неограниченно. Это и означает, что мир с изначальными вихрями не может быть изотропным.

В принципе общая теория относительности допускает и не изотропные (анизотропные) космологические модели, в которых уже нет максимальной пространственной симметрии, лежащей в основе космологии Фридмана. В таких моделях отсутствует равноправие различных направлений в пространстве, так что, например, темп космологического расширения, т. е. скорости взаимного разбегания частиц, различаются в разных направлениях. Вблизи сингулярности в таких моделях расширение идет даже не по всем трем направлениям, а по одному из них происходит сжатие, сближение частиц.

Глубокое изучение анизотропных космологических моделей начато в нашей стране А. Л. Зельмановым еще в 50-е годы. Им были выяснены условия, при которых исходная анизотропия мира сглаживается со временем и Вселенная обретает наблюдаемую в ней сейчас изотропию. Позднее, в 70-е годы, Е. М. Лифшиц, И. М. Халатников и их сотрудники выяснили, что вблизи сингулярности возможно и совсем неожиданное поведение мира: на его общее расширение накладываются еще и колебания. Колебания охватывают попеременно движения по всем трем направлениям. Периоды колебаний уменьшаются по мере приближения к началу расширения, а полное число колебаний возрастает при этом неограниченно.

Анализ эволюции вихревых движений в анизотропных космологических моделях показывает, что вихри легко вписываются, так сказать, в общую динамику анизотропно расширяющейся Вселенной и действительно могут существовать в ней изначально.

Нужно, однако, сказать, что никаких независимых указаний на анизотропное начало расширения до сих пор не известно. Скорее все указывает на то, что Вселенная и в более ранние эпохи была как целое столь же изотропна, сколь изотропна она сейчас. Никакой заметной анизотропии не должно было быть, во всяком случае, при возрасте мира около миллиона лет, в эпоху рекомбинации; об изотропии мира в ту эпоху мы можем уверенно судить по изотропии реликтового излучения, «оторвавшегося» тогда от вещества и свободно распространявшегося до современной нам эпохи. Более того, имеются веские теоретические соображения в пользу изначальной изотропии мира. Развитие представлений о квантовых процессах вблизи сингулярности ведет к заключению, что если сильные отклонения от изотропии и существовали «сразу» после начала расширения, то эффекты рождения частиц уничтожали эти отклонения. Вместе с ними должны «погибнуть» первичные вихри, и все это успевает завершиться очень быстро, уже к эпохе, когда возраст мира не превышает... 10^{-41} секунды.

Наконец, стоит упомянуть и еще об одной трудности картины первичных вихрей. Она связана с поведением вихревых движений в эпоху рекомбинации. Превращение вещества из ионизованного в нейтральное освобождает частицы от связи с фотонами излучения и из-за этого довольно резко падает скорость звука в среде: от значения, близкого к скорости света, она уменьшается до нескольких

километров в секунду. Скорости же первичных вихрей должны быть в эту эпоху по крайней мере в сто раз больше последней величины. Поэтому вихревые движения из звуковых, какими они были «с самого начала», становятся в ходе рекомбинации сверхзвуковыми. Но сверхзвуковые движения должны породить ударные волны, способные сжимать газ. Однако плотность среды в эпоху рекомбинации ($\sim 3 \cdot 10^{-22}$ г/см³) и так уже приблизительно в тысячу раз превышает плотность галактик; поэтому сверхзвуковые вихри масштаба галактик породили бы слишком плотные тела, никак не похожие на реальные звездные системы.

По совокупности всех этих причин идею первичных вихрей приходится, по-видимому, оставить: скорее всего, никаких вихревых движений, рожденных в общем процессе с космологическим расширением, во Вселенной не было.

ПРИЛИВНЫЕ СИЛЫ?

В поисках иных путей Дж. Пиблс проанализировал в 1969 г. с новых позиций идею, которую еще в 40-е годы выдвигал Ф. Хойл. Согласно этой идее вращение галактик могло возникнуть без всяких вихрей, просто за счет гравитационного взаимодействия протогалактических облаков между собой.

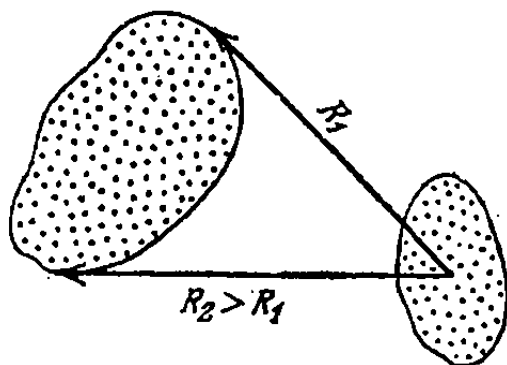
Такой механизм возникновения вращения требует, чтобы протогалактики были несферичными и находились не слишком далеко друг от друга. Сила, действующая со стороны одного тела на другое, различна на разных краях последнего, так как из-за несферичности расстояния до этих краев от центра первого тела различны (рис. 23). Силу, возникающую как разность сил тяготения, действующих на протяженное тело, называют приливной силой. Океанские приливы на Земле вызываются как раз силой такого происхождения, действующей со стороны Луны.

Из-за разности сил возникает вращательный момент, который поворачивает облако, «раскручивает» его. Обратное влияние первого тела на второе приводит к тому же эффекту, так что оба облака получают вращение. Разумеется, закон сохранения момента количества движения при этом не нарушается: так как тела взаимодействуют друг с другом, то сохраняется, очевидно, не момент каждого тела по отдельности, а сохраняется полный момент пары протогалактик, складывающийся из их собственных вращательных моментов и моментов, связанных с орби-

тальным движением облаков друг относительно друга. При этом протогалактики могут получить как антипараллельное, в разные стороны, вращение, так и параллельное вращение, в одну сторону.

Весь вопрос в том, будет ли это вращение таким быстрым, каким мы его наблюдаем. Детальные расчеты, сделанные Пиблсом, а потом и другими теоретиками, показывают, что вращательный момент, приобретаемый галактиками вследствие приливного взаимодействия, даже при

Рис. 23. Приливное взаимодействие протогалактик.



самых благоприятных условиях, раз в 5—10 меньше реального момента спиральных галактик.

Остается заключить, что приливное взаимодействие протогалактик неэффективно, оно не могло быть ни главным, ни тем более единственным фактором, обеспечившим быстрое вращение галактик.

РОЖДЕНИЕ ВИХРЕЙ

Соображения Джинса, Вейцеккера, Гамова о завихренном состоянии догалактической среды, очевидные гидродинамические аналогии, о которых мы упоминали, — все это слишком впечатляюще, привлекательно и наглядно, чтобы оказаться полностью неверным. Но обязательно ли при этом считать протогалактические вихри изначальными?

В гидродинамике существует строгая теорема, теорема Кельвина — Гельмгольца, запрещающая, при точно сформулированных условиях, рождение и уничтожение вихрей. У Вейцеккера и Гамова молчаливо предполагается, что условия теоремы Кельвина — Гельмгольца выполнялись во Вселенной всегда. Если так, то вихри, существовавшие в космической среде в эпоху формирования галактик, должны были существовать в ней «с самого начала», — иного варианта нет.

В действительности картина гидродинамических движений в расширяющейся горячей Вселенной гораздо богаче и разнообразнее, чем это предполагалось в 40-е — 50-е годы. Самое яркое явление в ней — возникновение огромных по пространственному масштабу ударных волн, сжимающих массы вещества в слои — протоскопления.

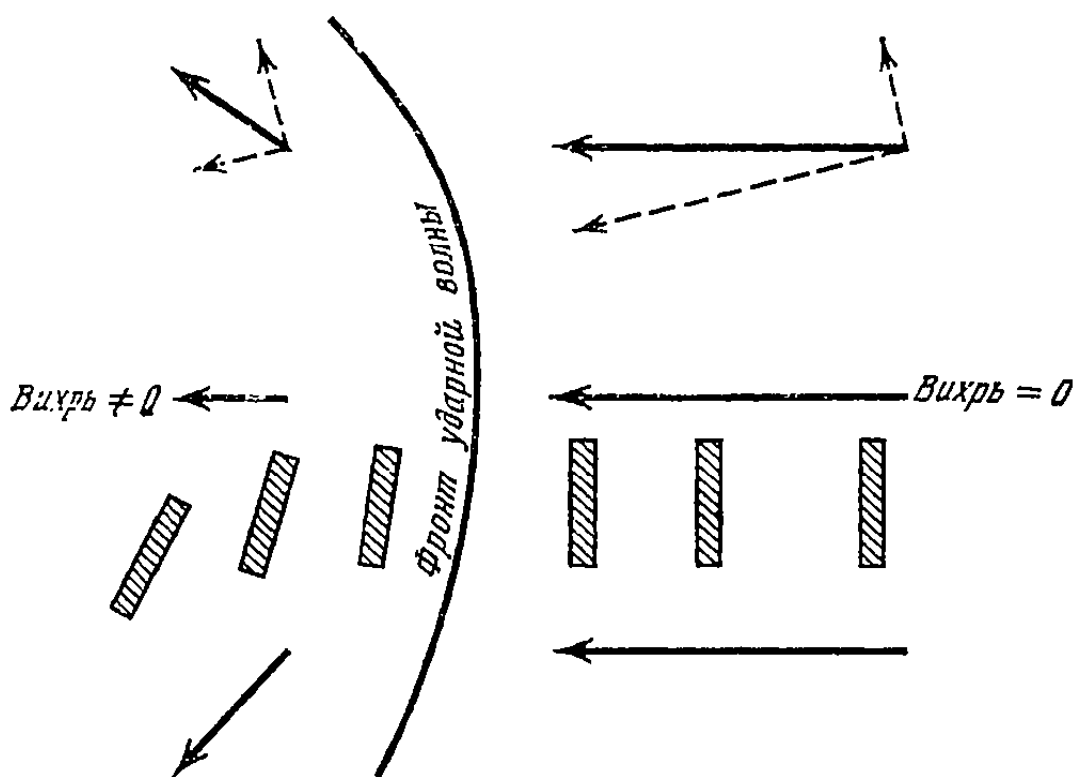


Рис. 24. Рождение вихря в потоке, пересекающем фронт ударной волны. Скорость газа показана стрелками, длина и направление которых отражает их величину и направление.

Ударные волны возникают при возрасте мира приблизительно 3 миллиарда лет и появляются как неизбежный результат развития гравитационной неустойчивости, охватывающей массы вещества, сравнимые с массами самых крупных образований во Вселенной.

Но столь же неизбежно появление в эту эпоху и мощных вихревых движений.

Дело в том, что одно из условий, гарантирующих сохранение или невозникновение вихрей в теореме Кельвина — Гельмгольца, — это отсутствие разрывов в гидродинамических движениях. А ударные волны представляют собой разрывы в скорости, плотности и давлении среды.

Проиллюстрируем возникновение вихря в ударной волне простым примером. Пусть имеется параллельный поток газа, набегающий на фронт ударной волны. Пусть, далее, этот фронт является не плоским, а искривленным, например, выпуклым в сторону потока, как это показано на рис. 24. На фронте ударной волны скорость потока умень-

шается скачком. Точнее, скачок претерпевает перпендикулярная к фронту компонента скорости, а касательная компонента остается той же — это общее свойство ударных волн. В сильных ударных волнах, в которых скорость натекания на фронт гораздо больше скорости звука в газе, перпендикулярная к фронту компонента скорости уменьшается в четыре раза. В результате параллельный, и потому, конечно, безвихревой, поток газа превращается за фронтом в расходящийся. Представим себе «щепку», брошенную в такой поток: до фронта она сносилась бы потоком просто параллельно самой себе, а за фронтом она еще и поворачивалась бы. Это вращение — признак завихренности, которую поток приобрел, пройдя через фронт ударной волны.

Появление вихря не противоречит закону сохранения момента количества движения, или момента вращения, — полный момент потока как был, так и остался равным нулю. До фронта момент каждого элемента среды равнялся нулю; после прохождения фронта отдельные элементы получают момент вращения, но в разных частях потока (на нашем рисунке выше и ниже средней линии потока) момент отдельных элементов имеет разный знак, так как направления поворота потока противоположны; в результате сумма моментов оказывается равной нулю.

Этот механизм возникновения завихренности — только один пример из широкого многообразия процессов, которые способны эффективно развиваться в крупномасштабных движениях метagalacticкой среды и обеспечивать протогалактические сгущения достаточно быстрым вращением.

Представим себе ударную волну крупного масштаба, благодаря которой формируется массивное протоскопление — «блин». Если фронт ударной волны не искривленный, а плоский, на нем все равно могут рождаться вихри; это происходит тогда, когда в набегающем на фронт газе имеются возмущения — сгущения и разрежения, т. е. какие-то сравнительно малые и еще рыхлые облака, обладающие собственным движением. В отличие от нашего первого примера, пространственный масштаб образующихся вихрей соизмерим теперь не с масштабом всего потока (т. е. с его поперечным размером), а соответствует размерам психодных облаков — возмущений. Если возмущения охватывают массы, сравнимые с массами отдельных галактик, то сгущения такого масштаба, после прохождения через фронт, уплотняются и могут затем превратиться в

протогалактики. Завихренность, которая появляется у них при пересечении фронта, создает вращение протогалактических облаков.

Процесс взаимодействия слабых возмущений сравнительно малого масштаба (меньшего, чем масштаб всего движения, формирующего ударную волну) изучается в гидродинамике уже несколько десятилетий. Впервые проблема возникла в далекой от астрофизики области — в теории полета сверхзвукового самолета. Разгоняясь до скорости, превышающей скорость звука в воздухе, самолет «толкает» и сжимает прилегающие к его носовой части слои газа, и перед ним возникает ударная волна, фронт которой отделяет сжатые слои от внешнего несжатого воздуха. Этим определяется и сопротивление воздуха самолету и, в сущности, вообще вся динамика сверхзвукового полета. Очевидно, что при этом очень важно знать, как влияют на носовую ударную волну разного рода неоднородности в воздухе, возмущения в его плотности и давлении. Такие возмущения создает и сам самолет: его двигатель шумит, т. е. возбуждает в воздухе звуковые волны. Эти волны могут догнать фронт ударной волны, так как относительно сжатого газа фронт распространяется с дозвуковой скоростью. Но далее за фронт они не могут выйти: ведь по невозмущенному газу фронт распространяется со скоростью, большей скорости звука в этом газе. Будут ли звуковые волны «застрывать» на фронте и, пакаясь, разрушать его, или, может быть, они отразятся от фронта, как мячик от стенки, и побегут обратно? Оказывается, что происходит именно отражение, возникает эхо, и звуковые волны возвращаются назад, не причиняя ударной волне никаких разрушений.

Многие черты этой картины проявляются и в гидродинамике догалактической среды: ведь и в ней имеются сильные возмущения — ударные волны масштаба скопления галактик — и слабые сгущения и разрежения, подобные звуковым волнам, возмущения масштаба галактик. Возмущения могут догонять фронт ударной волны или падать ему навстречу. В первом случае, при взаимодействии вдогонку, звуковая волна, как мы уже говорили, не выходит за фронт; можно сказать, что звук не преломляется, а только отражается от фронта (рис. 25, а). Во втором случае, при падении навстречу фронту, звуковая волна проходит за фронт, изменяя направление распространения, т. е. испытывая преломление. Отражения же в этом случае нет: звук не может отразиться и «убе-

жать» от фронта, так как сам фронт движется по газу быстрее звука. Можно сказать и иначе: газ, по которому навстречу фронту распространяется звук, патекает на фронт со сверхзвуковой скоростью, и не давая звуку отразиться, увлекает его за фронт (рис. 25, б).

В этих процессах взаимодействия возмущений с фронтами ударных волн нас интересует, конечно, не столько влияние возмущений на фронт ударной волны, сколько прежде всего превращение безвихревых возмущений в вихревые, — явление побочное в теории сверхзвукового полета, но важнейшее в теории образования галактик. Только в одном случае — при прямом падении звука на фронт, когда звук распространяется перпендикулярно к плоскости фронта ударной волны, — возмущение остается безвихревым. При любом косом падении звука завихренность обязательно возникает.

Интересно, что при встречном падении звука на фронт ударной волны возможно явление, похожее на полное внутреннее отражение в оптике. Если свет падает на границу двух сред, то при достаточно косом падении будет только отражение, а преломление, т. е. проникновение за границу раздела сред, не произойдет. И в данном случае при достаточно большом угле (больше 60°) между направлением распространения звука и перпендикуляром к фронту ударной волны преломленный, т. е. прошедший за фронт, звук отсутствует. Отражение же заранее запрещено! Но и в этом случае за фронтом возникает, как мы знаем, завихренность и вихри целиком (почти) берут на себя кинетическую энергию, запасенную в падающем на фронт звуке.

Очень важно, что сказанное о звуке полностью справедливо и для какого угодно безвихревого возмущения. Любое сгущение вещества в набегающем на фронт потоке порождает за фронтом завихренность (рис. 26).

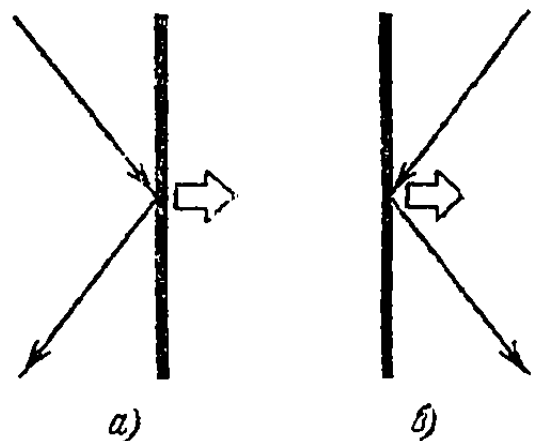


Рис. 25. Падение звука на фронт ударной волны: а — падение вдогонку — отражение без преломления, б — встречное падение — преломление без отражения. Фронт движется по газу слева направо, или, что то же, газ патекает на фронт справа налево. Стрелки (тонкие) показывают направление распространения звука.

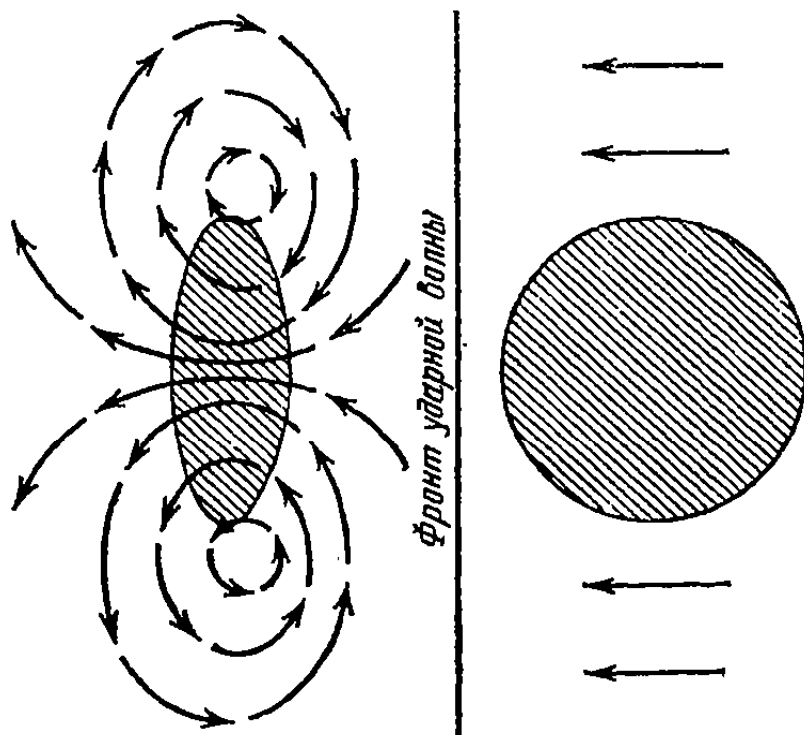


Рис. 26. Структура вихрей, рождающихся на фронте ударной волны при прохождении через него сгущения вещества. Область сгущения заштрихована.

ПРОТОСКОПЛЕНИЕ — ТУРБУЛЕНТНЫЙ СЛОЙ

Картина сверхзвуковых движений метagalактической среды в эпоху формирования галактик складывается из множества разнообразных и сложных гидродинамических процессов. Она включает в себя не только формирование крупномасштабных сгущений — облаков, но и взаимодействие этих облаков друг с другом.

Отступим на шаг назад и представим себе догалактические возмущения в послерекомбинационный период в виде совокупности слабых сгущений газа, облаков, которые со временем все четче различимы благодаря действию гравитационной неустойчивости. По той же причине каждое облако как целое приобретает всё большую собственную скорость, добавочную к регулярной скорости взаимного космологического разбегания облаком. Если вначале собственные скорости и малы, то рано или поздно они могут оказаться сравнимыми с этой регулярной скоростью и даже превзойти ее. Тогда возмущения становятся уже не слабыми, и можно ожидать, что в игру вступят гидродинамические процессы нового типа.

Действительно, легко вообразить, что если собственные скорости не малы, то для каких-то двух соседних облаков взаимное космологическое удаление может скомпенсироваться собственным относительным движением, которое просто по случайной причине для этой пары направлено к сближению облаков. В результате оказываются возможными столкновения облаков друг с другом. Очевидно,

рыхлые облака сталкиваются совсем не так, как упругие бильярдные шары. Если, например, два облака столкнулись «лоб в лоб», то они не отскочат затем друг от друга, а скорее слинутся и сплющатся. Их относительное движение затормозится при столкновениях частиц, составляющих облака, и возникнет слой сжатого газа.

Столкновение облаков будет неупругим потому, что скорости, с которыми они налетают друг на друга, больше скорости звука в газе каждого облака. При таких сверхзвуковых скоростях движение среды не может быть плавным и непрерывным. В ней обязательно должны возникать скачки плотности, скорости и температуры.

Эти скачки могут быть различных типов. Одни из них — ударная волна, в которой скачком меняется перпендикулярная к фронту компонента скорости, а касательная к фронту компонента остается неизменной. Как мы видели, если пабегающий на фронт ударной волны поток — безвихревой, то при пересечении фронта он перестраивается и может стать вихревым. Явления такого рода неизбежно возникают в космической среде при неупругих столкновениях облаков, созданных гравитационной неустойчивостью.

Особенно эффективно рождение вихрей при нецентральных столкновениях газовых масс (рис. 27). В этом случае материал каждого из сталкивающихся облаков не только сминается, но еще и скользит вдоль поверхности, отделяющей одно облако от другого. Такой разрыв касательной скорости — его называют тангенциальным *) — не может долго существовать и распадается со временем. Скорости исходного скользящего, тангенциального движения дают начало вихревым скоростям в слое сжатого газа.

Неустойчивость тангенциального разрыва была известна еще Гельмгольцу, который заметил, что границы струй, вытекающих из духовых труб, закручиваются в виде периодических спиралей. Граница струи как раз и представляет собой тангенциальный разрыв, отделяющий движущийся воздух от покоящегося. Другое хорошо известное явление, обязанное неустойчивости тангенциального разрыва, — возникновение волн на воде при ветре. Разрыв возникает, очевидно, на поверхности воды, вдоль которой дует ветер, т. е. движутся слои воздуха, и из-за этого вода не может оставаться спокойной.

*) От латинского слова *tangens* — касающийся.

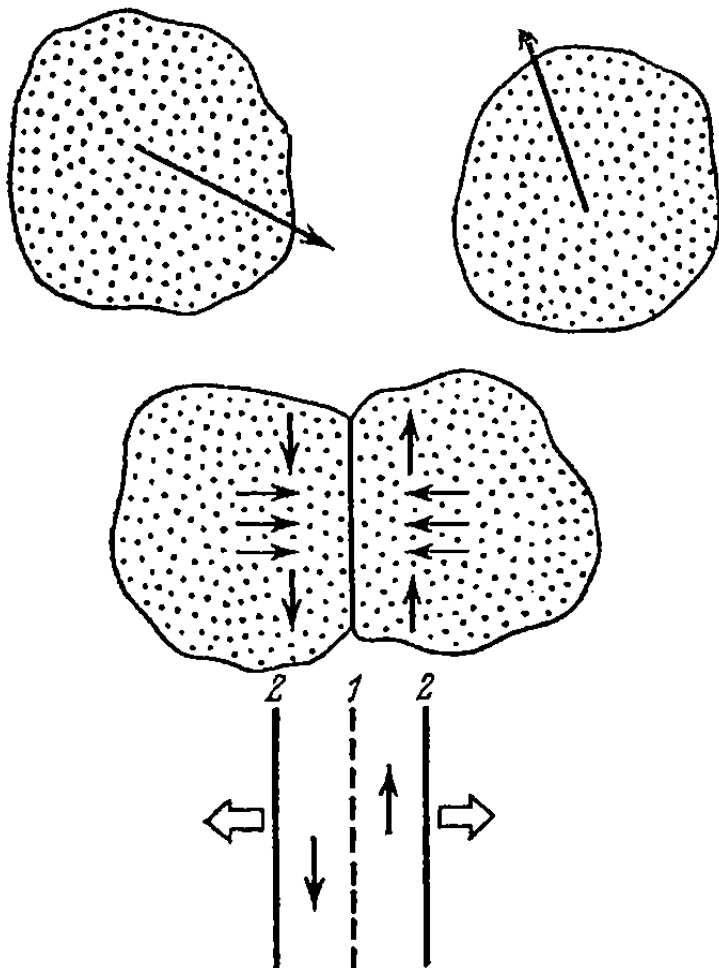


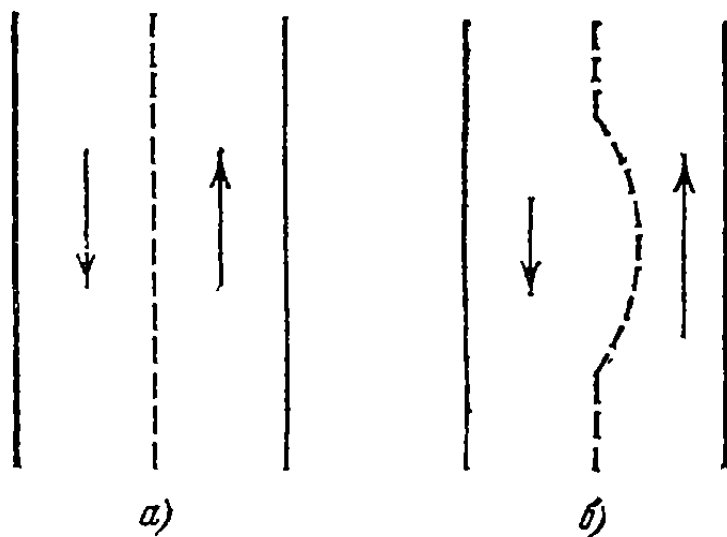
Рис. 27. Сверхзвуковое столкновение газовых масс. Возникновение тангенциального разрыва (1) и двух ударных волн (2).

Природу этой гидродинамической неустойчивости можно выяснить, рассматривая поведение слабого возмущения, какого-либо искажения поверхности тангенциального разрыва. Если это искажение само собой вскоре рассосется и сгладится, то поверхность разрыва и разрыв в целом устойчивы; если же возмущение будет со временем самопроизвольно усиливаться и возрастать, то разрыв неустойчив.

В самом простом случае тангенциальный разрыв можно представить себе на примере течения среды между двумя параллельными плоскостями (рис. 28, а). Пусть вблизи правой поверхности жидкость течет вверх, а вблизи левой — вниз (никакой силы тяжести, конечно, не учитываем), и между слоями, текущими в противоположных направлениях, есть скачок скорости на какой-то средней поверхности. Пусть далее поверхность разрыва искажась так, как это показано на рис. 28, б. Можно сказать, что искажение поверхности разрыва привело к изменению поперечных сечений потоков слева и справа от разрыва: левое сечение стало больше, а правое меньше. Из-за этого в данном месте течения должны измениться скорости потоков, чтобы через изменившиеся сечения проходили те

же, что и прежде, порции газа. Это значит, что слева от возмущения скорость станет меньше, а справа больше. Но в таком случае должно измениться и давление среды слева и справа от возмущения. По одной из классических теорем гидродинамики, теореме Бернулли, в стационарном

Рис. 28. К механизму неустойчивости тангенциального разрыва.



потоке, т. е. в таком потоке, в котором через любое сечение переносятся все время одинаковые по величине порции газа, давление в данном месте тем больше, чем меньше скорость. Теорема Бернулли, по существу, утверждает, что в широком месте потока, где скорость меньше, чем в соседнем более узком месте, требуется большее давление, чтобы возникла сила давления, способная ускорить порции газа при их выходе из широкого места и тем самым «продавить» их через более узкое место.

Отсюда видно, что перед выпуклой частью поверхности разрыва давление падает, а за ней возрастает. Это, очевидно, заставляет поверхность еще больше прогибаться. Но из-за этого сечения потоков изменятся в еще большей степени, перепад давления слева направо возрастет, и в результате произойдет дальнейшее усиление возмущения. Это и означает, что тангенциальный разрыв неустойчив.

Конечно, наличие в нашем примере ограничивающих поверхностей, между которыми течет среда, не принципиально. Все дело в самом разрыве, в том, что имеется скачок касательной скорости соседних слоев. Неустойчивость существует и в свободном течении; она обязана силам давления, действующим вблизи поверхности разрыва.

Неустойчивость тангенциального разрыва не ограничивается только тем, что искажается поверхность разрыва. Она вызывает также развитие возмущений в прилегаю-

щих к этой поверхности областях среды. Как видно из рис. 29, течение по разные стороны от «взволнованной» поверхности тангенциального разрыва не может быть просто параллельным, скорости среды изменяются и эти изменения тем сильнее, чем больше искажения на самой поверхности тангенциального разрыва.

Тангенциальный разрыв усиливает любые слабые возмущения, распространяющиеся через его поверхность.

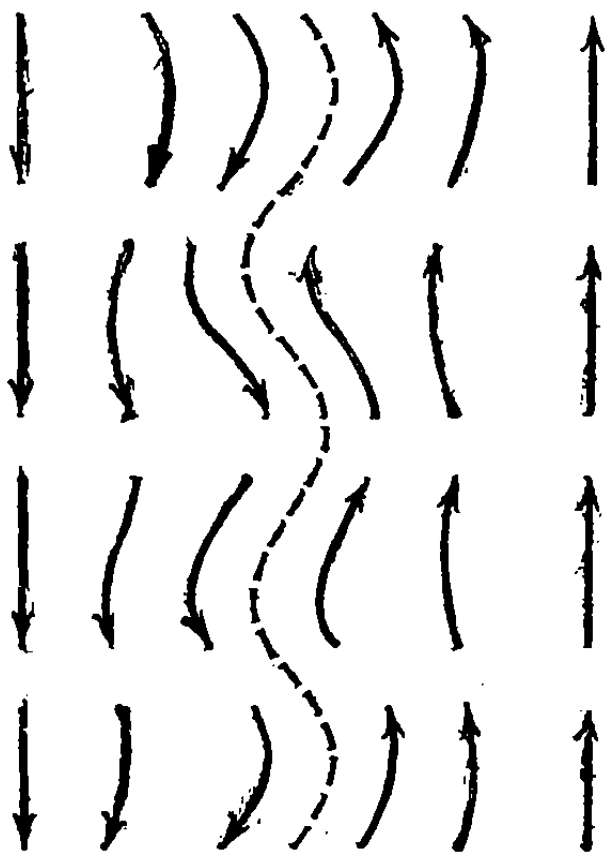


Рис. 29. Развитие возмущений в зоне тангенциального разрыва.

Потока вещества через эту поверхность нет, но ее может пересекать, например, звуковая волна. Усиливая звуковую волну, поверхность тангенциального разрыва и сама приходит в волнение, усиливающееся со временем. Источником энергии для развития всех этих возмущений служат касательные движения среды в зоне тангенциального разрыва.

Возвращаясь к сверхзвуковому столкновению облаков в метagalacticкой среде, заметим, что явления такого рода представляют собой пример сильного и внезапного внешнего воздействия на данную массу газа. Возникающие при этом гидродинамические разрывы называют неэволюционными, т. е. вызванными внешней причиной, а не собственной эволюцией движений. Известно, что неэволюционные разрывы возникают, скажем, при резком ударе поршня по газу в цилиндре, при разного рода взрывах и т. п. Как указал Л. Д. Ландау, во всех этих явлениях

формируется, собственно, не один гидродинамический разрыв, а целая система разрывов. Применительно к нашему случаю из теории Ландау следует, что в зоне первоначального контакта облаков должен возникать тангенциальный разрыв и отходящие от него в разные стороны две ударные волны (см. рис. 27). В результате образуется слой уплотненного и разогретого газа, ограниченный расходящимися ударными волнами. На сжатие и разогрев тратится энергия первоначального встречного (перпендикулярного к поверхности контакта) движения облаков, а энергия скользящего (касательного к этой поверхности) движения запасается в тангенциальном разрыве. Такое неэволюционного происхождения уплотнение напоминает «блин»; но в противоположность этому, «блин» формируется эволюционным путем, т. е. благодаря постепенному развитию гравитационной неустойчивости в данной массе газа. В обоих случаях образуются слои уплотненного и разогретого газа, содержащие массы, сравнимые с массами скоплений галактик. Однако слой неэволюционного происхождения отличается от «блина» характером внутренних движений: он «заряжен» тангенциальным разрывом.

Развитие неустойчивости в зоне тангенциального разрыва приводит к возбуждению и усилению там разнообразных возмущений, т. е. хаотических движений различных масштабов и интенсивностей, черпающих энергию из относительных касательных движений газа. Характерной чертой движений такого происхождения всегда является наличие значительной завихренности в общем хаотическом движении среды.

Собственно, сам тангенциальный разрыв — это уже как бы вихрь, сосредоточенный в плоскости. Сосредоточенный вихрь, или, как говорят в гидродинамике, вихревой лист, возник из первоначально безвихревого движения облаков, когда сверхзвуковое столкновение этих облаков породило неэволюционный гидродинамический разрыв. Он «имел право» возникнуть, так как при наличии разрывов теорема Кельвина — Гельмгольца о сохранении завихренности, или, в нашем случае, незавихренности, неприменима. Неустойчивость тангенциального разрыва, как мы говорили, проявляется и в том, что любые слабые возмущения, имеющиеся в среде, могут быть усилены при взаимодействии с разрывом. Однако возмущения, отходящие от тангенциального разрыва, уносят с собой только его энергию, но не завихренность. Если возмущение, при-

ходящее во взаимодействие с разрывом, было безвихревым, оно и усилившись останется безвихревым.

Но в протоскоплении не может быть чисто безвихревых возмущений. Для этого имеются две причины. Во-первых, любые возмущения, пересекающие ударные фронты вместе с потоком газа, приобретают на фронтах завихренность. Это мы подробно рассмотрели выше. Во-вторых, даже распространяясь в пределах самого слоя сжатия, возмущение не может оставаться безвихревым. Дело в том, что в этом слое распределение плотности и температуры неоднородно; как и в «блине», плотность падает от центральной плоскости наружу, к краям слоя, а температура к краям возрастает. При таких условиях распространение любых безвихревых возмущений в среде привносит в них завихренность. Для ее появления необходимо только, чтобы возмущения распространялись не параллельно направлениям, в которых изменяются плотность и температура. В плоском слое — сгущении — плотность и температура зависят от расстояния до центральной плоскости и потому изменяются вдоль направления, перпендикулярного к этой плоскости. Если, например, звуковая волна распространяется под углом к этому направлению, то возмущение давления в волне зависит уже не только от возмущения плотности в ней самой (как это бывает в однородной среде), но также от того, как ведет себя «невозмущенная» плотность среды, в которой распространяется волна. Такого рода зависимость, — ее называют небаротропией, — делает теорему Кельвина — Гельмгольца о вихрях неприменимой; в этом случае, как и в случае гидродинамического разрыва, эта теорема недействительна, вихрь может появляться и исчезать, но чисто безвихревое движение невозможно.

Очень важную роль в развитии неустойчивости тангенциального разрыва играет вязкость среды. С одной стороны, она стремится погасить, как всегда, любые вихревые движения. Но, с другой стороны, она как бы выносит завихренность из тангенциального разрыва к прилегающим слоям газа. Здесь нужно снова вспомнить о теореме Кельвина — Гельмгольца и сформулировать, наконец, полностью ее условия: вихрь не рождается и не уничтожается, если в гидродинамическом движении нет разрывов, нет небаротропии, нет вязкости.

Вязкость — это, по существу, трение скользящих друг вдоль друга слоев жидкости. Когда вязкости нет (или, вернее, она несущественна, т. е. не может сколько-нибудь

заметно влиять на характер движения), слои жидкости свободно, без взаимодействия скользят друг относительно друга. Если при этом имеется область течения, обладающая завихренностью, а по соседству с ней вихрь равен нулю (рис. 30, а), то никакого проникновения вихря в соседние области нет (и, конечно, нет его затухания). При наличии же вязкости возникает взаимодействие

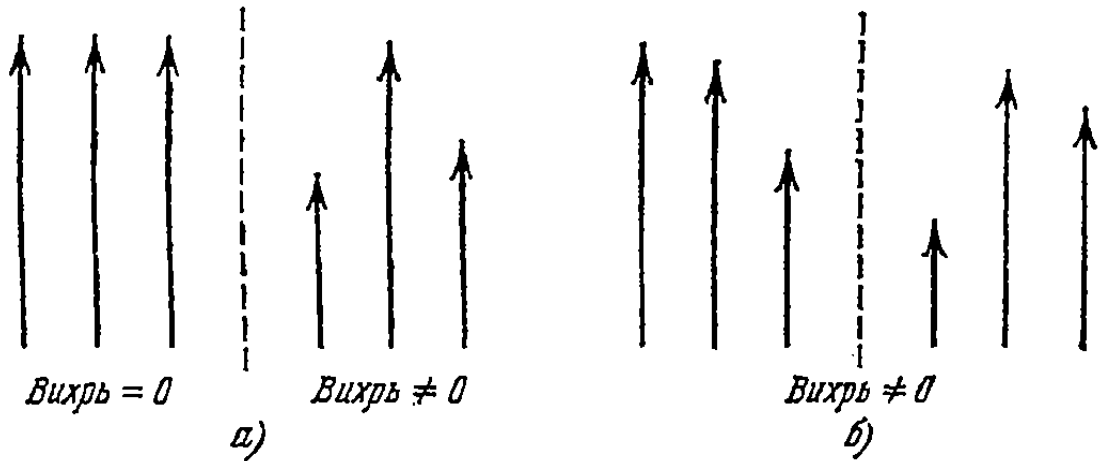


Рис. 30. Роль вязкости: торможение и перенос вихря между слоями среды; а) невязкое течение, б) вязкое течение.

завихренных и незавихренных слоев среды. Трение между соседними слоями стремится уничтожить различие их скоростей; поэтому в зоне завихренности вихрь затухает, но вместе с тем завихренность появляется в тех слоях, где ее прежде не было. Действительно, если скорости этих слоев (слева на рис. 30, б) были сначала одинаковыми, то теперь между ними появляется различие, так как трение создает торможение, и это торможение постепенно распространяется справа налево, из области завихренности в область, где ранее ее не было. Вместе с торможением возникает, очевидно, и вихрь, который проникает в соседние слои и делает со временем течение вихревым.

По мере развития неустойчивости тангенциального разрыва течение газа вдоль поверхности, разделяющей противоположно направленные потоки газа, становится все более сложным (см. рис. 29). А чем сложнее движение, тем, вообще говоря, важнее вязкость. Она несущественна и трение слоев вовсе отсутствует, когда все слои среды движутся с одинаковой скоростью — это самый простой тип движения; но в очень запутанном и неоднородном потоке трение слоев неизбежно. Оно тем сильнее, чем больше различие скоростей соседних слоев, чем меньше расстояния поперек потока, на которых имеется значительное различие в скорости. Когда поверхность танген-

циального разрыва сильно «взволнуется» и исказится, влияние вязкости проявится в том, что она будет, так сказать, перезамыкать струйки среды, ее линии тока, создавая тем самым изолированные вращающиеся области (рис. 31). Эти области называют вихревыми ядрами. Оси

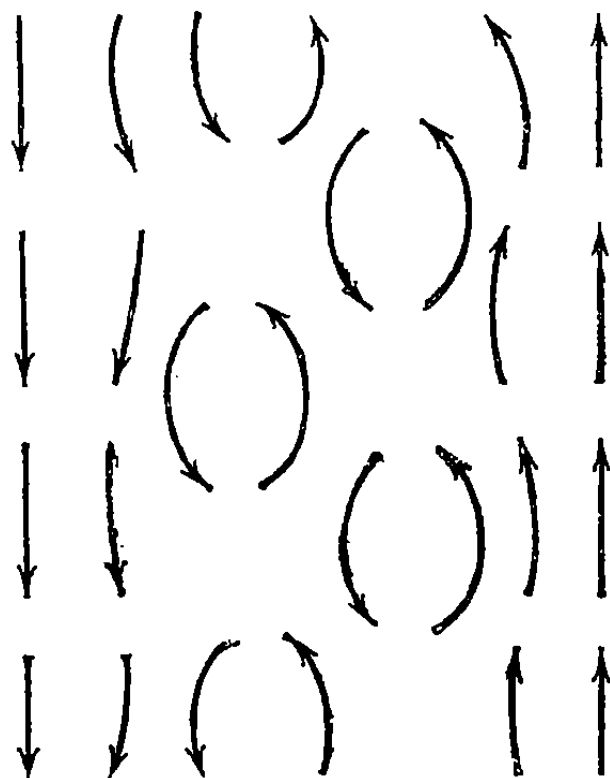


Рис. 31. Обособление вихревых ядер на поздней стадии развития неустойчивости тангенциального разрыва.

их вращения параллельны плоскости исходного тангенциального разрыва; они ориентированы так же, как и вихри, рождающиеся в других рассмотренных нами процессах. Возникновение и усиление возмущений, обладающих значительной завихренностью, а затем и распад тангенциального разрыва на вихревые ядра — все это вместе приводит в результате к интенсивным внутренним движениям в слое-протоскоплении, возникшем при сверхзвуковом соударении самых крупных облаков метagalacticкой среды. Сложный и запутанный характер вихревых движений, порожденных неустойчивостью и распадом тангенциального разрыва, предопределяет развитие турбулентности в газовом протоскоплении. Так, в метagalacticкой среде образуются турбулентные слои, в которых газ сжат, сильно разогрет и, что особенно важно, обладает внутренними вихревыми, вращательными движениями. Если полная масса всего образования сравнима с массой скопления галактик, то внутренние вихри охватывают массы газа, сравнимые с массами отдельных галактик. Обособление и гравитационная конденсация вихрей превращает их в быстро вращающиеся спиральные галактики.

Подчеркнем наиболее существенные особенности в гидродинамике турбулентного слоя-протоскопления.

При ожидаемых значениях скоростей и пространственных масштабов внутренних движений, порожденных распадом тангенциального разрыва, критерий Рейнольдса, указывающий на переход в турбулентность, можно счи-

тать выполненным с хорошим запасом для физических условий в слое-протоскоплении. Турбулентность такого происхождения характеризуется значительными по величине скоростями; но они все же меньше скорости звука в среде. Ведь газ протоскопления очень сильно разогрет; как мы говорили, на его разогрев (и уплотнение) идет энергия встречного движения слоев газа, которая на фронтах ударных волн, ограничивающих слой-протоскопление, диссипирует, переходит в тепло. В типичных протоскоплениях температура достигает десятков миллионов градусов; при этом скорость звука составляет несколько сотен километров в секунду. Скорости же вихрей, способных обеспечить быстрое вращение галактик, в десятки раз меньше.

То обстоятельство, что турбулентность протоскопления развивается в дозвуковом режиме, позволяет в полной мере применять для ее исследования разработанные в гидродинамике общие качественные идеи и количественные результаты.

Наиболее крупные вихри в совокупности движений турбулентного слоя-протоскопления — вихревые ядра; своей энергией они способны поддерживать и питать вихри меньших масштабов, причем со временем должна, по-видимому, формироваться стройная иерархия вихрей с каскадной передачей энергии от немногих крупных вихрей к большому числу вихрей меньшего масштаба. В самых мелких вихрях энергия гидродинамических движений диссипирует — переходит в энергию тепловых движений частиц под действием вязкого трения. В средних масштабах способна, по-видимому, установиться турбулентность колмогоровского типа. Для нее характерно отсутствие, в среднем, выделенных направлений, т. е. статистическая изотропия. Конечно, самые крупные вихри представляют собой сильные неоднородности в движении среды и с ними связаны сильные отклонения от изотропии; эти отклонения от изотропии никак не исчезают при усреднении ввиду того, что число крупных вихрей невелико — их, скажем, не больше десятка. Но неоднородность быстро замывается в каскаде вихрей, и в вихрях с размером, в несколько раз меньшим, ориентирующее влияние крупных вихрей уже не сказывается.

Если сравнить картину турбулентного слоя-протоскопления с гипотезой Вейцеккера — Гамова, то можно заметить, прежде всего, что в нашей картине целиком сохраняются привлекательные черты турбулентной кос-

могони, ее глубокие и содержательные физические идеи. Вместе с тем принципиально по-новому решается вопрос о природе догалактической турбулентности — протогалактические вихри возникают как закономерное следствие всей предшествующей эволюции метagalактической структуры в изотропной расширяющейся Вселенной. Те самые движения, которые создают крупномасштабные сгущения — облака метagalактической среды, порождают и внутренние турбулентные вихри в слоях-протоскоплениях. Для объяснения их происхождения не требуются никакие специальные предположения, не нужны гипотезы.

Картина турбулентного слоя-протоскопления позволяет не только качественно, но и количественно объяснить быстрое вращение галактик. Зная общие характеристики скоплений галактик, мы можем представить себе, какие скорости имелись в отдаленные времена в формировавшихся их движениях среды. Чтобы при возрасте мира в несколько миллиардов лет остановить космологическое расширение массы газа, сравнимой с массой крупных скоплений галактик (10^{15} масс Солнца), собственные скорости отдельных участков среды должны были приближаться к тысяче километров в секунду. Это и есть те скорости, с которыми могли сталкиваться крупные облака газа, формируя при таких столкновениях слой-протоскопления. Ввиду общей хаотичности движений облаков среды, скорости встречных и скользящих (касательных) движений были в большинстве случаев сравнимы между собой. А это означает, что и в тангенциальном разрыве относительные скорости слоев могли достигать той же тысячи километров в секунду. С такими скоростями связан большой запас кинетической энергии, и именно он расходуется — при распаде тангенциального разрыва — на возбуждение турбулентных вихрей в протоскоплении. Конечно, часть этой энергии теряется, переходит в тепло в результате вязкого трения. Поэтому даже в самых крупных вихрях скорости могут быть в десятки раз меньше исходной скорости тангенциального разрыва. Но и это уже вполне способно обеспечить быстрое вращение галактик, возникающих в результате обособления вихрей. Чтобы галактика, подобная нашей Галактике, вращалась со скоростью в 300 км/с (на расстоянии от центра, близком к ее радиусу), достаточно вихревой скорости в 30 км/с в газе протоскопления.

Можно полагать, что скопления галактик, подобные скоплению в Деве, к которому принадлежит и наша Га-

лактика, возникли из турбулентных слоев. В этих скоплениях подавляющая часть галактик спиральные, причем имеется небольшое число гигантских спиралей. Возможно, гигантские спирали — это обособившиеся вихревые ядра, тогда как спиральные галактики меньших масс возникли из вихрей турбулентного каскада. Скопления этого типа называют неправильными — они клочковаты, не обнаруживают упорядоченного общего строения или правильной видимой формы. В этом, вероятно, проявляется бурный и хаотический характер внутренних движений в исходном турбулентном слое.

В противоположность этому имеются, в меньшем числе, правильные скопления, подобные скоплению Кома, форма которых весьма близка к сферической или эллипсоидальной. Можно полагать, что такие скопления возникли из протоскоплений эволюционного происхождения — «блинов». Внутренняя динамика таких протоскоплений спокойней; в них нет тангенциальных разрывов, способных породить мощную внутреннюю турбулентность. По-видимому, не случайно в правильных скоплениях всегда преобладают не спиральные, а эллиптические галактики, вращение которых, если оно вообще имеется, гораздо слабее, чем вращение спиралей.

СПИРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

Спиральных галактик не менее 70% от общего числа видимых галактик, и потому можно сказать, что спиральный узор — это не редкое явление, а скорее обычное свойство галактик. Вместе с тем распространенность спиралей указывает на то, что этот узор должен быть долгоживущим.

В спиральных рукавах галактик сосредоточены их самые яркие и молодые звезды. Именно поэтому спиральный узор отчетливо виден в весьма удаленных галактиках, хотя на долю спиральных рукавов приходится в каждом случае не больше нескольких процентов полной массы галактики.

Чаще всего имеются две спиральные ветви, закручивающиеся в одну и ту же сторону. Бывают и более сложные спирали с тремя-четырьмя независимыми ветвями, которые еще и сами нередко ветвятся. Ветви всегда лежат в плоскости вращения галактики. Чаще всего ветви более или менее широко открыты, иногда закручены очень тесно и представляются почти кольцами. У некоторых

галактик имеется перемичка, пересекающая ядро; в этих случаях спирали начинаются с концов перемички.

На рис. 32 показаны различные типы галактик, организованные в виде так называемой камертонной диаграммы, предложенной Э. Хабблом. «Ручка камертона» — это

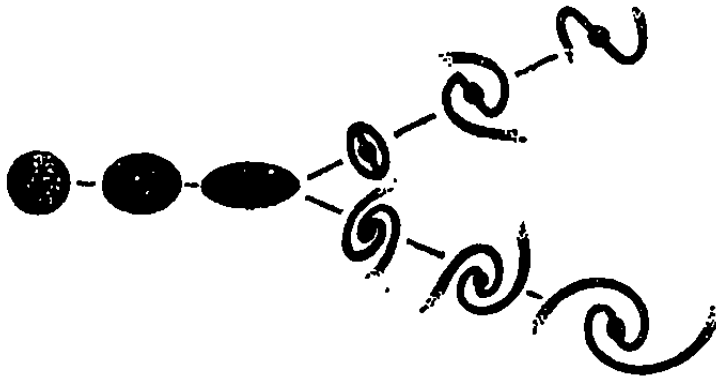


Рис. 32. Типы галактик по Хабблу.

эллиптические галактики, начиная с полностью сферических и кончая линзовидными, а «ножки камертона» — спирали с перемичкой и без нее, расположенные в порядке развитости или раскрытости спирального узора. Когда-то думали, что эта

последовательность имеет эволюционный характер, т. е. каждая галактика начинает свою эволюцию как сферическая, затем становится все более уплощенной и, наконец, обрывает спиралями ветвями. Сейчас эта точка зрения оставлена. По современным воззрениям тип галактики определяется условиями формирования: если она возникла из вращающегося облака газа, то быть ей спиральной, если из невращающегося (или слабо вращающегося), — то эллиптической.

Что же такое спиральный узор?

В первые годы изучения галактик предполагалось, что спиральные рукава представляют собой струи светящегося газа, выброшенные из центра галактики и закрученные в спирали ее вращением. Из газа образовывались звезды, которые сохраняли в своем расположении и движении первоначальную спиральную форму газового рукава.

Вскоре, однако, выяснилось, что спирали такого происхождения должны быстро разрушаться из-за неоднородности вращения галактик. Вращение однородно, т. е. происходит с постоянной угловой скоростью, так же, как вращение твердого тела, только во внутренней области галактики; в основном же объеме диска, вне этой области, вращение не однородное, а дифференциальное, т. е. угловая скорость не постоянна, а изменяется (убывает) по мере приближения к краю галактики. Это неоднородное, дифференциальное вращение полностью размывает такой струйный спиральный узор за 3—4 оборота галактики.

Чтобы этого не происходило, требуется какой-то дополнительный фактор, который помог бы спиральному рукаву устоять против размывания. В качестве такого фактора предлагались магнитные поля галактик. Считалось, что в спиральном рукаве, как в трубке, газ удерживается магнитным полем, силовые линии которого вытянуты вдоль этой трубки. Но, как выяснилось, магнитные поля галактик слишком слабы, чтобы эффективно противостоять дифференциальному вращению.

Современный взгляд на природу спирального узора галактик сформировался в последние 15 лет на основе совсем иных идей. В 1964 г. Лин Цзя-Цзяо и Ф. Шу предложили рассматривать спиральную структуру как волну*), распространяющуюся по диску галактики. Если первоначальные представления связывали спиральный узор с какими-то струями или трубками, содержащими с самого начала и все время существования одни и те же частицы, то волновая концепция предполагает, что спираль — это состояние уплотнения, распространяющееся по диску и переходящее от одних его частиц к другим. При этом под частицами нужно понимать и собственно частицы межзвездной среды и целые звезды, уже имеющиеся или возникающие в диске галактики.

Волна создает уплотнение в распределении частиц, но не тащит их за собой, а переходит от одних частиц к другим, создавая уплотнение в новом месте и из новых частиц. Таково свойство всякого волнового процесса. В точности то же происходит, например, и в волнах на воде: если бросить камень, волны будут расходиться кольцами, но вода не оттекает за ними. Щепка, брошенная на воду, не поплывет за волной, а будет только раскачиваться вверх и вниз, не сходя с места.

Волна на воде создает кольцевые уплотнения, если вода неподвижна. Совсем иначе выглядит волна, если в воде имеется общее вращение — когда она, скажем, стекает в воронку или ее раскручивают, как чай в стакане чайной ложкой. В этом случае, как всякий наблюдал, волна в воде из кольцевой становится спиральной. Это же самое происходит и в диске вращающейся галактики.

Конечно, среда, частицами которой служат целые звезды, не очень похожа на воду. Но волновые процессы в самых различных средах в высшей степени подобны. Ма-

*) Много раньше сходные идеи высказывались Б. Линдбладом, но в довольно сложной, не наглядной математической форме.

тематическая теория волн во вращающемся диске, образованием звездами, была построена Лином и Шу, а затем усовершенствовалась Л. С. Марочником, А. М. Фридманом и другими исследователями. Она полностью соответствует наглядным представлениям о спиральных волнах на воде, почерпнутым из повседневных наблюдений; разумеется, она учитывает и конкретные особенности диска галактики как среды, по которой распространяется волна. Прежде всего, принимается во внимание, что диск находится в собственном поле тяжести, создаваемом его звездами и межзвездным газом; в расчетах используются сведения о распределении плотности и скорости диска и т. п.

Главное свойство волнового спирального узора — его однородное вращение. Хотя диск галактики вращается дифференциально, картина спирального узора вращается вся как целое с постоянной угловой скоростью. Это замечательное обстоятельство сразу снимает все трудности, связанные с дифференциальным вращением, на которые наталкивались первоначальные теории. Именно по этой причине спиральный узор обозначается столь четко и ясно и сохраняет на всем протяжении диска галактики полную регулярность, никак не искажаемую дифференциальным вращением.

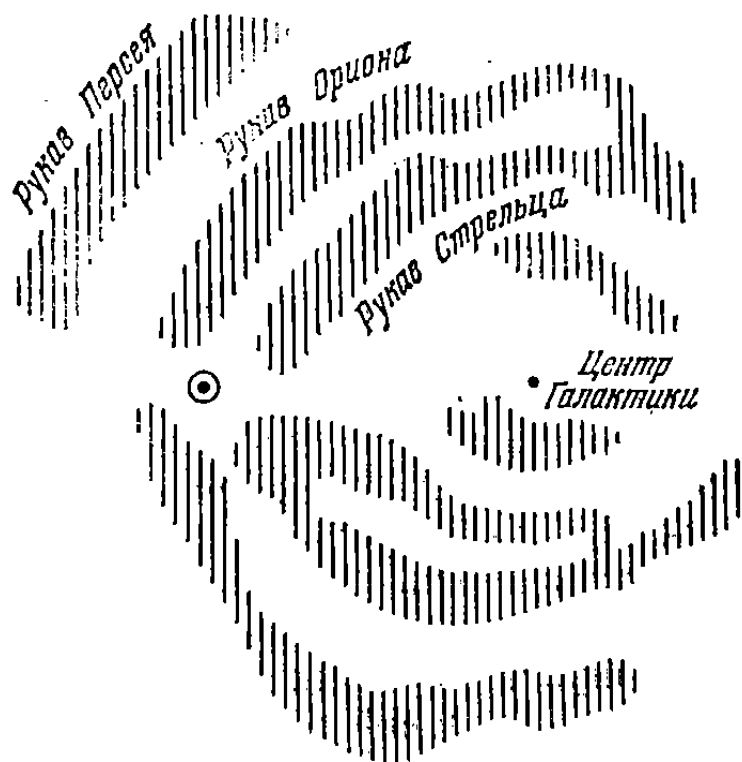
Итак, волна создает уплотнения в распределении звезд и гребни волны имеют вид спиральных рукавов, раскинувшихся по всему диску галактики. Но плотность звезд в этих гребнях не так уж велика, они расположены там лишь немного гуще, чем в среднем по диску, — всего процентов на 10, не больше. Такой слабый контраст никогда не был бы замечен на фотографиях далеких галактик, если бы в спиральном рукаве звезды были бы такими же, что и во всем диске.

Все дело в том, что вместе со звездами в спиральные рукава сгущается межзвездный газ и он конденсируется там в звезды, которые на начальной стадии своей эволюции очень яркие и сильно выделяются среди других звезд диска. Наблюдения нейтрального водорода в диске нашей Галактики (по его излучению в радиодиапазоне на длине волны 21 см) показывают, что газ действительно образует спиральные рукава (рис. 33). Чтобы рукава четко очерчивались молодыми звездами, требуется достаточно высокая скорость превращения газа в звезды и, кроме того, не слишком большая длительность эволюции звезды на ее начальной яркой стадии. И то, и другое, по-видимому, выполняется для реальных физических условий в галак-

тиках. Продолжительность начальной фазы эволюции ярких массивных звезд меньше времени, за которое рукав волны заметно сместится при своем общем вращении.

У. Робертс и С. Б. Пикельнер разработали интересную картину звездообразования в спиральных рукавах. Она

Рис. 33. Схема спиральных рукавов Галактики по радиоданным о распределении атомарного водорода.



основывается на анализе гидродинамических процессов в межзвездном газе, вызванных относительным движением газа и спирального рукава. Скорость вращения спирального узора и скорость вращения диска галактики различны. Из-за этого газ протекает сквозь спиральный рукав или, что то же, спиральный рукав движется по газу. Относительное движение газа и рукава характеризуются скоростями, которые больше скорости звука в газе. Можно сказать, что газ протекает через рукав со сверхзвуковой скоростью. По этой причине возникает ударная волна (и здесь тоже ударные волны!) при «столкновении» газа с рукавом. В ударной волне газ претерпевает сильное сжатие, которое, вероятно, и служит «спусковым механизмом» для процесса звездообразования.

Если относительное вращение газа и спирального рукава — единственная причина звездообразования, то нужно ожидать, что в том кольце диска галактики, где обе скорости вращения совпадают (а такое действительно возможно), звездообразование затруднено и само это кольцо — оно называется кольцом коротаций — должно быть бедным молодыми звездами. Никаких признаков темных колец, которые прочерчивали бы спиральный узор, как

будто не замечается. Вероятно, это означает, что помимо механизма Робертса — Пикельнера действуют и другие процессы, инициирующие звездообразование, для которых не требуется относительных движений и достаточно хотя бы небольшого уплотнения межзвездного газа спиральной волной.

В теории спиральной структуры, при всех ее очевидных достижениях, имеется немало трудных вопросов, остающихся пока без ответа. Самый принципиальный из них — направление распространения спиральной волны: идет ли волна от центра наружу или, наоборот, от края галактики к ее центру? Фактически это вопрос о «генераторе» спиральной волны, т. е. о том, где и как возбуждается эта волна.

Математическая теория спиральной структуры во вращающейся гравитирующей среде указывает на то, что всякое слабое возмущение должно распространяться в такой среде в виде спиральной волны с тем или иным числом ветвей и скоростью вращения. Но почему в каждой данной галактике реализуется именно одна данная — из множества допустимых — спиральная волна с вполне определенным числом ветвей и скоростью, определяется, вероятно, условиями возбуждения волны. Лин и Шу полагают, что генератор спиральной волны находится на периферии галактического диска и представляет собой значительное сгущение или, возможно, небольшую галактику-спутник. Такого рода объект действительно способен создавать своим полем тяготения определенные возмущения в общем поле тяготения диска галактики, и эти возмущения должны возбуждать в диске спиральную волну. Волна такого происхождения распространяется к центру галактики. Скорость вращения спирального узора определяется при этом скоростью обращения «генератора» вокруг центра галактики, и сам этот генератор — сгущение или галактика-спутник — должен находиться на конце одной из спиральных ветвей.

Известно немало примеров галактик, которые действительно имеют те или иные сгущения на концах своих спиральных ветвей. Такова и спиральная галактика в созвездии Гончих Псов (см. рис. 18). Для нашей Галактики внешний генератор мог бы находиться на расстоянии 15 кпс от ее центра, на самом краю галактического диска. Скорость вращения (линейная) составляет там приблизительно 160—200 км/с; этой величиной определяется, очевидно, и угловая скорость вращения всего спирального

узора, одинаковая по всему галактическому диску. Ее принято выражать в единицах км/(с·кпс). Указанной линейной скорости отвечает угловая скорость 11—13 км/(с·кпс). Угловая скорость вращения диска Галактики в районе Солнца приблизительно вдвое меньше: 20—25 км/(с·кпс).

Спиральный узор, имеющий два рукава и вращающийся с указанной угловой скоростью, как будто не противочит данным о характере распределения нейтрального водорода в диске нашей Галактики.

Но эти данные все же не очень определены; они допускают и совсем иную возможность. Именно, можно предположить, что «генератор» находится не снаружи, а наоборот, в центральной области Галактики. Источником возбуждения спиральных волн могла бы служить гидродинамическая неустойчивость, развивающаяся в центральной области галактического диска благодаря особому характеру кривой вращения в этой области. Это идея выдвинута А. М. Фридманом и В. Л. Поляченко. Как считают Л. С. Марочник и А. А. Сучков, спиральная волна может возбуждаться также каким-либо несимметричным образованием, вращение которого вызывает возмущение поля тяготения галактического диска. Такое тело должно быть существенно несферичным, так как для сферы поле тяготения не зависит от того, вращается она или нет. Это может быть перемычка, похожая на те, которые наблюдаются у некоторых галактик, — см. хаббловскую диаграмму. Перемычка должна вращаться вокруг своей короткой оси.

Скорости вращения в центральной области Галактики больше, чем на периферии. По этой причине и спиральный узор такого происхождения вращается быстрее, чем в картине внешнего генератора; вероятнее всего, угловая скорость вращения в 20—25 км/(с·кпс). При этом достигается согласие и с данными о распределении нейтрального водорода и с теми сведениями, которыми мы располагаем о вращении внутренних областей Галактики.

Интересно, что в этом случае Солнце находится в кольце коротации, где скорость вращения диска Галактики и скорость вращения спирального узора близки друг к другу. Как замечает Л. С. Марочник, из-за этого, возможно, и сложился тот комплекс условий, который обеспечил формирование планет вокруг Солнца и само развитие жизни на Земле. Если так, то поиск других планетных систем и, — как знать, — иных цивилизаций стоит вести именно в направлении кольца коротации в Галактике...

РОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

Более девяти десятых вещества нашей Галактики сосредоточено в звездах; есть галактики, в которых на звезды приходится 99,9% массы. Мир звезд многообразен, но все же большинство из них подобно нашему Солнцу. В этой главе мы расскажем о Солнце и других «обычных» звездах, о пульсарах и барстерах, совсем не похожих на Солнце, об образовании первых звезд Галактики, об эволюционном пути звезды, о процессах звездообразования в современную эпоху и, наконец, о черных дырах — конечном состоянии звезд немалой массы.

СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ

Солнце и любая другая подобная ему звезда — это сферическая масса горячего газа, удерживаемого его собственным тяготением. Тяготение стремится сжать газ, сблизить, насколько это возможно, все его частицы. Давление горячего газа действует, очевидно, в противоположном направлении, оно стремится расширить газ. Сила тяготения направлена к центру звезды, а сила давления наружу; в их противоборстве устанавливается и поддерживается равновесие, в котором звезда может пребывать миллионы и миллиарды лет.

В недрах Солнца давление достигает десяти миллиардов атмосфер, а температура — четырнадцати миллионов градусов. Высокое давление и высокая температура поддерживаются в центральной области благодаря непрерывно идущим ядерным реакциям превращения водорода в гелий. Выделяемая там энергия просачивается в виде потока фотонов через материал Солнца к его поверхности и затем свободно излучается вовне. Ежесекундно Солнце излучает $4 \cdot 10^{26}$ Дж энергии. Наибольшая часть излучаемой Солнцем энергии приходится на фотоны (или, — на волновом языке, — электромагнитные волны) видимой частью спектра,

При современном темпе производства и выделения энергии «ядерный реактор» Солнца обеспечен горючим еще на десятки миллиардов лет. Эта оценка получается на основании того, что при превращении водорода в гелий выделяется в виде энергии излучения около одного процента энергии покоя вещества, т. е. приблизительно 10^{12} Дж на каждый грамм водорода. При массе водорода в Солнце порядка 10^{33} г это означает запас энергии около 10^{45} Дж. Деление этой энергии на светимость Солнца и дает промежуток времени, в течение которого Солнце способно светить за счет ядерных реакций в его недрах.

Замечательная идея ядерных превращений как источника светимости Солнца и звезд выдвинута в 20-е годы нашего века А. Эддингтоном — основоположником теории строения и эволюции звезд. Разработка физических основ звездной энергетики на базе современной ядерной физики и квантовой механики начата в 30-е годы Г. Бете и подхвачена затем многими исследователями разных стран. Эта работа продолжается и развивается до сих пор с учетом новых достижений физики и астрономии.

Не все, а только большинство звезд устроены так, как Солнце; но все без исключения звезды начинают свое существование с состояния, при котором каждая из них, подобно Солнцу, представляет собой шар, поддерживаемый в равновесии благодаря балансу сил тяготения и давления и нагреваемый изнутри ядерными реакциями, протекающими при высокой температуре в ее недрах.

Продолжительность жизни звезды в таком начальном состоянии зависит от запасов ядерной энергии и скорости ее расходования. Чем больше масса звезды, тем больше ее энергетический ресурс; но вместе с тем и светимость звезды тоже тем больше, чем больше масса. Для больших звезд, которые в три и более раз массивнее Солнца, светимость пропорциональна кубу массы — это известно и из прямых астрономических наблюдений и из современной теории внутреннего строения звезд. Если звезда имеет, скажем, массу в 50 масс Солнца, то ее ядерное горючее может быть израсходовано за несколько миллионов лет.

Можно сказать, что Солнце еще очень долго не выйдет из своего исходного, младенческого состояния, тогда как эволюция более массивных звезд протекает гораздо быстрее и после исчерпания значительной доли ядерного горючего массивные звезды должны, естественно, претерпеть существенные изменения в своем устройстве, уводящие их далеко от начального состояния.

ГРАВИТАЦИОННАЯ КОНДЕНСАЦИЯ

Звезды образуются и достигают состояния, подобного Солнцу, в результате гравитационной конденсации разреженных облаков газа. Эта идея, восходящая еще к Ньютону (вспомним цитированное в главе второй его знаменитое «космогоническое письмо»), служит исходным пунктом современной звездной космогонии. В описываемой Ньютоном картине фрагментация однородной среды и образование звезд происходит под действием одних только гравитационных сил в предположении, что никакие другие силы, если они вообще имеются, этому не препятствуют. Интересно противопоставление у Ньютона двух случаев — конечного и бесконечного пространств (а вернее, объемов), заполненных веществом. В первом случае все вещество собирается в единое тело, а во втором происходит его фрагментация, распад на множество отдельных сгустков. При бесконечном объеме и однородном распределении вещества в нем все точки пространства равноправны и потому нет никакой выделенной точки, к которой как к центру могло бы собраться «всё вещество Вселенной». Единого центра нет, а однородное распределение вещества неустойчиво и не может оставаться в покое. Значит, и в самом деле должно быть бесконечно много центров, вокруг которых собираются отдельные массы вещества.

Но что такое бесконечность пространства или объема в этом рассуждении? Бесконечность фактически означает, что пространственный размер распределения очень велик по сравнению с каким-то другим размером, служащим в качестве мерки, в качестве характерного масштаба. Конечность же не означает ничего, кроме соизмеримости или близости этих двух размеров. Если размер области, занятой веществом, много больше характерного масштаба, то произойдет разбиение вещества на фрагменты; если же такого сильного неравенства нет, то масса останется единой и будет сжиматься как целое.

Вероятно, это и подразумевал Ньютон в своем космогоническом письме 1692 г.; но что скрывается за характерным масштабом длины, удалось выяснить только Дж. Джинсу в 1902 г. Пространственный масштаб задается, по существу, силами, препятствующими гравитации, силами давления, обязанными упругости вещества. Этот масштаб носит название джинсовой длины.

В сущности, противоборство сил тяготения и давления в разреженной среде имеет ту же природу, что и в звез-

де. Но в звезде эти силы уже достигли, так сказать, компромисса, сравнялись друг с другом по величине и установили, таким образом, равновесие. В гравитирующей же среде такого баланса сил нет: пока среда однородна, в ней действует только сила тяготения. Сила же давления возникает тогда, когда имеются неоднородности давления, т. е. его перепады от одного места к другому. Сила давления всегда направлена из области высокого давления в сторону области низкого давления. Перепады давления действительно появляются, как только в среде образуются какие-либо случайные сгущения. Судьба сгущения, а с ней и судьба всего распределения вещества, зависит от того, какая сила окажется преобладающей — сжимающая сгущение сила его собственного тяготения или расталкивающее действие силы давления, возникшей благодаря перепаду давления между внутренностью сгущения и окружающей его средой.

Сила тяготения тем больше, чем больше масса сгущения, чем больше его размер, и потому она способна преодолеть противодействие давления, если этот размер превосходит некоторый критический размер, соответствующий равенству по величине обеих противоборствующих сил. Критический размер и есть джинсова длина. А условие развития гравитационной неустойчивости, — критерий Джинса, — состоит в том, что размер сгущения должен быть больше этой критической длины. Можно сказать, что Солнце и вообще любая звезда, в которой силы тяготения и давления уравниваются друг друга, имеют размер, равный джинсовой длине.

Но джинсова длина — это не универсальная постоянная, одинаковая всегда и всюду, а физическая величина, зависящая от конкретных условий — от давления и плотности среды. Она тем больше, чем больше давление и меньше плотность. Это мы уже знаем по картине гравитационной неустойчивости в расширяющейся среде Вселенной, о которой говорилось в главе второй. Если известны физические условия в дозвездной среде, то можно оценить критическую джинсову длину и тем самым найти размеры сгущений, на которые среда способна распасться, — вернее, нижнюю границу этих размеров.

Физические условия существенно различаются в разные эпохи звездообразования. Первые звезды Галактики возникали в сжимающемся протогалактическом облаке, причем звездообразование и послужило причиной, которая остановила в конце концов сжатие протогалактики

как целого. Возможность фрагментации протогалактического облака требовала, чтобы его размеры намного превосходили джинсову длину — тогда и отдельные фрагменты в нем могли иметь размер, превосходящий критическую длину. В этом смысле протогалактическое облако — это бесконечная среда в картине Ньютона; ведь бесконечность всегда означает фактически значительное преобладание чего-то над чем-то *).

Звезды, возникающие в современном состоянии Галактики, рождаются в плотных и холодных газо-пылевых облаках, сильно отличающихся по своим свойствам от облака-протогалактики. Но и здесь размеры исходных облаков должны быть много больше джинсовой длины, чтобы облака могли распадаться на фрагменты.

КАСКАДНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ

Протогалактическое облако распадалось не непосредственно на сгустки, имеющие звездные массы; скорее всего, сначала формировались гораздо более массивные уплотнения, которые в свою очередь распадались затем на все более мелкие фрагменты, пока, наконец, не возникли сгустки звездных масс. Такая последовательная фрагментация возможна, очевидно, при условии, что джинсова длина постепенно уменьшается в ходе общего сжатия и облака в целом, и каждого из фрагментов, на которые оно распадается (рис. 34).

Джинсова длина действительно уменьшается в ходе сжатия. И очень важно, что она уменьшается быстрее, чем общий размер всего облака при его сжатии. По этой причине и могут как раз возникать все более мелкие и по размеру и по массе фрагменты.

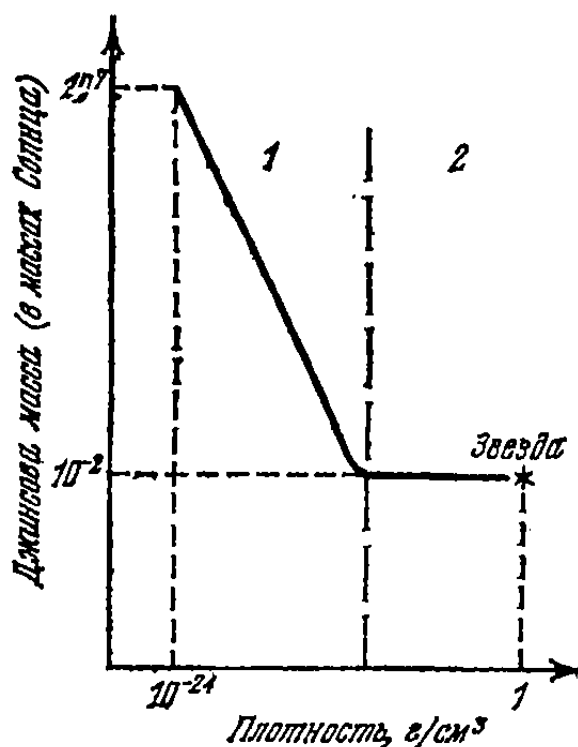
Такое поведение джинсовой длины определяется особым характером изменения давления и плотности в сжимающемся облаке. Фрагменты, на которые распадается протогалактическое облако, излучают фотоны в окружающее их пространство и тем самым теряют часть своей энергии. При этом, однако, они не охлаждаются, так как тепловая энергия каждого фрагмента постоянно возобновляется и пополняется при сжатии за счет гравитационной

*) Только в космологии бесконечность мира как целого имеет не относительный, а абсолютный смысл: если объем пространства бесконечен, то он на самом деле бесконечен, т. е. не выражается никакой конечной величиной, а не просто много больше какого-то другого объема.

энергии. В результате сжатие происходит при почти постоянной температуре, близкой к десяти тысячам градусов.

Это значение температуры соответствует границе между ионизованным и неионизованным состояниями водорода — основного элемента протогалактического газа. При

Рис. 34. Зависимость джинсовой массы от плотности в ходе каскадной фрагментации. Джинсова масса — это масса вещества в области с размером, равным джинсовой длине. По обеим осям — логарифмическая шкала. 1 — область прозрачности, где сжатие сопровождается фрагментацией; 2 — область непрозрачности, где происходит сжатие без фрагментации.



более высокой температуре электроны и ядра отделены друг от друга хаотическими тепловыми движениями, при более низкой температуре каждый электрон и ион объединяются, образуя атом, который участвует как целое в тепловом движении. Ионизованный газ довольно энергично высвечивает фотоны благодаря электрическому взаимодействию движущихся электронов с ионами. Кроме того, при температуре, близкой к десяти тысячам градусов, когда в среде появляются уже и нейтральные атомы, тепловая энергия частиц достаточно велика, чтобы при их столкновениях друг с другом эффективно возбуждать атомы, передавать связанным в них электронам заметную долю энергии тепловых движений. Эта энергия удерживается в атомах недолго, и атомы сбрасывают избыточную энергию своих электронов в виде квантов излучения, фотонов, которые быстро покидают сгущение. При более низких температурах невозможно сколько-нибудь существенное излучение, обязанное свободным электронам, так как они уже в большинстве своем входят в атомы; излучение атомов тоже при этом не эффективно, ибо энергия тепловых движений становится слишком малой, чтобы столкновения

частиц могли переводить атомы в возбужденное состояние. Если к тому же в среде не успевают образоваться молекулы водорода (для возбуждения молекул было бы достаточно и меньших энергий теплового движения), то при температурах ниже 10^4 К излучение энергии из системы вообще, можно сказать, не происходит.

В сжимающемся газе действует как бы саморегулировка температуры. Газ довольно легко охлаждается до граничного значения температуры в десять тысяч градусов, но дальнейшее охлаждение уже невозможно. Всякое же повышение температуры сверх этого значения за счет разогрева газа при сжатии немедленно устраняется излучением. Поэтому в течение всего процесса сжатия облака температура сама собой поддерживается вблизи указанного выделенного значения.

Расчеты показывают, что при температуре 10^4 К и плотности от 10^{-21} г/см³ до 10^{-24} г/см³ (последняя величина соответствует типичной плотности галактики, т. е. фактически плотности протогалактического облака в состоянии, когда его общее сжатие прекращается), джинсова длина составляет приблизительно 10^{23} — $3 \cdot 10^{21}$ см. В объеме с такими размерами содержатся массы от миллиарда до тридцати миллионов масс Солнца. Именно такие сгущения возникали и претерпевали, вероятно, дальнейшее сжатие и фрагментацию при почти неизменной температуре.

От характерной величины 10^{23} — $3 \cdot 10^{21}$ см джинсова длина убывает со временем до все меньших значений по мере сжатия и возрастания плотности большого облака, и вместе с ней уменьшаются, как мы уже говорили, и массы фрагментов внутри этого облака. Продолжается ли этот процесс неограниченно до сколь угодно малых масс? Нет, рано или поздно фрагментация остановится и дальнейшее дробление малых сгустков станет уже невозможным.

Дело в том, что при возрастании плотности вещества фотонам, уносящим из сгущения часть его энергии, становится все труднее выходить из сгущения наружу. Если при начальных, сравнительно малых плотностях они покидали каждый из фрагментов беспрепятственно, не встречая никаких затруднений, то при большей плотности на дальнейших стадиях сжатия фотоны, так сказать, застревают в среде и продвигаются к границе фрагмента много медленнее, чем при свободном пролете, испытывая все время по дороге взаимодействия с атомами или электронами, отклоняющими их от прямолинейного пути. Из прозрачного фрагмента фотон уходит по прямой, а из непрозрачного —

по ломаной линии, которая не скоро приводит его к свободной поверхности. Прозрачный фрагмент теряет поэтому энергию сразу из всего своего объема, а непрозрачный только с поверхности по мере того, как ее достигают рожденные внутри объема фотоны.

Как только фрагмент становится непрозрачным, соотношение между его размером и джинсовой критической длиной, определяемой давлением и плотностью, изменяется. В прозрачных фрагментах уменьшение джинсовой длины происходит, как мы говорили, быстрее, чем уменьшение размеров при сжатии; теперь же — из-за замедления отвода энергии — джинсова длина начинает уменьшаться значительно медленнее, так что размер фрагмента успевает сразу ее догнать. Ясно, что дальнейшая фрагментация невозможна, раз джинсова длина уже не мала по сравнению с размером сгустка. По мере дальнейшего излучения энергии вовне джинсова длина все же уменьшается, но размер сгустка быстро «подстраивается» под ее текущие новые значения. Сжатие фрагмента, таким образом, продолжается, но идет уже сравнительно медленно и не сопровождается дальнейшим его дроблением.

«Последний» сгусток в каскаде фрагментации, имеющий размер, сравнимый с джинсовой длиной, — это и есть пример конечного объема, не способного к фрагментации, о котором мы говорили выше в связи с ньютоновой картиной гравитационной конденсации.

Идея каскадной фрагментации, останавливаемой непрозрачностью, выдвинута Ф. Хойлом в 1953 г. Недавно его ученик М. Рис показал, что «последний» фрагмент имеет массу, равную приблизительно одной сотой массы Солнца. Замечательно, что эта величина практически не зависит ни от конкретных механизмов излучения фотонов из среды, ни от процессов, определяющих ее непрозрачность. Принимается лишь, что сжатие на стадии прозрачности протекает при постоянной температуре около десяти тысяч градусов — разумное предположение, как мы видели выше, — и тогда масса «последнего» сгустка выражается через одни лишь универсальные физические постоянные, такие, как гравитационная постоянная, квантовая постоянная Планка, скорость света и масса атома водорода. Масса «последнего» фрагмента близка к известным по астрономическим наблюдениям наименьшим звездным массам.

Картина каскадной фрагментации, ведущей к формированию первых звезд в нашей Галактике и в других галак-

тиках, красива и проста, но она не охватывает, конечно, всего многообразия физических процессов в сжимающемся протогалактическом облаке. Поэтому не нужно думать, что все звезды первого поколения должны обязательно иметь очень малые массы. Учет таких неизбежных и естественных факторов, как турбулизация протогалактической среды, столкновения облаков, возникновение в среде ударных волн и т. п., значительно усложняет и обогащает картину. И хотя многое еще остается не очень подробно изученным, тем не менее выясняется, что в первом поколении могут быть не только звезды малых масс, но и довольно крупные звезды с массами, в десятки раз превышающими массу Солнца.

И малые и крупные звезды начинают свое существование как сжимающиеся и уже не дробящиеся сгущения, протозвезды, температура которых постепенно возрастает из-за того, что вынос энергии из них наружу идет медленно после достижения непрозрачности. В их внутренней структуре происходят при этом существенные изменения: плотность не остается однородной во всем объеме, она быстрее нарастает в центре, чем на периферии. Центральная область становится со временем все более плотной, а потому и более горячей, и наконец, в ней загораются ядерные реакции. Ядерное энерговыделение повышает центральное давление настолько, что оно уже становится способным уравновесить гравитацию. Общее сжатие протозвезды прекращается, а вынос энергии с поверхности наружу компенсируется ядерными источниками в центре. Так сгущение-протозвезда превращается в звезду. Это последняя стадия гравитационной конденсации занимает, в зависимости от массы звезды, от нескольких миллионов лет для массивных звезд до сотен миллионов лет для звезд, менее массивных, чем Солнце.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

Звезды первого поколения в своем большинстве могли быть и не очень массивными; но те немногие из них, масса которых в 40 или 50 раз превышала массу Солнца, способны претерпеть значительные эволюционные изменения и превращения за десять или сто миллионов лет, т. е. за время, не превышающее продолжительность общего сжатия протогалактики. Последнее составляет от нескольких сотен миллионов до нескольких миллиардов лет. Массивные звезды исчерпывают свои ядерные источники энергии

в гораздо более быстром темпе, чем Солнце. После сгорания в недрах звезды водорода и образования из него гелия идет синтез и более тяжелых элементов, вплоть до железа, а потом звезда может взорваться, выбросив в окружающую среду образовавшиеся в ней ранее, а также и в самом процессе взрыва, тяжелые элементы.

Вероятно, в первые сотни миллионов лет существования нашей Галактики и других галактик могло произойти в основном накопление в природе элементов, более тяжелых, чем водород и гелий. Космическая среда становилась со временем все более и более богатой такими элементами, как углерод, кислород, азот и т. д. Напомним, что первичное вещество Вселенной, из которого формировались первые звезды, содержало водород (70—75% по массе), гелий (25—30%) и ничтожные (10^{-4} %) примеси дейтерия, лития и других легких элементов. Что же касается звезд последующих поколений, то исходным материалом для их образования служит среда, значительно, до 1—2%, обогащенная углеродом и другими тяжелыми элементами, выброшенными взорвавшимися звездами первого поколения. Роль этой примеси для процесса звездообразования и эволюции звезд, возникновения Солнца, планет, зарождения жизни на Земле, очень важна.

Газ, оставшийся после образования первых звезд, оседал к центру системы. Если протогалактика обладала значительным моментом вращения, то оседание газа к центру сменялось его накоплением в центральной плоскости галактики, когда центробежная сила оказывалась сравнимой с гравитационной. Так формировалась, по-видимому, плоская подсистема нашей Галактики.

Дальнейшее звездообразование могло происходить только в центральных областях Галактики и в ее плоскости, где имелись значительные массы газа, обогащенного тяжелыми элементами. Оно продолжается и в современную эпоху в спиральных рукавах Галактики, где, согласно наблюдениям, сосредоточены самые молодые и яркие звезды. Замечательно, что рождение звезд новых поколений происходит как бы на наших глазах и потому в отличие от проблем, которые мы обсуждали ранее, здесь возможно прямое наблюдательное изучение космогонического процесса.

Нужно, однако, сразу сказать, что традиционные оптические наблюдения, т. е. наблюдения в видимом свете с помощью оптических телескопов, сильно затрудняются тем обстоятельством, что мы сами находимся в диске Га-

лактики и смотрим на него изнутри. Присутствие в диске и в том числе вокруг нас облаков газа и космической пыли мешает наблюдениям в направлении плоскости Галактики: на луче зрения оказывается слишком много таких облаков и они заслоняют от нас то, что происходит на больших расстояниях. Лишь в близкой области с радиусом приблизительно 2 кпс, т. е. $6 \cdot 10^{21}$ см, наблюдения диска Галактики в оптическом диапазоне еще возможны. Но диаметр диска — 30 кпс, т. е. 10^{23} см, что в двадцать раз больше.

Толщина слоя газа и пыли составляет 300 пс, т. е. около 10^{21} см. Потому-то оптические наблюдения не вдоль, а поперек плоскости диска или во всяком случае под большими углами к ней оказываются вообще возможными; излучение, приходящее к нам по этим направлениям, поглощается, к счастью, незначительно.

Гораздо более эффективными средствами изучения диска Галактики обладает радиоастрономия. Радиоволны сантиметрового и миллиметрового диапазонов свободно распространяются в диске, практически не поглощаясь в облаках газа и пыли. Особое значение имеют радиоастрономические наблюдения на длине волны 21 см. В 40-е годы ван де Хюлст и И. С. Шкловский обратили внимание на то, что нейтральные атомы водорода в диффузной среде диска Галактики должны излучать радиоволну 21 см. Это излучение связано с переходами электрона в атоме водорода с одного энергетического уровня на другой вблизи основного, невозбужденного состояния атома. Эти уровни очень близки друг к другу и различаются только взаимной ориентацией спинов, т. е. собственных вращательных моментов ядра и электрона: на уровне с более высокой энергией спины параллельны, на уровне меньшей энергии они антипараллельны. По интенсивности излучения на этой длине волны можно судить о концентрации и температуре нейтрального водорода. В 1951 г. радиоизлучение этой природы было действительно зарегистрировано.

Дальнейшие исследования показали, что нейтральный водород распределен вплоть до расстояний в 20 кпс от центра Галактики. Температура межзвездного атомарного нейтрального водорода составляет около 100 кельвинов. Средняя концентрация в диске близка к одному атому водорода в кубическом сантиметре, что соответствует плотности 10^{-24} г/см³, сравнимой со средней плотностью Галактики в целом. Толщина слоя нейтрального водорода около 200—300 пс. Значительная часть нейтрального водо-

рода сконцентрирована в спиральных рукавах Галактики. Именно по распределению нейтрального водорода, излучающего на волне 21 см, и судят в первую очередь о спиральной структуре Галактики.

Очень важно, что в диффузной среде Галактики присутствуют молекулы, также проявляющие себя излучением в радиодиапазоне. На волне 18 см светит молекула гидроксила OH; излучение межзвездного гидроксила было предсказано И. С. Шкловским в 1949 г. и обнаружено наблюдательно в 1963 г. Интенсивность этого излучения по направлению из центра Галактики оказалась довольно значительной. Позднее было обнаружено еще около полусотни различных молекул — воды H_2O , водорода H_2 , окиси углерода CO и др. Довольно неожиданным было обнаружение таких сложных многоатомных молекул, как, например, этанол C_2H_5OH . Список молекул, открытых в межзвездной среде, пополняется каждый год.

Распределение молекул, или, вернее, облаков среды, богатых молекулами, не повторяет распределение атомарного нейтрального водорода в диске Галактики. Молекулы окиси углерода сосредоточены главным образом в пределах кольца вокруг центра Галактики, внешняя граница которого приближается к орбите Солнца (ее радиус около 10 кпс), а внутренняя граница имеет радиус около 3 кпс. Наибольшая плотность молекул наблюдается между радиусами приблизительно 4 и 7 кпс, где толщина кольца составляет 100 пс, что вдвое-втрое меньше толщины слоя нейтрального водорода.

Температура среды в областях, где наблюдаются окись углерода и другие молекулы, составляет приблизительно 10 кельвинов. При столь низких температурах столкновения могут возбуждать только самые низкоэнергичные состояния молекул. В молекуле окиси углерода эти состояния связаны с ее вращением вокруг собственной оси. Столкновения при указанной температуре способны привести к появлению вращения (самого слабого из разрешенных для этой молекулы законами квантовой механики), а остановка, прекращение вращения сопровождается излучением кванта электромагнитных волн, соответствующего длине волны 2,6 мм. Излучение межзвездной окиси углерода было впервые открыто в 1970 г. А. Пензиасом и Р. Вилсоном (которые пятью годами раньше открыли реликтовое излучение) и их сотрудниками.

Самые распространенные молекулы в диске Галактики — молекулы водорода H_2 . Молекулярный водород в

межзвездной среде был открыт по его ультрафиолетовым линиям излучения и поглощения. Это стало возможным лишь в 70-е годы, когда получила развитие внеатмосферная астрономия. (Ультрафиолетовое излучение небесных тел, кроме Солнца, поглощается земной атмосферой.). Полная масса молекулярного водорода близка, вероятно, к полной массе атомарного водорода в диске Галактики. Эту оценку получают на основании сведений об относительном

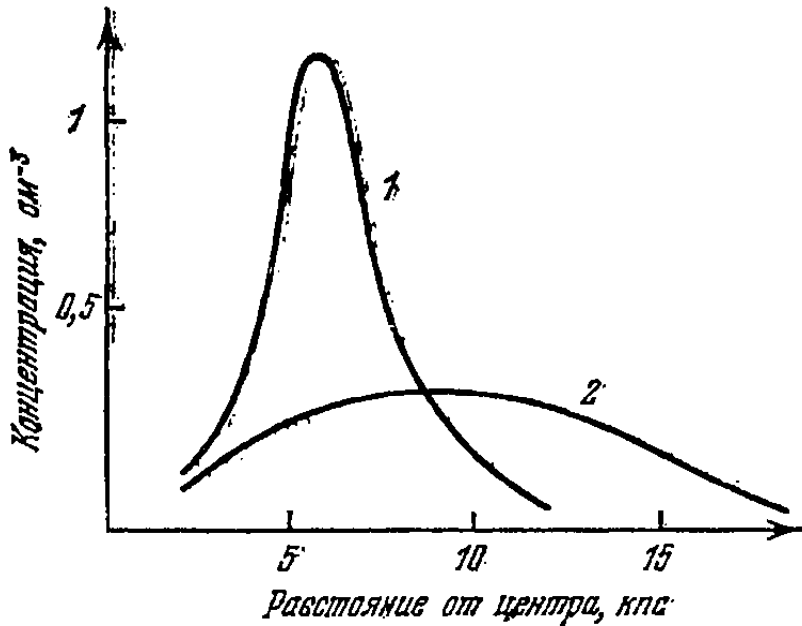


Рис. 35. Распределение молекулярного (1) и атомарного (2) водорода в диске Галактики.

содержанию молекулярного водорода и окиси углерода в близких молекулярных облаках, в которых удается независимо определить полное число молекул обоих видов (для этого используются данные радионаблюдений и данные наблюдений в рентгеновской и ультрафиолетовой частях спектра с борта космических аппаратов); в таких облаках молекул водорода оказывается приблизительно в десять тысяч раз больше, чем молекул окиси углерода. Непосредственные наблюдения молекулярного водорода затруднительны на больших расстояниях, но, как полагают, указанное отношение является типичным для молекулярных облаков галактического диска. Если так, то молекулярный водород, как и окись углерода, сосредоточен преимущественно в кольце молекулярных облаков; его общее распределение совсем иное, чем распределение атомарного водорода. Это различие иллюстрирует рис. 35.

Происхождение молекул, особенно многоатомных, обязано, по-видимому, физико-химическим процессам, в которых активная роль принадлежит космической пыли. Космические пылинки — это мельчайшие твердые частицы, преимущественно углеродные или с примесью льда с размерами 10^{-6} — 10^{-5} см. Они способны эффективно погло-

щать видимый свет, и главным образом из-за них затруднены, как мы говорили, оптические наблюдения в диске Галактики. На долю пыли приходится около одного процента массы межзвездной среды. Атомы, наталкивающиеся на какую-либо пылинку при их случайных блужданиях, прилипают к ее поверхности и получают возможность химически взаимодействовать между собой и объединяться в молекулы. Условия на поверхности пылинки действительно благоприятны для этого: концентрация атомов оказывается здесь гораздо выше, чем в среднем в межзвездной среде, и к тому же у атомов в их «спокойном» состоянии оказывается достаточно времени для завершения химических процессов. В этих химических превращениях поверхность пылинки играет роль и колбы и катализатора. Таким путем в межзвездной среде способны образовываться очень сложные органические молекулы, например, аминокислоты *).

Сами же пылинки образуются, по-видимому, в протяженных атмосферах холодных звезд — красных гигантов, богатых тяжелыми элементами, прежде всего углеродом. При истечении вещества из атмосфер этих звезд и его рассеянии в пространстве космические пылинки перемещаются с газообразным веществом межзвездной среды.

Пространственная плотность газо-пылевой среды меняется более или менее регулярно лишь в больших масштабах, сравнимых с размерами всего галактического диска. Такое крупномасштабное распределение для водорода показано на рис. 35; космическая пыль, в соответствии со сказанным выше, ассоциируется с молекулами и потому повторяет их распределение. В меньших же масштабах распределение газа и пыли крайне нерегулярно и клетчатое; области повышенной концентрации перемежаются почти пустыми объемами или объемами, заполненными горячим (до миллиона градусов) и очень разреженным газом. Сгущения, облака, имеют плотность, раз в 10 превышающую среднюю плотность среды. В типичном облаке размером в 40 или 50 лс содержится масса до ста тысяч или даже миллиона солнечных масс. Общее число таких облаков — 5—10 тысяч.

Облака хаотически перемещаются в пространстве с довольно большими скоростями, достигающими 6—8 км/с. Кроме того, они, конечно, участвуют вместе с диском Га-

*) Вероятно, такое происхождение имеют органические соединения, обнаруживаемые в особом типе метеоритов — хондритах.

лактники в его общем вращении; напомним, что вблизи Солнца линейная скорость этого вращения 220—250 км/с.

Именно в этих сгущениях, сравнительно холодных и плотных облаках, происходит образование звезд в современную эпоху. Но прежде чем перейти к этому вопросу, скажем немного о некоторых других свойствах межзвездной среды, также важных для понимания механизма звездообразования.

Межзвездная среда в диске Галактики пронизана магнитными полями. Хотя об их существовании догадывались уже давно, прямое наблюдательное обнаружение и исследование межзвездных магнитных полей стало возможным лишь в последние 20 лет. Магнитные поля регистрируются по их влиянию на свойства радиоволн, испускаемых атомами и молекулами, находящимися в этих полях. Поля влияют и на распространение радиоволн в межзвездной среде (при прохождении через намагниченную среду происходит поворот плоскости поляризации электромагнитной волны).

Магнитные поля прочно связаны с облаками межзвездной среды и движутся вместе с ними. Общее направление магнитных силовых линий совпадает с направлением ветвей спиральной структуры Галактики. Напряженность магнитного поля в диске Галактики составляет $3 \cdot 10^{-6}$ — 10^{-5} эрстед (Э), что в сотни тысяч раз меньше напряженности магнитного поля Земли.

Первые соображения о существовании межзвездных магнитных полей были высказаны в связи с проблемой удержания в Галактике космических лучей. Космические лучи — это заряженные частицы (протоны, ядра более тяжелых элементов, а также электроны), движущиеся со скоростями, близкими к скорости света*). Они проводят в Галактике, как полагают, не менее нескольких миллионов лет, тогда как при свободном пролете покинули бы ее за сто тысяч лет. Их удерживают в объеме Галактики магнитные поля, заставляющие заряженные частицы двигаться вдоль магнитных силовых линий по спиральным, винтовым траекториям. Магнитное поле имеет сложную структуру силовых линий, и космическим лучам приходится долго «петлять» в объеме Галактики, прежде чем они выйдут из него наружу (рис. 36). Эта картина полностью подтверждается современными наблюдениями межзвездных магнитных полей.

* О космических лучах можно прочитать в научно популярной книге В. Л. Гинзбурга (1967).

Двигаясь в межзвездных магнитных полях, быстрые электроны космических лучей излучают радиоволны, которые действительно наблюдаются как общее радиоизлучение Галактики. Картина Галактики в радиолучах (метрового диапазона) включает в себя три главных структурных элемента — сферическое (или, может быть, слегка уплощенное) гало, диск и центральное ядро. По своим размерам радиогало и радиодиск близки к звездному гало и звездному диску; область повышенного радиоизлучения в центре — ядро — имеет уплощенную форму, как бы повторяющую форму галактического диска с размером (в плоскости диска) около 300 пс. Природа радиоизлучения из гало и ядра та же, что и из диска, т. е.

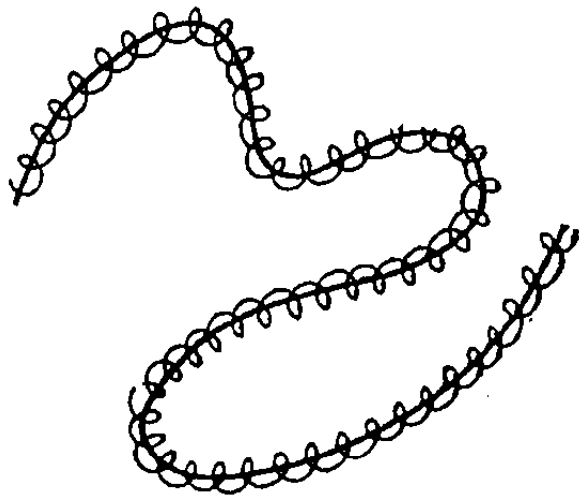


Рис. 36. Движение заряженной частицы вдоль магнитной силовой линии.

это излучение электронов космических лучей в магнитном поле. Отсюда, в частности, следует, что магнитное поле — возможно, несколько более слабое, чем в диске, — имеется и в гало Галактики, а в ее ядре поле значительно сильнее.

Между тремя компонентами межзвездной среды — газо-пылевыми облаками, космическими лучами и магнитным полем — существует особого рода равновесие: общая энергия космических лучей, энергия магнитного поля и кинетическая энергия хаотических движений облаков приблизительно равны между собой. До сих пор остается не вполне ясным, как это энергетическое равновесие устанавливается и поддерживается. Но несомненно, что между облаками, полем и космическими лучами имеется тесная взаимосвязь; так, космические лучи довольно прочно «приклеены» к силовым линиям поля, которые в свою очередь прочно «привязаны» к движущимся облакам. Чтобы эта связь действительно была эффективной, а главное, взаимной, энергии всех трех компонент среды должны быть, очевидно, сравнимы между собой. В расчете на один кубический сантиметр объема Галактики каждая из этих энергий составляет в среднем 10^{10} Дж.

Недавние исследования показали, что сходное строение имеют и плоские подсистемы других галактик, богатых диффузной средой и молодыми яркими звездами. Например, в ближайшей к нам гигантской спиральной галактике, Туманности Андромеды, тоже различают более или менее равномерный слой нейтрального водорода и кольцо газопылевых облаков, содержащих межзвездные молекулы. В это кольцо погружены самые яркие звезды туманности, образующие ее спиральный узор. Наблюдается и радиогало этой галактики.

Много газа и пыли имеется в неправильных галактиках, таких, как Большое Магелланово Облако — один из объектов южного неба. Там же наблюдается и большое число очень ярких, очень молодых звезд, что с полной несомненностью указывает на связь звездообразования с присутствием необходимого для этого диффузного, разреженного материала.

Только в эллиптических галактиках незаметен межзвездный газ в сколько-нибудь значительных количествах. Но там отсутствуют и молодые звезды, а процесс звездообразования, по-видимому, давно завершился. Эти галактики имеют только сферическую подсистему (как правило, в той или иной степени уплощенную), близкую по структуре и звездному составу к гало нашей Галактики. Эволюционные процессы в эллиптических галактиках протекают очень медленно, они почти замерли, их звезды меняются на протяжении миллиардов лет, и только в самых центральных областях этих галактик еще «продолжается жизнь», но зато в этих областях возможны такие проявления активности, до которых очень далеко спиральным или неправильным галактикам (см. об этом в главе пятой).

МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДЫ

Картина образования первых звезд Галактики, которую мы описали в начале этой главы, основывалась почти исключительно на теоретических соображениях. Что же касается новых поколений звезд, образующихся в современную эпоху, то здесь имеются прямые и обширные наблюдательные сведения.

Наблюдения определенно указывают на то, что самые молодые звезды находятся там, где сосредоточены большие массы диффузного, разреженного вещества. Только что возникшие звезды наблюдаются в больших и плотных молекулярных облаках. Наблюдаются даже и протозвезды,

погруженные в сгущения газа и пыли, из которых они образовались. Так, астрономы полагают, что давно уже известная, но не вполне обычная звезда Т Тельца и некоторые другие подобные ей звезды — это в действительности протозвезды, т. е. плотные сгущения, разогреваемые при сжатии за счет потенциальной энергии тяготения, а не вследствие ядерных реакций. Светимость протозвезд почти такая же, как у звезд той же массы; но их размеры заметно больше и потому протозвезды, особенно их поверхностные слои, заметно холоднее, а их свет краснее, чем у уже сформировавшихся звезд. Звезды типа Т Тельца обычно погружены в темные туманности.

Удивительное проявление протозвезд — космические мазеры. Устройства, изобретенные и построенные физиками с немалыми усилиями, действуют, оказывается, сами собой в космической среде. Как известно, мазерный эффект возникает тогда, когда среда, в которой распространяется излучение от какого-либо источника, находится, так сказать, в активированном состоянии, т. е. когда в ней имеется аномально много возбужденных атомов или молекул. Активация, или, как говорят, энергетическая накачка, среды должна осуществляться каким-то другим, посторонним источником. Фотоны с энергией, соответствующей переходу с возбужденного уровня энергии атома или молекулы на основной, будут вызывать при своем распространении в такой среде излучение новых фотонов той же энергии, вынуждая атомы и молекулы возвращаться в невозбужденное состояние. В результате поток фотонов данной энергии может оказаться, таким образом, очень существенно усиленным *).

Такое неожиданно интенсивное излучение из молекулярных облаков в Большой Туманности Ориона и было обнаружено в 1965 г. в радиоастрономических наблюдениях на длине волны 18 см, соответствующей переходу с возбужденного на основной уровень энергии в уже упомянувшейся молекуле гидроксила. По идее, высказанной И. С. Шкловским, это излучение обязано мазерному механизму, действующему в плотных облаках, превращающихся в протозвезды, или в поверхностных слоях протозвезд. Наблюдения показали, что излучение приходит из довольно плотных участков среды, где концентрация частиц, главным образом, по-видимому, молекул — составляет

*) Напомним, что слово «мазер» — от «microwave amplification by stimulated emission of radiation», т. е. «микроволновое усиление стимулированным испусканием излучения».

10^8 — 10^9 на кубический сантиметр. Размеры излучающих областей — около одной сотой парсека. Температура вещества оценивается приблизительно в тысячу кельвинов. Вероятно, именно такими и должны быть условия в оболочке протозвезды *).

Вопрос об источнике энергетической накачки, необходимой для усиления излучения, остается пока открытым (возможно, она обеспечивается достаточно мощным инфракрасным излучением нагретой пыли или самой протозвезды); но в пользу гипотезы оболочек протозвезд как среды для мазерного эффекта служит тот факт, что в больших молекулярных облаках, где наблюдаются мазерные источники, всегда имеются только что образовавшиеся молодые, яркие звезды — верный указатель продолжающегося процесса звездообразования.

Превращение протозвезды в звезду сопровождается существенными изменениями в окружающей ее среде. Это связано прежде всего с влиянием на среду излучения звезды, которое становится более коротковолновым. По мере прогрева поверхности звезды цвет испускаемого ею излучения меняется от красного к голубому **); в излучении появляются и фотоны ультрафиолетовой части спектра. Эти «горячие» фотоны разрушают молекулы, ультрафиолетовое излучение заставляет молекулы водорода диссоциировать на атомы. Затем, при появлении в излучении звезды еще более коротковолновых фотонов, происходит диссоциация атомов водорода на протоны и электроны, и газ становится ионизованным.

Ионизованный водород образует вокруг звезды сферический слой, называемый в астрономии зоной H II. Фотоны производят и разогрев ионизованного газа, отдавая свою энергию электронам и протонам, так что температура газа в зоне H II достигает десяти тысяч градусов. Так как газ здесь гораздо горячее, чем в окружающей эту зону облаке (где температура не выше 10—100 кельвинов), то и давление в зоне ионизованного водорода больше, чем снаружи. Это создает силу, которая заставляет горячую зону расширяться, пока давление внутри нее не сравняется с внешним давлением.

*) После космических мазеров на гидроксиле были открыты и мазеры на водяных парах, излучающие радиоволну 1,35 см. Интенсивность «водяных» мазеров оказалась даже еще выше.

***) Железный стержень, нагреваемый на огне, тоже становится сначала красным, а при дальнейшем повышении температуры доходит «до белого каления» и становится голубым,

Зоны Н II излучают видимый свет и потому уже давно известны астрономам. Надежно установлена и их связь с молодыми звездами. При этом чаще всего внутри каждой такой зоны имеется не одна, а несколько молодых горячих звезд. Это массивные и яркие звезды. Они принадлежат к классам О и В по спектральной классификации, в которой все звезды, в зависимости от их цвета делятся на 9 классов, обозначаемых буквами О, В, А, F, G, К, М, R, N в порядке изменения цвета от голубого к красному. (Солнце принадлежит к промежуточному, срединному классу G; на среднюю зеленовато-желтую часть солнечного спектра приходится максимум чувствительности глаза.) По всем признакам, по которым судят о возрасте звезд, звезды классов О и В — это самые молодые звезды в Галактике *).

Замечательная особенность звезд классов О и В состоит в том, что они в большинстве своем объединяются в группы, насчитывающие до нескольких сотен звезд. Такие группы называют ОВ-ассоциациями. Как впервые заметил В. А. Амбарцумян, это обстоятельство указывает на то, что звезды образуются не поодиночке, а коллективно, группами. Более того, согласно новейшим данным, молодые звезды практически всегда составляют группировки того или иного рода. Наиболее крупные из них — гигантские звездные комплексы, обнаруженные Ю. Н. Ефремовым. Почти все известные в Галактике ОВ-ассоциации являются частями звездных комплексов или очень молодых звездных скоплений, которые тоже, как правило, входят в звездные комплексы. Типичный возраст звезд в звездных комплексах не превышает 50 миллионов лет.

Звездные комплексы, несомненно, образуются в больших молекулярных облаках — самых крупных сгущениях газа и пыли. Внутри них наблюдаются и молекулярные мазеры-протозвезды, и ОВ-ассоциации, и зоны Н II. При этом иногда удается проследить последовательность событий, развивающихся в молекулярном облаке и связывающих протозвезды, ОВ-ассоциации и зоны Н II в единую эволюционную цепь.

Наиболее значительное открытие в этой области сделано несколько лет назад А. Блаау (Голландия). Он установил, что ОВ-ассоциации состоят из подгрупп, насчитывающих каждая от 5 до 20 звезд, причем эти подгруппы

*) Подробнее о цвете и спектрах звезд, о связи их массы, светимости и возраста с цветом см. книгу Б. А. Воронцова-Вельяминова (1980).

располагаются в объеме ассоциации по возрасту: подгруппа самых молодых членов ассоциации лежит на одном краю ассоциации, тогда как самые старые ее члены составляют подгруппу, лежащую на противоположном краю ассоциации. Такая возрастная последовательность в местоположении подгруппы означает, что звездообразование, породившее ассоциацию, протекало последовательными вспышками, причем возникновение одной вспышки инициировало другую вспышку в соседней области. По облаку распространялась как бы волна звездообразования, формирующая звезды сначала на одном его краю, а затем перемещавшаяся к противоположному краю.

Б. Элмгрин и Ч. Лада нашли простой и убедительный космогонический механизм, способный привести к обнаруженному Блаау явлению. Они исходили из того, что область ионизованного и горячего водорода, область H II, возникающая вокруг новорожденной звезды класса O или B, расширяется и толкает перед собой окружающий ее холодный газ. Скорости, сообщаемые таким образом холодному газу, составляют 5 или даже 10 км/с, что больше скорости звука в этом газе (последняя не превышает одного километра в секунду). Поэтому в холодном молекулярном газе возникает ударная волна, которая формирует за своим фронтом слой сжатого и разогретого газа. Постепенное охлаждение газа из-за излучения ведет к его дальнейшему уплотнению, и через несколько миллионов лет температура и давление в нем упадут настолько (а плотность настолько возрастет), что станет возможна гравитационная конденсация слоя.

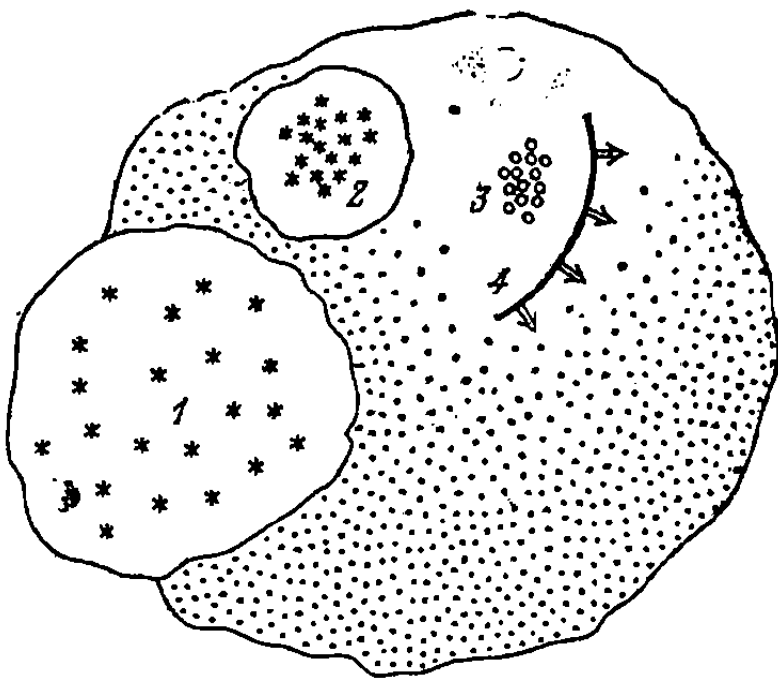
Как мы говорили в начале этой главы, конденсация сопровождается каскадной фрагментацией вещества. В условиях газо-пылевой среды в молекулярных облаках она протекает не совсем так, как в первичном газе протогалактики. Например, здесь уже невозможно поддержание температуры на уровне десяти тысяч кельвинов; охлаждение газа при наличии в нем примеси углерода, кислорода, азота снижает температуру до значений, в сотни раз меньших. Но, вероятно, именно поэтому в таком процессе способны рождаться преимущественно звезды большой массы. Молодые массивные звезды — всегда звезды классов O и B. А это означает, что они в свою очередь тоже формируют вокруг себя зону H II; новая зона H II создает новую ударную волну в свежем молекулярном газе, которая еще через несколько миллионов лет порождает новую вспышку звездообразования. Процесс снова и

снова повторяется, перемещая очаг звездообразования с одного края облака на другой.

В этой картине находят наглядное объяснение и сам факт существования звездных подгрупп разного возраста в одной ассоциации, и возрастная неоднородность в расположении подгрупп.

Более того, недавно появились прямые наблюдательные данные о волнах звездообразования, распространяющихся в больших молекулярных облаках. Например, яр-

Рис. 37. Волна звездообразования, распространяющаяся с востока на запад в молекулярном облаке. 1 — «старая» зона Н II со «старой» подгруппой звезд О и В; 2 — «молодая» зона Н II с молодой подгруппой звезд О и В; 3 — протозвезды, 4 — фронт ударной волны. На астрономических картах восток слева, а запад справа.



кая туманность в созвездии Кассиопеи, представляющая собой светящееся облако ионизованного водорода с погруженными в него молодыми звездами, является, как показали радионаблюдения, частью крупного молекулярного облака размером в 50 пс. Сама туманность Кассиопеи (рис. 37) состоит из двух зон Н II. Крайняя восточная зона (ее обозначают IC 1805) — это довольно старая, диффузная зона Н II, которая расширяется и рассеивается, обнажая внутри себя подгруппу по крайней мере из двадцати звезд классов О и В, далее к западу от нее располагается более молодая и менее разреженная зона Н II (ее обозначают IC 1795), которая тоже расширяется. Она, безусловно, содержит молодые звезды, но они скрыты от нас облаками газа и пыли. Западная граница молодой зоны Н II движется в глубь молекулярного облака. Вблизи этой границы имеется несколько весьма компактных источников радиоизлучения и излучения в инфракрасной области спектра — это массивные протозвезды или только

что сформировавшиеся массивные звезды. Именно так и должна выглядеть волна звездообразования в молекулярном облаке.

Но что породило первые яркие звезды, с которых началась «цепная реакция» звездообразования? Несомненно, это связано с каким-то внешним воздействием на молекулярное облако. Может быть, на него налетело соседнее молекулярное облако — ведь облака хаотически движутся друг относительно друга в диске Галактики. Скорость сталкивающихся облаков больше, чем скорость звука в их веществе; поэтому такое столкновение могло привести к формированию ударной волны на соприкасающихся краях облаков. Вернее, возникают две ударные волны, которые распространяются в разные стороны от поверхности соприкосновения облаков, и в каждом из них за фронтом ударной волны формируется слой уплотненного газа, способный претерпеть дальнейшую гравитационную конденсацию и фрагментацию. Правда, расчет показывает, что вероятность таких столкновений не очень велика; вряд ли можно ожидать во всей Галактике более одного столкновения за каждые десять миллионов лет. Для наблюдаемого темпа звездообразования в молекулярных облаках этого, по-видимому, недостаточно.

Другая возможность связана с взрывами звезд на поздних этапах их эволюции. Такие взрывы наблюдали в нашей Галактике и наблюдают в других галактиках как вспышки сверхновых. При таком явлении оболочка звезды, а то и весь ее материал, выбрасывается с большой скоростью, что создает в окружающей среде взрывную ударную волну. Если это произошло не очень далеко от соседнего молекулярного облака (в пределах нескольких парсеков), то в этом облаке вполне может возникнуть достаточно значительное уплотнение, чтобы «поджечь» в нем процесс звездообразования.

Наконец, ударные волны в молекулярных облаках могут возникнуть благодаря спиральной волне плотности в диске Галактики. Вращение диска Галактики превращает распространяющиеся в нем возмущения в спиральные волны (см. главу третью). Эти волны «накатываются» на холодный газ облаков со скоростью, которая больше скорости звука в газе, что и порождает в облаках ударные волны. Астрономы заметили, что в молекулярных облаках, лежащих вдоль спиральных рукавов, зоны H II встречаются чаще, чем в тех облаках, которые находятся вне рукавов. Возможно, это как раз и связано с ударными

волнами, которые возбуждаются в облаках спиральными волнами и порождают в свою очередь горячие звезды.

Возможно, все три механизма, о которых мы сказали, способны так или иначе действовать в реальных условиях межзвездной среды; во всяком случае на основании тех данных, которые сейчас имеются, ни одному из них нельзя определенно отдать предпочтение.

Другой вопрос, который возникает в связи с картиной цепной реакции звездообразования, представляется, пожалуй, более трудным. Как объяснить на этом пути образование не только массивных звезд классов О и В, но и обычных звезд, подобных Солнцу, которых больше всего? Эти звезды тоже возникают путем гравитационной конденсации и фрагментации вещества и, вероятно, в тех же вспышках звездообразования, которые порождают массивные звезды. Дробление большого сгустка на крупные фрагменты вряд ли обходится без появления «осколков» меньших масс, которых может быть много больше по числу, чем массивных фрагментов.

В процессе дробления, порождающем достаточно большое число фрагментов, могут действовать весьма общие статистические закономерности, не зависящие от природы фрагментирующихся тел и от конкретных механизмов фрагментации. В 40-е годы А. Н. Колмогоров обратил внимание на то, что, согласно многочисленным эмпирическим данным, размеры и массы частичек золота, вымываемых из золотосодержащего песка, всегда распределены по вполне определенному (логарифмически нормальному) закону. Наибольшее число частиц имеет некоторую среднюю массу, а меньших и больших по массе частиц тем меньше, чем сильнее отличие их массы от средней. А. Н. Колмогоров доказал, что такое распределение возникает в очень большом числе самых разнообразных процессов дробления, или, как мы бы сказали, каскадной фрагментации, когда исходная масса последовательно делится на всё меньшие части. При этом и исходная масса, и любой ее фрагмент могут распадаться в каждом отдельном акте дробления на произвольное число фрагментов, произвольно распределенных по массам. Нужно только, — по это довольно сильное условие, — чтобы вероятность фрагментации в каждом акте не зависела от величины исходной массы.

Астрономические данные о массах звезд, теоретические и наблюдательные соображения о темпе их эволюции

позволили Э. Солпитеру (США) построить эмпирический закон распределения звезд по массам. Согласно этому закону число звезд с данной массой тем меньше, чем больше эта масса (рис. 38). В отличие от распределения А. Н. Колмогорова, этот закон не выделяет никакой средней, типичной массы. Но он, вероятно, не распространяется на звезды самых малых масс, которых, по-видимому, должно

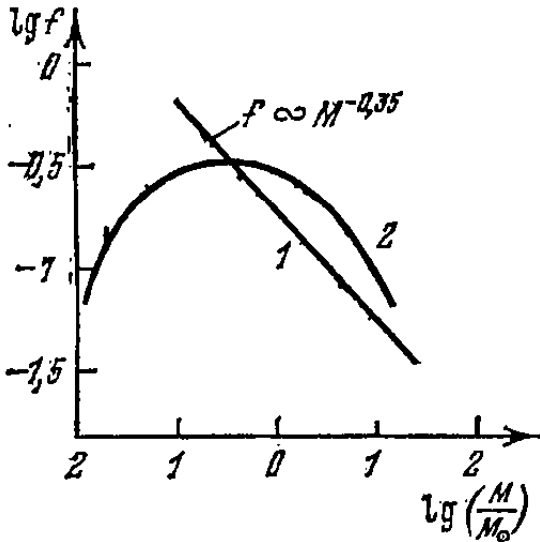


Рис. 38. Распределение звезд по массам. f — доля полной массы данной совокупности звезд, приходящаяся на единичный логарифмический интервал масс звезд (измеренных в солнечных массах M_{\odot}). 1 — закон Солпитера, 2 — распределение Колмогорова.

быть всё же меньше, чем типичных — это означает наличие «завала» к малым массам в действительном распределении звезд. Реальный закон распределения звезд по массам — с учетом такого «завала» — вряд ли может быть, однако, строго симметричным относительно какой-то типичной массы: скорее всего, имеется перевес в сторону малых масс. Из сопоставления этих соображений с теорией А. Н. Колмогорова следует, что, по-видимому, имеется определенная зависимость вероятности фрагментации от массы фрагментов (т. е. при образовании звезд нарушается условие, принятое в математической теории).

Такая зависимость должна иметься в том случае, когда размеры фрагментов в каждом акте дробления лишь немного превышают джинсову длину.

Схема каскадной фрагментации, о которой мы говорили в связи с первыми звездами Галактики, действует и для звезд новых поколений, хотя конкретные физические процессы (теплоотвод, охлаждение и нагрев газа) имеют в этом случае иной характер. Последовательная теория, позволяющая объяснить как характерные массы звезд, так и распределение звезд по массам, должна сочетать в себе идеи каскадной фрагментации с универсальными результатами теории вероятностей, подобными закону Колмогорова. Такая теория пока еще не построена. Но интересно, что каскадная фрагментация при звездообразовании действительно происходит так, что размеры фрагментов близки к критической джинсовой длине, и потому

можно ожидать, что закон распределения звезд по массам на самом деле должен быть несимметричным относительно типичной массы, на что и указывает закон Селигера.

НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ОБЛАКА

Итак, звезды новых поколений образуются в облаках молекулярного водорода, богатых другими молекулами и космической пылью. Но как возникают сами эти облака?

Физическое состояние межзвездной среды определяется в первую очередь процессами нагрева и охлаждения. Нагрев осуществляется космическими лучами (точнее, теми их частицами, которые имеют сравнительно низкую энергию) и фоновым рентгеновским излучением Вселенной, которое складывается, по-видимому, из излучения таких источников рентгеновских лучей, как скопления галактик. Вблизи горячих ярких звезд источником нагрева межзвездного газа может служить и излучение звезд (как это происходит, например, в зонах H II). Охлаждение обязано главным образом столкновением атомов и молекул друг с другом; при столкновениях происходит возбуждение атомов и молекул за счет энергии их хаотического движения; возвращаясь потом в исходное невозбужденное состояние, атомы и молекулы высвечивают полученную ими энергию в виде фотонов, которые уходят из среды. Так тепловая энергия частиц превращается в излучение и теряется средой.

Энергия, которую каждый элемент среды получает в единицу времени извне при нагреве, пропорциональна числу частиц в этом элементе. Но потеря энергии пропорциональна квадрату числа частиц. Различие это связано с тем, что нагрев производится «чужими» частицами — космическими лучами или рентгеновскими фотонами, а охлаждение требует парного столкновения самих частиц газа друг с другом. Поэтому в единичном акте нагрева участвует одна частица газа, а в единичном акте охлаждения — две; отсюда и следует пропорциональность скорости нагрева первой степени числу частиц, а скорости охлаждения — второй степени, квадрату числа частиц.

Такой характер нагрева и охлаждения делает среду неустойчивой: она не может оставаться однородной, а стремится распасться на сгущения, погруженные в более разреженный газ. Эта неустойчивость похожа по своему конечному результату на гравитационную неустойчивость, о которой мы уже многое знаем, но ее физический

механизм совсем иной, он никак не связан с гравитацией и целиком определяется тепловыми процессами. Поэтому такую неустойчивость называют тепловой.

Чтобы объяснить природу тепловой неустойчивости, представим себе, что межзвездный газ находится в таком состоянии, что его плотность однородна, а нагрев в каждом элементе среды точно компенсируется охлаждением. Пусть теперь какой-то элемент газа оказался немного более плотным, чем окружающая его среда, т. е. число частиц в нем немного больше, чем в равном ему объеме однородной среды. В этом элементе, очевидно, сразу нарушается баланс нагрева и охлаждения: и то и другое будет происходить в нем быстрее, чем в окружающей среде, но охлаждение опережает нагрев, так как охлаждение чувствительнее, чем нагрев, к числу частиц. Значит, температура газа в этом элементе упадет по сравнению с окружающей средой, а следовательно, упадет и давление в нем. Но тогда внешнее, более высокое давление среды будет сжимать элемент, стремясь восстановить в нем прежнее давление. Из-за этого плотность, а с ней и преобладание охлаждения над нагревом возрастут еще больше, температура и давление упадут до еще более низких значений, и внешнее давление сожмет элемент еще сильнее. Поэтому, раз начавшись, сжатие данного элемента будет все нарастать и нарастать. Явление действительно имеет, как мы видим, характер неустойчивости: любое слабое уплотнение в межзвездной среде не рассасывается, а самопроизвольно усиливается со временем.

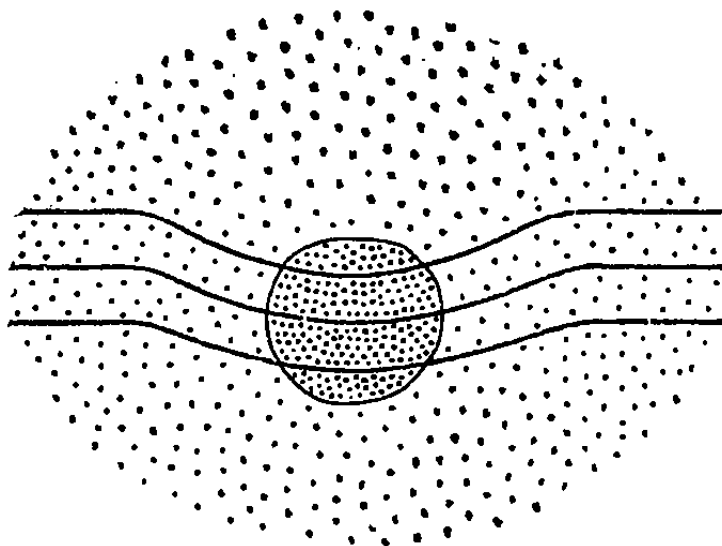
Развитие тепловой неустойчивости останавливается, когда газ в сжимающемся элементе охладится настолько, что тепловая энергия его частиц окажется уже недостаточной для возбуждения атомов и молекул. Тогда охлаждение элемента прекращается и устанавливается его равновесие с окружающей средой. Хотя температура в таком уплотнении ниже, чем в окружающей среде, но зато плотность больше, и потому давление (а оно пропорционально произведению температуры на плотность) становится в конце концов равным давлению окружающей среды. Внешнее давление восстановило в элементе исходное давление, но уже при меньшей температуре и большей плотности.

Так в межзвездном газе возникают плотные и холодные облака, окруженные разреженной и более нагретой средой. По теоретическим оценкам Дж. Филда, С. Б. Пикельнера и С. А. Канлана, облака должны иметь как раз такие

массы и размеры, которые следуют из наблюдений. Равновесие по давлению со средой, в которую они погружены, не дает облакам рассосаться. Их разрушает лишь звездообразование, инициируемое внешними воздействиями.

Помимо тепловой неустойчивости в межзвездной среде действуют и другие процессы, способные вызвать ее неод-

Рис. 39. Неустойчивость и образование облака в среде с магнитным полем.



нородность и клочковатость. Один из них связан с магнитными полями, которые пронизывают весь газ в диске Галактики. Их силовые линии проходят в основном параллельно плоскости Галактики; напряженность полей составляет несколько микроэрстед. Слои газа с горизонтальными силовыми линиями обладают дополнительной упругостью: магнитное поле мешает газу двигаться поперек силовых линий. Эта «магнитная упругость» действует только поперек поля, вдоль же силовых линий газ может перемещаться свободно.

Если случайно в каком-либо участке среды силовые линии поля прогнутся, как это показано на рис. 39, то газ станет «соскальзывать» во впадину под действием силы тяготения, направленной к центральной плоскости Галактики (на нашем рисунке вниз). Под тяжестью этих новых порций газа силовые линии еще более прогнутся, впадина углубится, и скорость втекания в нее газа возрастет. В результате в среде возникает значительное уплотнение — облако. Как показал Э. Паркер, такой процесс может весьма эффективно действовать в газе спиральных рукавов Галактики, где и сосредоточены в основном силовые линии галактического магнитного поля.

Наконец, в межзвездной среде может развиваться и гравитационная неустойчивость, еще более уплотняющая

облака. Для этого, как всегда, размер облака должен быть больше критической джинсовой длины. Для не слишком крупных облаков в зонах неионизованного атомарного водорода, о которых судят по радиоизлучению на волне 21 см, это условие, по-видимому, не выполняется. Однако крупные облака в кольце молекулярного водорода в диске Галактики имеют размеры, сравнимые с критической длиной, соответствующей их плотности и температуре. Это, вероятно, означает, что гравитационная неустойчивость либо действует сейчас, либо действовала ранее, придавая облакам их наблюдаемые размеры.

ЖИЗНЬ ЗВЕЗДЫ

Усиление слабых неоднородностей в диффузном веществе, возникновение облаков, их гравитационная конденсация и фрагментация — вот общее направление процесса, который ведет к формированию звезд и звездных комплексов. При всем различии конкретных физических процессов в изначальном водородно-гелиевом веществе протогалактики и в современном межзвездном газе, эта последовательность событий одинакова для первых звезд Галактики и для звезд новых ее поколений. Да и сами звезды, рождавшиеся миллиарды лет назад и возникающие в современную эпоху, очень похожи друг на друга в своих главных, принципиальных свойствах.

Звезды всех поколений в нашей Галактике и в других галактиках начинают свою эволюцию с состояния, подобного нынешнему состоянию Солнца. Различия между звездами разных поколений — результат их дальнейшей эволюции, темп и конечный итог которой самым радикальным образом зависят от звездных масс. Определенные черты структуры и эволюционного пути связаны также с химическим составом звезд: содержание элементов, более тяжелых, чем водород и гелий, неуклонно возрастает от поколения к поколению. Но важнее всего масса звезды. Как мы уже говорили, ею определяется в первую очередь продолжительность пребывания звезды в начальном, «солнечном» состоянии, когда она излучает энергию за счет ядерных превращений в ее недрах.

Звезда, масса которой превышает массу Солнца в несколько десятков раз (например, звезда класса O) находится в таком состоянии не более 3—8 миллионов лет. Для звезды с массой Солнца этот период затягивается до 13—15 миллиардов лет. Звезда с массой, вдвое меньшей

массы Солнца, остается в начальном состоянии почти сто миллиардов лет. Эти данные нужно сопоставить с возрастом Галактики. С момента образования Галактики прошло 12—15 миллиардов лет. Отсюда, очевидно, следует, что из звезд первого поколения только наименее массивные, с массами, меньшими солнечной, могут наблюдаться сейчас в своем первоначальном состоянии. Именно такие звезды и составляют самое старое население Галактики, население ее сферической подсистемы. Более массивные и более яркие звезды, которые тоже имелись там когда-то, давно сошли со сцены.

Исчерпав за несколько миллионов лет запасы водорода в центральной своей зоне, массивная звезда вступает в новую фазу эволюции. Ядерные реакции протекают теперь не в ее ядре, состоящем уже целиком из гелия, в который «перегорел» водород, а в тонком слое водорода вокруг этого ядра. Звезда с такого рода слоевым источником увеличивает свою светимость и как бы разбухает. Из-за увеличения размеров снижается температура поверхностных слоев звезды и потому ее цвет становится из голубого красным. Так звезда класса O или B превращается в звезду нового типа — красный гигант.

Изменения тем временем происходят и в гелиевом ядре звезды. Оно постепенно сжимается и разогревается; когда температура достигнет 100—150 миллионов градусов, гелий загорится — в нем начнутся ядерные реакции слияния трех ядер гелия в ядро углерода. Связанное с этим энерговыделение еще более разогревает ядро и возросшее в нем давление останавливает сжатие. Вместе с тем увеличивается общая светимость звезды, питаемая теперь и слоевым источником и гелиевым ядром. Как показывают расчеты, несколько повышается из-за этого и поверхностная температура звезды. Но эта стадия длится недолго, она короче первоначальной, «солнечной» стадии, и завершается исчерпанием гелия в плотном горячем ядре.

Что происходит со звездой дальше? Звезда теряет свою оболочку — ее наружные слои отделяются от ядра и расширяются, образуя то, что астрономы наблюдают издавна и называют планетарной туманностью*). Что же касается ядра, то, если его масса не больше, чем 1,2 массы Солнца, оно обнажается и предстает как звезда малого размера с довольно высокой температурой. Такие звезды

*) Об этих интересных объектах см. книгу И. С. Шкловского (1982).

известны как белые карлики — белые из-за их цвета, соответствующего высокой температуре поверхности, а карлики из-за небольшой светимости. Малая светимость связана с малым размером излучающей поверхности звезды: радиус белого карлика раз в сто меньше радиуса Солнца, т. е. сравним с радиусом Земли. Излучая свет и постепенно остывая, эти звезды за миллиард лет или около того станут невидимыми, полностью излучив свою тепловую энергию. Никаких других источников энергии в них уже нет и это фактически неизменное состояние — состояние белых карликов, превратившихся в «черные» карлики, является финальной стадией эволюции большинства звезд.

Нечто подобное ожидает, по-видимому, и наше Солнце. Через 8—9 миллиардов лет оно превратится сначала в красный гигант, затем, сбросив оболочку, станет белым, а после и «черным» карликом.

Судьба более массивной звезды иная. Исчерпав запасы ядерного топлива, она тоже способна отделить от себя оболочку, но это происходит не спокойно и плавно, а в виде мощного взрыва. Вероятно, именно таким взрывным процессам и обязаны вспышки сверхновых звезд. В явлении такого рода светимость звезды возрастает за несколько дней в сотни миллионов раз, и затем в течение недели или месяца звезда излучает больше света, чем целая галактика. Оболочка, отделившаяся от сердцевины звезды, быстро расширяется, создавая в межзвездной среде ударную волну (способную «поджечь» волну звездообразования; см. выше). Остаток же, ядро звезды, быстро сжимается, и если его масса не превышает двух масс Солнца, превращается в нейтронную звезду.

Нейтронная звезда имеет плотность, сравнимую с плотностью атомных ядер, 10^{15} г/см³. Столь сильное уплотнение обязано собственному тяготению звезды, которое при указанной массе не позволяет сжимающейся сердцевине звезды остановиться на состоянии белого карлика. Радиус нейтронной звезды около десяти километров, т. е. приблизительно в сто тысяч раз меньше радиуса Солнца или по крайней мере в шестьсот раз меньше радиуса Земли, — это размер не очень большого города.

Вспышки сверхновых известны издавна; яркое описание такого явления, происшедшего в нашей Галактике в 1054 г., имеется в китайских хрониках. «Звезда-гостья», как называют ее хроники, была видна даже днем, уступая блеском только Солнцу и Луне. Оболочка, сброшенная в этом событии, видна на небе до сих пор — это знаменитая

Крабовидная туманность, изучаемая астрономами уже более двух веков. А нейтронная звезда — остаток вспышки сверхновой — была обнаружена в центре Крабовидной туманности в 1967 г.

Вспышки сверхновых в современном состоянии Галактики — редкое явление, происходящее в среднем не чаще, чем раз в сто лет. Последнюю вспышку в нашей Галактике наблюдал в 1604 г. И. Кеплер. В других галактиках вспышки сверхновых происходят приблизительно с той же частотой, так что следя в течение года за несколькими сотнями галактик, можно наверняка зарегистрировать по крайней мере одно событие такого рода.

Нейтронная звезда в Крабовидной туманности была обнаружена как источник коротких радиопульсов, регулярно повторяющихся с периодом 0,033 с. Это необычайно короткий период; переменные звезды известны давно, среди них имеются и звезды с регулярными периодическими изменениями блеска, но столь малыми периодами обладают только пульсары, открытые в 1967 г. Нейтронная звезда в Крабовидной туманности — пульсар, обнаруженный одним из первых. Самым первым был пульсар с периодом 1,33 секунды, открытый группой радиоастрономов под руководством Э. Хьюша. Сейчас известно более сотни пульсаров и для подавляющего их большинства период следования импульсов близок к одной секунде.

Периодичность излучения пульсаров связана с их быстрым вращением: звезда излучает узкий пучок радиоволн, подобный лучу маяка. Наблюдатель, попадающий в этот луч, видит периодически повторяющиеся импульсы излучения. Но ни одна обычная звезда, ни Солнце, ни даже более плотный белый карлик, — не могла бы вращаться с периодом, характерным для пульсаров, — она немедленно была бы разорвана центробежными силами. Только нейтронная звезда может устоять и вращаться как волчок, не разрушаемая центробежными силами: она очень плотная, достаточно компактная для этого. (Напомним, что при заданном периоде центробежная сила прямо пропорциональна радиусу вращающегося тела.) Эти соображения и послужили, собственно, первым и самым сильным аргументом в пользу того, что пульсары — это нейтронные звезды.

В 70-е годы были открыты также пульсары, излучающие не радиоволны, а главным образом рентгеновские лучи. Ими оказались нейтронные звезды, входящие в состав двойных звездных систем. Об интересных явлениях в тес-

ных двойных системах мы расскажем немного позже, а сейчас вернемся к судьбе массивной звезды, исчерпавшей запасы ядерного топлива, и рассмотрим физические процессы в белых карликах и нейтронных звездах.

Чем больше масса звезды, тем сильнее ее собственное тяготение. Тяготение стремится сжать звезду, и если температура и давление в ней уже не поддерживаются ядерным энерговыделением, то тяготению ничто не мешает. Однако по мере уплотнения звезды при гравитационном сжатии в ее веществе появляется совсем особый род упругости, никак не связанной с температурой и обычным давлением, обязанным тепловым движением частиц. Даже при нулевой температуре вещество обладает исчезающей упругостью, имеющей отнюдь не тепловую природу: в этих условиях действуют эффекты квантовой механики, благодаря которым возникает эффективное давление частиц вещества *). Газ в таком состоянии называют вырожденным, причем при увеличении плотности в состоянии вырождения быстрее приходят те частицы газа, масса которых меньше.

В смеси электронов и ядер, из которой состоит сжимающаяся звезда, первыми становятся вырожденными электроны. Возникающая из-за этого дополнительная упругость останавливает сжатие звезды, если ее масса не превышает 1,2 массы Солнца. Расчет этой критической массы сделан впервые Ш. Чандрасекаром. Звезда, в которой тяготение уравновешено квантовомеханическим эффектом давления вырожденного газа электронов — это белый карлик. Ясно, что остывание белого карлика не способно повлиять на давление вырожденных электронов — оно останется тем же и при температуре абсолютного нуля.

При массе, превышающей чандрасекаровский предел (1,2 массы Солнца), давление вырожденных электронов недостаточно, чтобы противодействовать тяготению и остановить его. Сжатие звезды продолжается, достигаются всё большие плотности, и вместе с этим изменяется состав вещества звезды: электроны как бы вдавливаются в ядра и сливаются с протонами, превращая их тем самым в нейтроны. Слияние электронов с протонами сопровождается рождением большого числа нейтрино; они свободно покидают звезду, унося из нее всю ту энергию, которая выде-

*) О свойствах сверхплотного вещества см. книгу А. С. Компанейца (1976).

лилась при сжатии благодаря изменению гравитационной потенциальной энергии звезды.

Теперь, при продолжающемся сжатии, наступает очередь нейтронов переходить в вырожденное состояние. Возникающее в их газе дополнительное давление способно остановить сжатие звезды и скомпенсировать ее собственное тяготение, если масса звезды не превышает двух масс Солнца. Таким путем возникает сверхплотная звезда, которая и называется нейтронной звездой, так как состоит главным образом из нейтронов и удерживается от сжатия благодаря их квантовомеханическому эффекту давления. Теорию нейтронных звезд построил задолго до их открытия, еще в 30-е годы, Л. Д. Ландау. Тогда они представлялись лишь гипотетическими объектами, но их существование в природе неизбежно следовало из законов физики.

Заметим, что быстрое вращение нейтронных звезд, делающее их маяками — пульсарами, — прямое следствие сильного сжатия. Все звезды так или иначе вращаются, вращается и наше Солнце с периодом около месяца (точнее, на его экваторе период обращения составляет 26 дней). При сжатии, уменьшении размера вращение всякого тела убыстряется (вспомним танцоров на льду — прижимая руки к телу, они заметно убыстряют свое вращение). Период вращения убывает пропорционально квадрату размера. Если Солнце сжать до размера нейтронной звезды, оно будет вращаться с периодом около одной секунды, типичным для пульсаров.

Очень важно и то, что при сжатии звезды возрастает не только скорость вращения, но также и ее магнитное поле — оно усиливается обратно пропорционально квадрату радиуса. При достижении плотностей, характерных для нейтронной звезды, магнитное поле может оказаться в десятки и сотни миллиардов раз сильнее, чем в исходном состоянии звезды. Среднее поле Солнца составляет приблизительно 1 Э; при сжатии до радиуса нейтронной звезды его напряженность оказалась бы равной 10^{10} Э. Насколько можно судить, магнитные поля пульсаров еще сильнее, до $3 \cdot 10^{12}$ Э. Именно магнитное поле и формирует пучок радиоволн, излучаемых пульсаром, а этот пучок вращается, как луч маяка, с частотой вращения нейтронной звезды. Совместное действие вращения и магнитных полей обеспечивает исключительно четкую регулярность последовательности импульсов с периодом, равным времени одного оборота звезды, и этот период выдерживается

с огромной точностью — до восьмого знака. Это относится и к радиопульсарам и к рентгеновским пульсарам.

Какова судьба звезды, масса которой превышает предел в две солнечных массы? Силы тяготения в этом случае столь велики, что никакая упругость вещества — ни тепловая, ни квантовомеханическая — не может им противостоять. Сжатие такой массивной звезды после исчерпания источников ядерной энергии происходит неудержимо и необратимо — она превращается в черную дыру.

О черных дырах сейчас слышали все. Все в них поражает воображение: создаваемое ими тяготение столь велико, что лучи света не могут выходить из них, а лучи, проходящие поблизости от черных дыр, искривляются и захватываются ими. Даже геометрические свойства пространства и течение времени вблизи черных дыр изменяются самым причудливым образом. Черные дыры создают в пространстве бездонные воронки, в которые «засасывается» все — и свет, и частицы. Радиус такой воронки сравним с радиусом нейтронной звезды; он составляет несколько километров.

Многое можно было бы рассказать о черных дырах *), но для нас сейчас важнее всего один вопрос: существуют ли они в природе? С теоретической точки зрения черные дыры столь же неизбежный результат эволюции звезд, как белые карлики или нейтронные звезды. Но ясно, что наблюдения черных дыр затруднены самой их природой. Безднажно было бы искать их в виде черных точек на небе; скорее всего, об их существовании можно судить лишь по косвенным признакам.

Если, например, черная дыра составляет двойную систему с обычной звездой, то по особенностям движения этой звезды можно в принципе установить, что ее компаньоном — невидимым — является черная дыра. Оба объекта в двойной системе вращаются вокруг их общего центра тяжести, и измеряя параметры орбиты обычной звезды, можно оценить массу невидимого компаньона. Конечно, компаньон может быть не виден просто потому, что это очень слабая, но в остальном вполне обычная звезда. Однако если оценка массы компаньона дает величину, превышающую две массы Солнца, это будет означать, что невидимый партнер — действительно черная

*) См. книги И. Д. Новикова (1976), С. А. Каплана (1977), И. С. Шкловского (1977).

дыра. Ведь будь это обычная звезда большой массы, ее излучение было бы замечено. (Напомним, что и белые карлики, и нейтронные звезды, которые тоже могли бы быть невидимыми в двойной системе, обладают меньшими массами.) Имеется несколько источников на небе, относительно которых можно подозревать, что это двойные системы с черными дырами. Таков, например, источник рентгеновского излучения в созвездии Лебедя (его название — Лебедь X-1). Однако полная уверенность пока отсутствует — необходимы новые и новые наблюдения, подвергаемые строгому и тщательному анализу. И все же вряд ли можно сомневаться, что черные дыры существуют: у массивных звезд нет иного пути, чем превращение в черную дыру на финальной стадии эволюции. В нашей Галактике должны быть, вероятно, миллионы, если не сотни миллионов черных дыр, нужно только научиться их находить. По шутливому замечанию Я. Б. Зельдовича, черные дыры есть везде, где не доказано, что их нет!

ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

Эволюция звезд — это обширная область исследований в современной астрофизике, и наш краткий очерк далеко ее не исчерпывает; имеется большая научно-популярная литература, по которой заинтересованный читатель может ближе познакомиться с этой областью: кроме уже названных выше книг С. А. Каплана (1977) и И. С. Шкловского (1977), упомянем книги Р. Дж. Тейлера (1973, 1975), Ю. Н. Ефремова (1980). В заключение главы о происхождении и эволюции звезд мы хотели бы рассказать о новых результатах исследований, еще почти не освещенных в литературе для читателей-неспециалистов. Речь здесь пойдет о физических процессах в тесных двойных системах звезд и несколько более подробно об одном замечательном типе этих систем, с которым связано недавно открытое явление космических всплесков рентгеновского излучения.

Если две звезды образуют достаточно тесную систему, такую, что расстояние между звездами сравнимо с их радиусами, взаимодействие звезд-партнеров не ограничивается только тем, что они вращаются вокруг общего центра тяжести. Очень важно, что в этом случае возможно перетекание вещества с одной звезды на другую под действием гравитационного притяжения,

Каждая звезда в тесной паре имеет свою «зону влияния», в пределах которой преобладает ее, а не партнера, собственное тяготение. Эту зону называют полостью Роша (по имени французского астронома XIX века, который изучал взаимное тяготение планет и их спутников, но построил и общую теорию, применимую к двойным звездам).

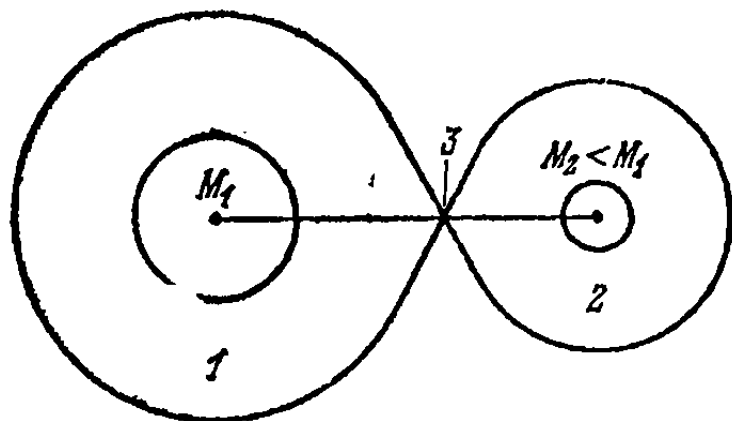


Рис. 40. Двойная система звезд. 1, 2 — полости Роша, 3 — внутренняя точка Лагранжа.

Эти зоны должны, очевидно, соприкаться в одной точке на линии, соединяющей центры звезд: в ней сила тяготения отсутствует, ибо одна звезда создает в ней силу тяготения, точно такую же по величине, что и другая, по противоположную по направлению (рис. 40). Для этой точки тоже есть специальное название — внутренняя точка Лагранжа (по имени другого французского ученого, знаменитого математика и механика XVIII — начала XIX вв.). Если массы звезд одинаковы, то точка Лагранжа лежит посередине между ними; если массы разные, то она, естественно, ближе к менее массивной звезде, так как полость Роша тем обширнее, чем больше масса звезды *).

Обмен веществом между звездами возможен двумя путями: либо «звездный ветер» проникает из полости Роша «своей» звезды в полость Роша звезды-компаньона, либо одна из звезд, так сказать, переполняет свою полость Роша.

Звездный ветер был открыт прежде всего у Солнца (солнечный ветер); оказалось, что происходит непрерывное истечение плазмы солнечной короны в межпланетное пространство. У более массивных и горячих, чем Солнце, звезд потоки плазмы интенсивнее; они имеют вполне достаточные скорости и достаточный запас кинетической

* В последнем случае положение точки Лагранжа определяется не только тяготением звезд, но и центробежной силой, возникающей из-за того, что сама эта точка, как и звезды, вращается вокруг центра масс двойной системы.

энергии, чтобы навсегда покинуть звезду, преодолев ее притяжение. В двойной системе какая-то часть частиц, покинувших одну звезду, может быть захвачена полем тяготения другой звезды.

Гораздо большие порции вещества могут перейти от одной звезды к другой на втором пути, когда дело не ограничивается истечением из короны звезды. Значительный переброс вещества от одной звезды к другой способен очень существенно повлиять на характер дальнейшей эволюции обеих звезд в тесной паре.

Многие интересные черты процессов такого рода выяснены недавно в работах А. Г. Масевич, А. В. Тутукова и Л. Р. Юнгельсона. Более массивная из двух звезд пары первой переходит на ту стадию эволюции, на которой происходит сброс оболочки. Значительную долю вещества этой оболочки способна захватить вторая, менее массивная звезда; но увеличив массу за счет вещества своего партнера, эта звезда станет теперь более массивной, и потому темп ее эволюции возрастет. Вскоре и она начнет расширяться, причем размеры ее оболочки станут столь значительными, что внутри этой оболочки окажется и остаток первой звезды, успевший уже превратиться в нейтронную звезду. Последняя, двигаясь в среде оболочки, тормозится (как спутник в плотных слоях земной атмосферы), приближается из-за этого к ядру второй звезды и в конце концов образует вместе с ним двойное тесное ядро внутри единой обширной оболочки. Замечательно, что такие объекты — две компактные звезды в общей оболочке — недавно обнаружены прямыми астрономическими наблюдениями.

Не менее интересные события в тесной двойной системе развиваются и тогда, когда перетекание вещества с одной звезды на другую не слишком значительно, но одна из звезд уже успела превратиться в нейтронную звезду. Расскажем в связи с этим об открытии и исследовании барстеров — вспышечных источников рентгеновских лучей. Их название происходит от английского слова «burst», что значит вспышка, взрыв.

То, что звезды могут излучать не только видимый свет, но и невидимые глазом электромагнитные волны рентгеновского диапазона, выяснилось в последние 15—20 лет, когда появились специальные рентгеновские телескопы, устанавливаемые на высотных баллонах, ракетах, спутниках и выносимых за пределы земной атмосферы (которая не пропускает к нам космические рентгеновские

лучи). Среди звезд нашей Галактики известно уже не менее ста таких рентгеновских звезд. Солнце не принадлежит к их числу; хотя его рентгеновское излучение регистрируют уже давно, с 1948 г., оно заметно лишь потому, что Солнце очень близко к нам. На тех расстояниях, на которых находятся галактические источники рентгеновских лучей, солнечный рентгеновский поток был бы совершенно неощутимым.

Рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, принадлежащие к более коротковолновой области, чем видимый свет и ультрафиолетовое излучение. Им соответствуют длины волн от 100 до $0,3 \text{ \AA}$ (ангстрем)*); фотоны рентгеновских лучей имеют, в соответствии с этим, энергии от 0,1 до 30 кэВ (килоэлектронвольт), или 10^{-20} — $3 \cdot 10^{-18}$ Дж. Самые яркие из рентгеновских звезд излучают в рентгеновском диапазоне в десять тысяч раз больше энергии, чем Солнце во всех длинах волн.

Рентгеновские звезды отличаются сильной переменностью. Некоторые обладают исключительно точной повторяемостью, строгой регулярностью колебаний блеска с периодом в секунды или доли секунды. Это уже упоминавшиеся рентгеновские пульсары. Барстеры — особый класс рентгеновских переменных звезд, обнаруживающих короткие и очень яркие вспышки рентгеновских лучей длительностью от нескольких секунд до нескольких минут. Вспышки следуют одна за другой нерегулярно, без какой-либо точной периодичности. В каждой из них излучается столько энергии в виде рентгеновских лучей, сколько Солнце во всем своем спектре испускает за недели.

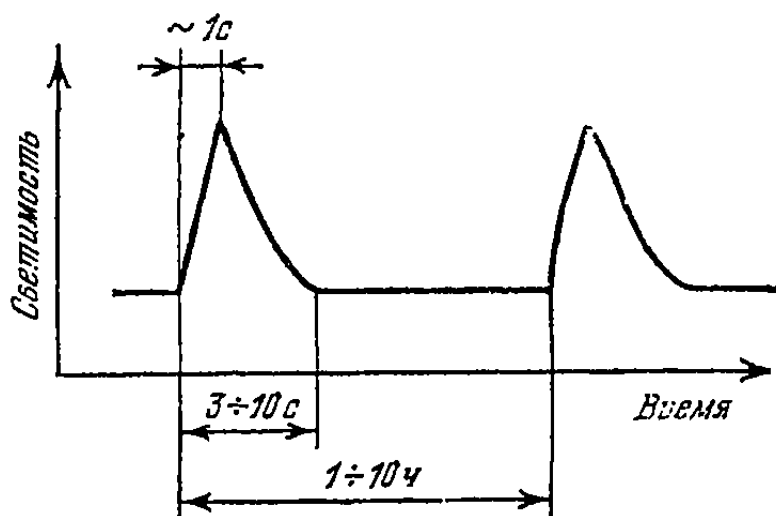
Их история началась в 1975 г., когда группа советских исследователей сообщила о наблюдении коротких и мощных всплесков рентгеновского излучения, зарегистрированных аппаратурой, установленной на спутнике «Космос-428». Вскоре американские астрономы обнаружили вспышки рентгеновского излучения в центре шарового звездного скопления NGC 6624, в котором несколькими годами ранее была найдена рентгеновская звезда — один из самых ярких источников рентгеновских лучей в Галактике. Сейчас известно 32 барстера, 8 из которых принадлежат, как полагают, шаровым скоплениям нашей Галактики.

Наращение блеска типичного барстера происходит обычно за время от нескольких долей секунды до десяти

*) $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см.}$

секунд (рис. 41). Затем за время от нескольких секунд до нескольких минут блеск убывает до исходного уровня и новая вспышка происходит через несколько часов или несколько дней. Некоторые барстеры иногда «отключают-

Рис. 41. Типичная зависимость блеска барстера от времени.

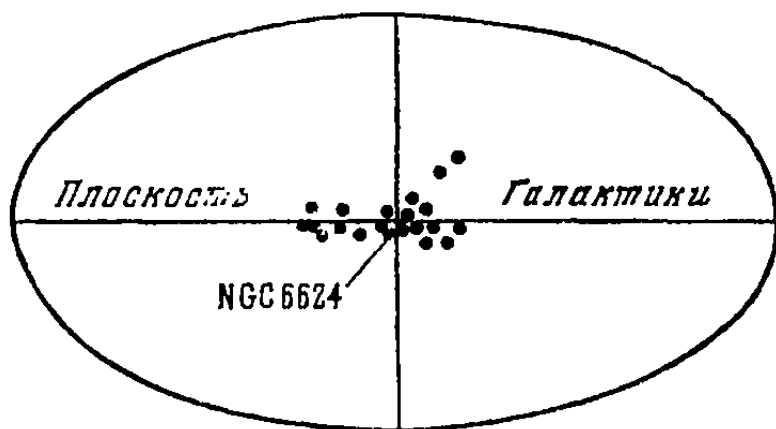


ся» на недели и месяцы, и после такой пассивной фазы снова «оживают» и опять дают вспышки рентгеновской светимости.

Почти всегда вспышки барстеров происходят на фоне не исчезающей, хотя и несколько меняющейся со временем, рентгеновской светимости звезды.

Расположение барстеров на небе отнюдь не хаотично и не однородно (рис. 42). Большинство их сосредоточено

Рис. 42. Положение барстеров в Галактике.



в направлении на центр Галактики. Это обстоятельство и послужило очевидным наблюдательным указанием на то, что барстеры принадлежат нашей Галактике. Отсюда следует также, что типичное расстояние до барстеров — порядка 10 кпс; это расстояние, сравнимое с тем, которое отделяет Солнце от центра Галактики.

Измеряя приходящий к телескопам поток рентгеновских лучей и зная типичное расстояние до источника,

можно найти его собственную светимость, т. е. полную энергию, излучаемую им ежесекундно во все стороны. Оказалось, что во время вспышки барстер излучает каждую секунду от $3 \cdot 10^{30}$ до $3 \cdot 10^{31}$ Дж. (Напомним, что полная светимость Солнца $4 \cdot 10^{26}$ Вт.) Полная энергия вспышки, получаемая умножением светимости на продолжительность излучения, составляет от $3 \cdot 10^{31}$ до $3 \cdot 10^{32}$ Дж.

Очень важная характеристика барстера — соотношение между вспышечной светимостью и неисчезающей, фоновой светимостью. Оказывается, что за время между двумя типичными вспышками «спокойным» путем излучается в десятки и сотни раз больше энергии, чем в каждой отдельной вспышке, какой бы яркой она ни была.

Не менее важно для понимания природы барстеров и другое их свойство. Установлено (по виду спектра их рентгеновского излучения), что во время вспышки барстер светится так, как светила бы поверхность тела, нагретого до температуры приблизительно в тридцать миллионов градусов. При такой температуре всякое тело излучает больше всего энергии именно в рентгеновском диапазоне волн электромагнитного излучения.

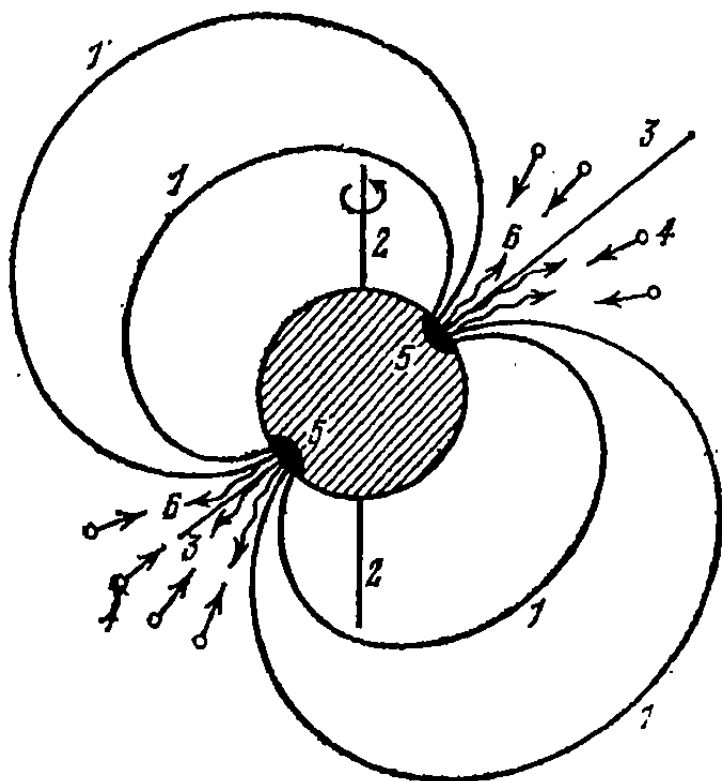
Зная законы свечения горячих тел и величину излучаемой в единицу времени энергии, можно рассчитать площадь поверхности, обеспечивающей при данной температуре данную светимость. И вот выяснилось, что во время вспышки барстер светится так, как светила бы нагретая до тридцати миллионов градусов поверхность шара с радиусом приблизительно в 10 км. Но как раз такие размеры и имеют самые плотные из известных сейчас космических тел — нейтронные звезды.

Вывод о том, что рентгеновские вспышки связаны с нейтронными звездами, не был неожиданным. Уже известные к тому времени родственные объекты, рентгеновские пульсары, несомненно представляют собой нейтронные звезды. Есть все основания полагать, что излучение рентгеновских пульсаров обязано процессу аккреции, т. е. захвату внешнего вещества гравитационным полем нейтронной звезды. Как было показано Я. Б. Зельдовичем, И. Д. Новиковым и И. С. Шкловским, это явление служит источником энергии всех рентгеновских звезд.

Захватываемое вещество срывается или истекает с поверхности звезды-компаньона в тесной двойной системе и затем, ускоряясь при свободном падении в поле тяготения нейтронной звезды, приобретает значительную скорость и кинетическую энергию. Неизбежное столкновение

с поверхностью нейтронной звезды приводит к превращению кинетической энергии падающего вещества в тепло. В результате этого поверхность нейтронной звезды — вся поверхность или только какое-то пятно на ней — разогревается до высоких температур в миллионы и десятки

Рис. 43. Схема рентгеновского пульсара. Аккреция вещества замагниченной звездой. Излучение горячих пятен. 1 — силовые линии магнитного поля, 2 — ось вращения нейтронной звезды, 3 — ее магнитная ось, 4 — падение частиц в магнитные воронки, 5 — горячие пятна у магнитных полюсов, 6 — излучение пятен.



миллионов градусов и начинает светиться, испуская главным образом (в соответствии со значением температуры) рентгеновские лучи.

В рентгеновских пульсарах аккреция управляется магнитным полем; поле не дает веществу двигаться поперек силовых линий и потому поток вещества приходит на поверхность нейтронной звезды не равномерно со всех сторон, а только через своеобразные воронки, создаваемые для вещества магнитным полем вблизи магнитных полюсов. (Известно, что такого рода воронки для межпланетного вещества и космических лучей имеются и вблизи магнитных полюсов Земли — именно из-за этого там наблюдаются полярные сияния.) Можно предполагать, что в результате такого рода направленной аккреции на поверхности нейтронной звезды вблизи ее полюсов создаются горячие пятна (рис. 43). Вращение нейтронной звезды вокруг оси, наклоненной (как и в случае Земли) к магнитной оси, проходящей через магнитные полюсы, создает эффект маяка: яркое пятно то видно, то не видно наблюдателю. Период появления пятна есть период вращения

нейтронной звезды — оттого он и выдерживается с большой точностью.

Естественно считать, что и барстеры — это не одиночные нейтронные звезды, а нейтронные звезды в тесных двойных системах с перетеканием вещества и аккрецией.

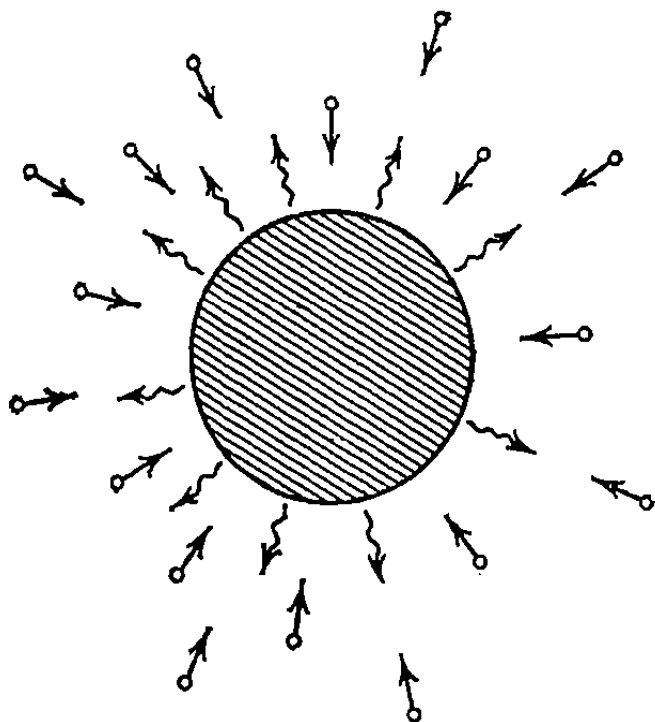


Рис. 44. Схема барстера. Аккреция, нагрев и излучение всей поверхности.

Но почему же в одних случаях нейтронная звезда проявляет себя как рентгеновский пульсар, а в других как рентгеновский барстер?

Тот факт, что импульсы излучения барстеров следуют один за другим без какого-либо четкого периода, означает, очевидно, что механизм действия барстеров не связан ни с собственным вращением нейтронной звезды вокруг своей оси, ни с ее периодическим орбитальным движением в двойной звездной системе. Иначе барстеры были бы такими же хорошими часами, как и пульсары.

Продолжая это рассуждение, нужно, по-видимому, допустить, что никаких ярких горячих пятен на нейтронной звезде барстера, в отличие от рентгеновского пульсара, быть не должно. Значит, магнитное поле, создающее в пульсарах воронки и горячие пятна под ними, в случае барстеров либо отсутствует, либо недостаточно сильно, чтобы управлять потоком вещества, перетекающего с «нормальной» звезды на нейтронную звезду.

При аккреции, не направленной магнитным полем, падение вещества происходит более или менее равномерно на всю поверхность нейтронной звезды. Тогда вся поверхность может быть разогрета до высокой температуры

и она будет излучать рентгеновские лучи в течение всего времени, пока происходит аккреция (рис. 44). Кажется разумным связать излучение такого происхождения с тем фоновым, исчезающим рентгеновским потоком, который регистрируется, как упоминалось, от большинства барстеров.

Наблюдения дают величину порядка 10^{30} Вт для фоновой светимости барстеров. Легко оценить темп аккреции, способный обеспечить такую светимость. При падении в гравитационном поле нейтронной звезды вещество разгоняется до скоростей, приближающихся к скорости света $3 \cdot 10^{10}$ см/с. (Точнее, эти скорости составляют от одной пятой до одной трети скорости света.) Соответствующая кинетическая энергия превращается в тепло при столкновении вещества с поверхностью нейтронной звезды и затем излучается в виде потока рентгеновских лучей. Создаваемая при этом светимость есть произведение половины квадрата скорости падения на массу вещества, достигающую каждую секунду поверхности нейтронной звезды. Легко видеть, что указанное выше наблюдательное значение фоновой светимости может быть обеспечено, если на поверхность звезды падает каждую секунду 10^{17} г вещества.

Интересно, что такой же величины поток аккрецируемого вещества известен по независимым данным о рентгеновских пульсарах. Совпадение вряд ли случайно: скорее, оно указывает на то, что соображения о природе фоновой светимости барстеров, которые мы здесь обсуждаем, согласуются с общей картиной физических процессов в тесных двойных системах.

Какова судьба вещества, выпавшего на поверхность нейтронной звезды? Свежий газ, захваченный нейтронной звездой, богат водородом. Это вещество, потерянное внешними слоями «нормальной» звезды, компаньона нейтронной звезды в тесной двойной системе, и оно содержит не менее 70—75% (по массе) водорода, около 25—30% гелия и около 1% более тяжелых элементов. В водороде, разогретом до высоких температур и сжатом до больших плотностей при ударе о поверхность нейтронной звезды, могут начаться термоядерные реакции превращения водорода в гелий — точно такие же, как и недрах Солнца и других подобных ему звезд.

Выделяющаяся при этом энергия добавится к общему разогреву поверхности нейтронной звезды. Эта добавка невелика по сравнению с кинетической энергией падения

вещества. Важнее, однако, то, что в результате термоядерных реакций на поверхности нейтронной звезды образуется слой гелия. Именно здесь, в слое гелия, развиваются процессы, определяющие явление барстера.

Согласно расчетам, этот слой имеет толщину приблизительно в один метр, плотность свыше миллиона граммов в кубическом сантиметре и температуру около полумиллиарда градусов. При таких условиях способна протекать реакция объединения трех ядер гелия в ядро углерода; эту реакцию в ядерной физике называют тройным альфа-процессом (ядро гелия — это альфа-частица). Из-за чрезвычайно высокой температурной чувствительности тройной альфа-процесс может развиваться взрывообразно. В гелиевом слое он протекает столь стремительно, что температура слоя может подскочить, например, вдвое за несколько сотых долей секунды. Раз начавшись, горение гелия идет со все возрастающей скоростью, пока весь он не превратится в углерод*).

При сгорании одного грамма гелия выделяется 10^{11} Дж энергии. Сколько всего энергии выделяется за вспышку? Для ответа на этот вопрос нужно, очевидно, знать массу гелиевого слоя.

Вероятно, гелий полностью сгорает за один взрыв; его накопление происходит за время между взрывами. Беря для оценки промежуток между двумя рентгеновскими вспышками порядка 10^4 с и пользуясь уже полученной оценкой для скорости аккреции (10^{17} г/с), найдем, что масса слоя составляет 10^{21} г.

Теперь умножим эту величину (она, кстати, находится и из приведенных выше параметров гелиевого слоя) на энергию, выделяемую одним граммом гелия, и тем самым получим оценку полной энергии вспышки: это даст 10^{32} Дж. Такая величина хорошо согласуется с наблюдательными данными, о чем уже было сказано.

Можно оценить также и типичную продолжительность вспышки. Для этого нужно воспользоваться сведениями из ядерной физики о скорости выделения энергии при тройном альфа-процессе в зависимости от плотности и температуры вещества. Для указанных выше характеристик гелиевого слоя получается приблизительно 10^{10} Дж энергии на каждый грамм вещества в секунду. При массе

*) Возможность взрывного термоядерного горения во внешних слоях звезд доказана теоретически Л. Э. Гуревичем и А. И. Лебединским более 30 лет назад. Детальные расчеты для барстеров провели В. Льюин, П. Джосс, Э. В. Эргма.

слоя 10^{21} г это дает полную скорость энерговыделения около 10^{31} Вт. Эта величина весьма близка к типичной наблюдаемой светимости барстера во время рентгеновской вспышки.

Теория хорошо объясняет также и соотношение между вспышечной и спокойной светимостью барстера. Все это позволяет считать, что природа излучения барстеров разгадана.

Мы воспользовались свежим примером барстеров — очень интересным и самим по себе, чтобы рассказать несколько подробнее, чем в других случаях, о тех путях, которыми астрономические наблюдения и физическая теория идут к решению загадок и постановке новых проблем в исследовании бесконечно многообразного мира звезд. От протозвезд, проявляющих себя как межзвездные мазеры, до нейтронных звезд, пульсаров и барстеров, — жизнь звезд от их рождения до самых поздних этапов эволюции все яснее предстает перед нами цепью удивительных превращений, чередой взрывов, миганий, вспышек... Можно надеяться, что мы не очень далеки от того, чтобы, говоря словами Эддингтона, «понять, наконец, такую простую вещь, как звезда».

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

В истории каждой галактики была короткая, но полная событиями эпоха, когда ее вещество в виде облака газа, только что выделившегося из протоскопления, сжималось под действием собственной гравитации. В этом процессе рождались первые звезды, формировались подсистемы галактик, такие как гало́ и диск нашей Галактики. Облако газа превращалось в звездную систему, а звездная система достигала своего установившегося, стационарного состояния. После этого изменения в ней протекали гораздо медленнее и имели совсем другой характер. Лишь в центральных областях галактик, их ядрах происходили и происходят быстрые активные процессы. Кроме того, в спиральных галактиках продолжалось и продолжается формирование молодых звезд из газа и пыли их плоских подсистем, где существует очерчиваемый этими звездами спиральный узор.

В этой главе мы расскажем об эволюции звездных систем; речь будет идти и о галактиках, и о звездных скоплениях внутри галактик.

ОТ ПРОТОГАЛАКТИКИ К ЗВЕЗДНОЙ СИСТЕМЕ

Обособление протогалактических сгущений происходило, по-видимому, благодаря гидродинамическим процессам в газовом протоскоплении; дальнейшая эволюция протогалактик определялась прежде всего их собственным тяготением, которое сжимало эти разреженные облака до наблюдаемых размеров галактик.

Гравитационному сжатию не мешают силы давления, так как газ протогалактики быстро и легко охлаждается до температуры около десяти тысяч градусов. Давление, соответствующее этой температуре, не способно противостоять общему тяготению всей протогалактики. Поэтому возрастание плотности протогалактики от значения 10^{-27} г/см³, характерно для протоскоплений (и совре-

менных скоплений) до типичной плотности галактик 10^{-24} г/см³ происходит так, что все частицы облака как бы свободно падают в их общем поле тяготения. Увеличение плотности облака в тысячу раз соответствует уменьшению его размера в десять раз.

Как долго длится это свободное падение? Оказывается, что оно требует приблизительно того же времени, которое прошло от начала космологического расширения до обособления протоскоплений, т. е. около трех миллиардов лет. Это совпадение не случайно. Дело в том, что динамика космологического расширения, сдерживаемого, а затем и остановленного в результате развития гравитационной неустойчивости в объеме протоскопления, определяется силами собственного тяготения вещества, и только ими. Точно так же и процесс сжатия протогалактического облака, части протоскопления, управляется только силами его собственного тяготения. Поэтому в динамике гравитирующей среды имеется симметрия относительно момента остановки, когда происходит смена расширения данного объема сжатием: расширение с увеличением размера, например, в десять раз требует того же времени, что и сжатие от этого размера с уменьшением его в десять раз. Это очень похоже на движение камня, брошенного вертикально вверх: сколько времени он летит до высшей точки, столько же и падает затем вниз. В высшей точке камень на миг останавливается, — в нашем случае это тоже соответствует остановке, смене расширения сжатием.

Вблизи момента остановки, непосредственно перед ним и сразу после него, скорости расширения, а затем и сжатия, малы, и больше всего времени уходит как раз на то, чтобы «перевалить» через остановку. Дальнейшее же сжатие происходит с ускорением (как и всякое свободное падение) и требует уже меньшего времени. Точно так же, по симметрии, предшествующее сжатию расширение происходит сначала быстро, а затем замедляется. Если принять за 100% время расширения до момента остановки, то для увеличения размера, скажем, от одной десятой максимального до максимального потребуются не меньше 95% этого времени. С точностью до нескольких процентов и время сжатия от остановки до уменьшения размера в десять раз должно поэтому совпадать с временем, протекающим от начала расширения.

Итак, сжатие протогалактики длится около трех миллиардов лет. За это время происходит превращение газового облака в звездную систему, которая затем уже не

сжимается и находится в устойчивом, почти неизменном состоянии. Переход от сжатия к установившемуся стационарному состоянию связан с дроблением протогалактики на фрагменты, в которых начинается звездообразование. Под действием гравитационной неустойчивости, развивающейся в протогалактическом облаке, возникают сгущения с массами $3 \cdot 10^7 - 10^9$ масс Солнца. Как мы говорили в главе четвертой, массы крупных фрагментов, на которые распадается протогалактика, определяются условием гравитационной неустойчивости, критерием Джинса. Их величина оценивается из того расчета, что температура протогалактического газа близка к десяти тысячам градусов, а его плотность изменяется в пределах от 10^{-27} до 10^{-24} г/см³. Вероятно, через несколько сотен миллионов лет после начала сжатия протогалактика превращается из сплошного облака газа в совокупность отдельных фрагментов — тоже облаков, но более плотных. В протогалактике с массой в сто миллиардов масс Солнца, сравнимой с массой нашей Галактики, может иметься несколько десятков крупных облаков с массами до миллиарда масс Солнца и сотни и тысячи более мелких облаков с массами в несколько сотен и десятков миллионов масс Солнца.

Вся совокупность облаков свободно падает к центру протогалактики; вместе с тем имеются еще и собственные движения облаков, дополнительные к их свободному падению, порожденные и усиленные, как и сами облака, гравитационной неустойчивостью, действующей внутри протогалактики. Из-за собственных движений, имеющих нерегулярный хаотический характер, облака сталкиваются друг с другом. При таких столкновениях материал облаков разогревается и сжимается; на это расходуется часть кинетической энергии случайного движения облаков. Затем происходит охлаждение, излучение уносит эту энергию из протогалактики наружу. Благодаря такому отводу энергии и возможно продолжение общего сжатия всей совокупности облаков.

Очень важно, что уплотнение облаков из-за их столкновений друг с другом создавало условия для быстрого развития в них каскадной фрагментации, ведущей к формированию первых звезд галактики. Наиболее массивные звезды, возникающие в этом процессе, успевали не только полностью сформироваться, но и пройти весь цикл эволюции от состояния протозвезды к состоянию, подобному Солнцу, и далее, по исчерпанию запасов своей ядер-

ной энергии, они могли взорваться как сверхновые. Звезде с массой в несколько десятков масс Солнца требуется на это не более нескольких десятков миллионов лет, что заметно меньше времени общего сжатия протогалактики.

При взрывах сверхновых происходило обогащение протогалактики продуктами термоядерного синтеза в массивных звездах, т. е. элементами, более тяжелыми, чем водород и гелий. В результате новые группы звезд рождались из вещества, все более и более богатого углеродом, кислородом, азотом, металлами. Чем позже возникала данная группа звезд, тем в большей степени первичная водородно-гелиевая среда оказывалась обогащенной тяжелыми элементами и тем более богатыми этими элементами должны быть образующиеся из этой среды звезды. Так как этот процесс протекает при продолжающемся сжатии газовой протогалактики, то формирование звезд происходит все ближе и ближе к центру всей этой совокупности звезд и газовых облаков. На основании таких соображений можно ожидать, что звезды внутренних областей, сформировавшихся в таком процессе галактик, должны отличаться по своему составу от звезд внешних областей: чем ближе к центру, тем больше должно быть в звездах тяжелых элементов.

Этот вывод находится в хорошем согласии с астрономическими данными о содержании тяжелых элементов в звездах гало, сферической подсистеме нашей Галактики, а также и в эллиптических галактиках, подобных по своей структуре и звездному составу гало Галактики. Тем самым находит подтверждение общее представление о газовых протогалактиках, о формировании звезд в ходе их гравитационного сжатия.

До сих пор мы никак не учитывали того обстоятельства, что протогалактика может обладать значительным вращением. Вращение действительно не очень существенно на начальных стадиях сжатия, пока центробежные силы много слабее сил тяготения. Но по мере сжатия вращение должно убыстряться — так всегда происходит и с протогалактикой, и вообще с любым телом, размеры которого уменьшаются. Вместе с тем возрастают и центробежные силы. Эти силы не мешают сжатию вдоль оси вращения, но способны противодействовать силе тяготения в направлениях, поперечных к оси. По этой причине сжимающееся облако становится из почти сферического все более уплощенным, стремясь принять форму диска,

в котором сжатие по поперечным к оси вращения направлениям замедляется, а затем и вовсе прекращается, когда центробежная сила уравнивается в этих направлениях силе тяготения.

Эта общая тенденция проявлялась и в сжимающейся протогалактике. Нужно только иметь в виду, что часть ее вещества успела превратиться в звезды на первоначальной стадии, когда вращение еще не повлияло на общую форму,

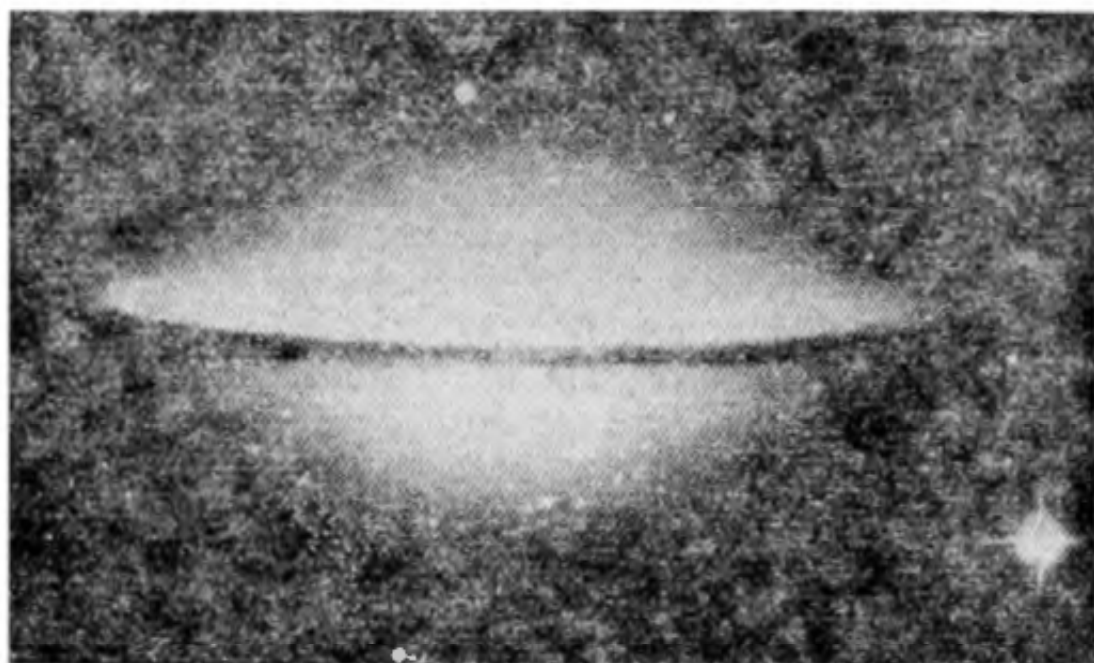


Рис. 45. Спиральная галактика со слоем темных газо-пылевых облаков в ее диске.



Рис. 46. Небольшая эллиптическая галактика — спутник галактики Андромеды.

протогалактики. Эти звезды создают гало, сферическую подсистему Галактики. Оставшийся после этого газ должен был продолжать падение, причем по мере его уплотнения вращение убыстрялось, пока центробежная сила не оста-

повила сжатие поперек оси вращения; сжатие же вдоль оси продолжалось и привело в конце концов к образованию вращающегося диска — плоской подсистемы Галактики. Так формировались и другие спиральные галактики, обнаруживающие быстрое вращение своих плоских подсистем (рис. 45).

Если вращение протогалактики с самого начала очень слабо или вовсе отсутствует, то, очевидно, нет причин, которые могли бы привести к формированию в них дисков. Общее сжатие протогалактики и образование в ней звезд ведут в этом случае к формированию более или менее сферической системы; так возникали эллиптические галактики, лишенные быстрого вращения (рис. 46).

ДВИЖЕНИЕ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКАХ

Эллиптическая галактика представляет собой совокупность звезд, образующих единую систему, связанную общим тяготением звезд. Каждая звезда движется в общем поле тяготения системы и не испытывает действия никаких иных сил, кроме сил тяготения. Можно сказать, что звезда свободно падает в поле тяготения системы. Падая таким образом с какой-то высоты к центру системы по радиусу, она ускоряет свое движение, а когда достигает центральной области, то там, очевидно, не останавливается, а проскакивает центр и начинает затем удаляться от него к противоположному краю системы. Теперь движение происходит не с ускорением, а с замедлением (подобно движению камня, брошенного вертикально вверх), так как это движение направлено против силы тяготения, действующей, как всегда, в направлении к центру. Скорость звезды уменьшается по мере удаления от центра и, наконец, звезда останавливается на миг (как камень в высшей точке), ее скорость обращается в нуль. Затем начинается обратное падение к центру, звезда достигает его и, минуя центр, возвращается вновь в положение, с которого началось ее падение, а затем этот цикл движения повторяется вновь и вновь.

В звездной системе не действуют никакие другие силы, кроме сил тяготения, но система тем не менее не сжимается, а остается стационарной как целое. Это возможно потому, что каждая из звезд галактики совершает циклическое движение по своей орбите в пределах ограниченного объема между крайними точками, где скорость удаления звезды от центра системы обращается в нуль.

Конечно, совсем не обязательно, чтобы орбита каждой звезды проходила точно через центр системы; орбиты звезд различны и кроме чисто радиальных возможны и эллиптические орбиты, подобные орбитам планет в Солнечной системе, но только менее круглые, гораздо более вытянутые. Все эти орбиты равномерно заполняют объем системы, создавая ее правильную сферическую или в той или иной степени эллипсоидальную, сплюснутую форму. Так устроены эллиптические галактики и сферические подсистемы спиральных галактик.

Диски спиральных галактик, и в частности, диск нашей Галактики, имеют много общего в динамике с Солнечной системой. Подобно планетам, все звезды диска движутся по почти круговым орбитам, на которых центробежные силы уравновешены силами тяготения. Отличие от Солнечной системы лишь в том, что силы тяготения создаются в галактиках не центральным телом (ядра галактик не очень массивны), а главным образом самими звездами их диска и сферической составляющей.

Средние скорости движения звезд нашей Галактики как по вытянутым, так и по круговым орбитам составляют 100—300 км/с. В менее массивных галактиках они меньше, в более массивных больше, но всегда лежат в пределах от десятков до тысячи километров в секунду.

БУРНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

Форма и внутреннее строение эллиптических галактик или сферических подсистем спиральных галактик слишком правильны и регулярны, чтобы их можно было целиком объяснить исходной формой и структурой протогалактического облака. Протогалактические облака были, скорее всего, клочковаты, рыхлы и не имели четких правильных границ. Что же придало звездным системам их регулярное строение и форму?

Конечно, это тоже результат действия сил тяготения — ведь иных сил в звездных системах нет. Давно известно, что силы тяготения всегда стремятся придать телам правильную, округлую форму; это определяет форму Солнца и других звезд, фигуры планет. Приближение к такой правильной форме и структуре подобно процессу релаксации в других физических системах — таких, как, например, газ атомов или молекул.

Релаксация — это процесс приближения системы к равновесному состоянию. Релаксация в газе сопровождается

установлением общей однородности распределения атомов или молекул в занятом ими объеме; она ведет к равновесному распределению случайных тепловых скоростей частиц. В термодинамике равновесное распределение частиц по скоростям получило название распределения Максвелла. Релаксация в газе осуществляется путем столкновений частиц друг с другом; при случайных столкновениях частиц их скорости изменяются и тем самым достигается максвелловское распределение.

Звездные системы обнаруживают определенные признаки равновесного состояния. Кроме регулярной формы, на это указывает также распределение звезд по скоростям, которое, насколько можно судить по окрестности Солнца в нашей Галактике, напоминает распределение Максвелла. Но столкновения звезд в галактиках, подобные столкновениям частиц газа, невозможны. Звезды не только не сталкиваются друг с другом «лоб в лоб», но даже фактически и не подходят друг к другу достаточно близко, чтобы их скорости могли при этом — из-за парного гравитационного взаимодействия звезд — измениться сколько-нибудь существенно. Оценки показывают, что время ожидания близкого прохождения двух звезд намного больше возраста галактик. В этом смысле можно сказать, что галактики являются бесстолкновительными системами.

И тем не менее релаксация звездных систем все же возможна. В 1967 г. Д. Линден-Белл выдвинул предположение, что она обязана не парным «столкновениям» звезд, а взаимодействию каждой звезды с гравитационным полем всей системы. Такая бесстолкновительная релаксация произошла в ту эпоху, когда галактики еще только формировались. При общем сжатии и фрагментации протогалактики само гравитационное поле системы сильно менялось и со временем, и от одного места к другому. Рождающиеся одновременно с этим звезды испытывали по этой причине «толчки», при которых изменялись их скорости и орбиты. «Толчки» и вызываемые ими изменения в движении звезд были довольно сильными: отдельная звезда сталкивалась, можно сказать, со всей системой в целом или по крайней мере с крупными ее частями.

Этот процесс имел случайный характер в том же смысле, в каком случайны столкновения частиц в газе. Каждое единичное изменение в движении данной звезды было непредсказуемым по своим результатам, но таких изменений было много, они происходили непрерывно, и потому их итоговое действие обеспечивало возможность проявления

общей для всех физических систем тенденции к установлению равновесия.

Все это дает основание видеть в процессе такого рода черты релаксации; Линден-Белл назвал его «бурной релаксацией». Релаксация действительно была бурной: она протекала в неустановившемся, сильно «возбужденном» состоянии протогалактики, когда имелись и первые звезды, и хаотически движущиеся (со скоростями в сотни километров в секунду) массивные газовые фрагменты.

Теория бурной релаксации, как, впрочем, и весь комплекс проблем, связанных с превращением протогалактики в звездную систему, остается еще недостаточно разработанной. Многие, однако, удалось выяснить не путем теоретических расчетов, а с помощью современных методов моделирования на крупных вычислительных машинах. Машина может по нашему заданию найти изменение со временем скорости и положения звезды в системе, выяснить на этой основе общее поведение системы в целом. Оказалось, что бесстолкновительной системе гравитирующих тел действительно свойственно стремление сферизоваться, принимать со временем все более сглаженную, регулярную форму. Это происходит за время, сравнимое с типичным периодом обращения звезды в системе. Замечательно, что результат справедлив для очень широкого многообразия исходных состояний системы, с которых при таком моделировании начинается машинный расчет.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

В отличие от галактик, шаровые и рассеянные звездные скопления не являются бесстолкновительными системами. Вследствие большей плотности скоплений *) каждая звезда в них испытывает за время существования скопления по крайней мере несколько тесных сближений и множество далеких сближений с другими звездами. Время между «столкновениями» все же превышает время обращения звезд по орбитам, размеры которых сравнимы с размерами скопления, так что за один оборот звезда лишь с малой вероятностью испытает сближение с какой-либо другой звездой. Можно сказать, что длина свободного пробега звезды, т. е. путь между двумя сближениями с другими звездами, заметно больше размера всей системы.

*) О звездных скоплениях см. книгу Ю. Н. Ефремова (1980).

Эти обстоятельства и определяют характер эволюции звездных скоплений.

В звездных скоплениях возможна релаксация посредством парных сближений звезд. Эти системы стремятся к состоянию равновесия и приближаются к нему настолько, насколько это вообще возможно в гравитирующих системах. Звезды приобретают в результате распределение по

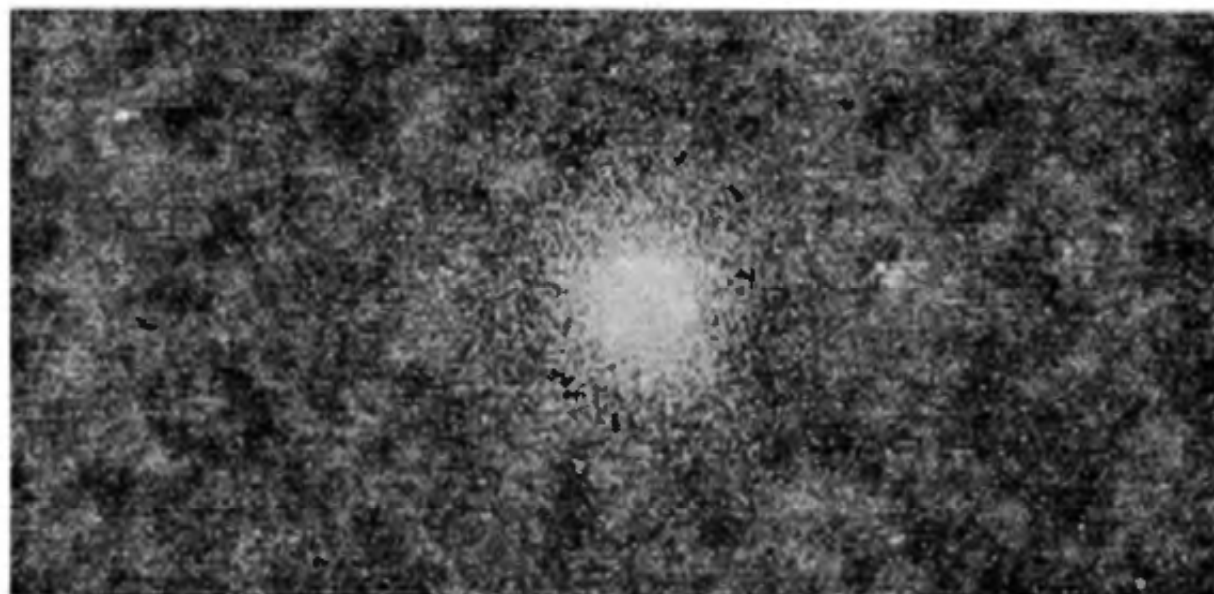


Рис. 47. Шаровое скопление в созвездии Тукана.

скоростям, близкое к универсальному максвелловскому распределению, о котором мы уже упоминали.

Но сближения звезд неизбежно приводят к тому, что время от времени какая-то одна из них случайно получает такую большую скорость, что, преодолев притяжение других звезд, оказывается способной уйти из системы. Поэтому, в отличие от газа, в распределении звезд по скоростям не хватает самых быстрых звезд на высокоскоростном «хвосте» их распределения. Дефицит быстрых звезд составляет примерно одну сотую от общего числа звезд системы. Такое неизбежное и исчезающее отклонение от равновесного состояния, связанное с постоянным «испарением» звезд,— отличительная черта гравитирующей системы.

В ходе «испарительной» эволюции звездные скопления становятся все более неоднородными по плотности, в них формируются компактные центральные области, ядра, окруженные сравнительно разреженными гало (рис. 47). Потеря звезд скоплением может завершиться со временем его полным распадом и рассеянием, как это впервые показал В. А. Амбарцумян в 1938 г.

Общая теория динамической эволюции звездных систем, сопровождающаяся релаксацией и «испарением» наиболее быстрых звезд, разрабатывалась в 40-е — 50-е годы Ш. Чандрасекаром, К. Ф. Огородниковым, Л. Э. Гуревичем, Б. Ю. Левиным, Т. А. Агеяном. Один из наиболее важных ее результатов состоит в том, что благодаря «испарительной» эволюции многие звездные скопления или группы, первоначально сформировавшиеся в галактике, могли почти полностью разрушиться, а их звезды рассеяться и размещаться по общему объему системы, что и наблюдается в реальных галактиках.

Иная судьба ожидала, по-видимому, плотные скопления звезд, сформировавшиеся в центральных областях галактик. По мере «испарения» из них наиболее быстрых звезд происходило общее сжатие таких скоплений. Из-за этого парные сближения звезд случались в них все чаще и чаще, причем звезды в таких случаях довольно близко подходили уже друг к другу. Наконец, на определенной стадии эволюции системы стали возможны прямые столкновения звезд друг с другом.

При таких столкновениях звезды приходят в непосредственный контакт, и ясно, что при этом может сильно измениться их внутреннее строение: звезды могут деформироваться, разбиться на части или, наоборот, слипнуться. Вероятнее всего «обдирание» внешних слоев звезд; освобождающийся при этом газ сначала рассеивается по системе, а затем должен оседать к ее центру, претерпевая там гравитационную конденсацию и фрагментацию. В результате становится возможным формирование молодых звезд, образующих яркую и плотную, концентрированную подсистему. При определенных условиях (например, при высокой температуре газа) формируется не звездная подсистема, а единая сверхмассивная звезда.

Если исходное звездное скопление было достаточно массивным и содержало, например, 10^9 — 10^{10} звезд, то и сверхмассивная звезда могла иметь массу 10^8 — 10^9 солнечных масс. Главная особенность такой звезды — очень интенсивное излучение. При массе, например, 10^8 масс Солнца светимость звезды составляет 10^{39} Вт, так что сверхмассивная звезда, образующаяся, если это оказывается возможным, в центральной плотной области такой звездной системы, как крупная эллиптическая галактика, может увеличить светимость системы в целом в десятки и сотни раз. (Напомним, что светимость нашей Галактики составляет приблизительно $3 \cdot 10^{37}$ Вт.)

Сверхмассивная звезда светит за счет своей гравитационной потенциальной энергии, постепенно сжимаясь. На заключительном этапе сжатия наступает коллапс, т. е. неудержимое падение вещества к центру, не останавливаемое никаким противодействием, и образуется черная дыра. Но и после этого центральная область системы может еще долго излучать энергию, которая черпается теперь из энергии газа и звезд, разгоняющихся до больших скоростей и сталкивающихся друг с другом при падении на такую сверхмассивную черную дыру.

Картина эволюции звездных систем на стадии контактных столкновений включает в себя и еще целый ряд важных процессов. Так, столкновения звезд, когда они имеют неупругий характер, могут сопровождаться слипанием звезд. Образующиеся таким путем более массивные звезды быстрее эволюционируют и за время $\sim 10^8$ лет в системе могут, как полагает С. Колгейт, происходить множественные вспышки сверхновых. Это также приводит к значительному повышению светимости системы. Затем вспыхнувшие звезды превращаются в нейтронные звезды, пульсары, а самые массивные из звезд коллапсируют до состояния черных дыр. К светимости системы добавляются при этом излучение пульсаров и поток энергии от аккреции вещества черными дырами.

По своим внешним проявлениям центральные области концентрированных звездных систем на стадии контактных столкновений напоминают квазары или активные ядра галактик (см. книги Э. А. Дибая (1977) и Ф. Хойла (1968)). Мы не можем, однако, подробнее обсуждать здесь эту в высшей степени интересную проблему — она составляет сейчас предмет многочисленных исследований, однако чрезвычайно сложна и все еще очень далека от решения; по важности она вполне заслуживала бы отдельной книги.

«СКРЫТЫЕ МАССЫ», НЕЙТРИНО И ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ ВАКУУМ

Впервые о существовании во Вселенной каких-то невидимых, но очень значительных масс вещества стали подозревать еще более 40 лет назад, когда астрономы начали изучение групп и скоплений галактик. В последние годы появились наблюдательные указания на то, что наша Галактика и другие крупные галактики обладают обширными коронами, простирающимися далеко за пределы видимой звездной системы. Короны не излучают света, но заключенная в них масса превосходит, как полагают, полную массу звезд. Природа этой «скрытой массы» представляет собой одну из самых трудных загадок астрономии. Однако недавние открытия в физике элементарных частиц вселяют надежду на решение проблемы: возможно, галактические короны наполнены мельчайшими частицами материи — нейтрино.

Физика элементарных частиц и астрофизика — две области науки, изучающие явления природы самых малых и самых больших пространственных масштабов, — обнаруживают возрастающую тенденцию к выявлению глубокой внутренней связи между ними. Становится все очевиднее, что свойства элементарных частиц определяют в значительной степени строение и эволюцию звезд, галактик, Вселенной в целом, тогда как космическая распространенность элементарных частиц, а, может быть, и само их происхождение обязаны бурным процессам в ранней Вселенной.

О важнейших идеях, гипотезах, догадках, обсуждаемых сейчас в космологии и физике элементарных частиц в связи с картиной ранних стадий Вселенной, можно прочитать в статьях Я. Б. Зельдовича (1977, 1981), А. Д. Долгова и Я. Б. Зельдовича, в книге С. Вайнберга (1981). Мы обращаемся здесь к этой теме, чтобы рассказать о крупномасштабных астрономических явлениях, наблюдаемых в современной Вселенной, но обусловленных физическими процессами, протекавшими на уровне

элементарных частиц в первые мгновения космологического расширения.

Оказывается, что многие принципиальные выводы астрофизики и космологии зависят от того, сколько во Вселенной нейтрино и имеется ли у этих элементарных частиц масса покоя. Не исключено, что именно нейтрино дают главный вклад в плотность вещества в современной Вселенной и определяют тем самым динамику космологического расширения, геометрию мира, а с ней и дальнейшую судьбу Вселенной. Космологическая и космогоническая роль нейтрино велика, даже если нейтрино обладают массой покоя, хотя бы и во много раз меньшей массы покоя электрона.

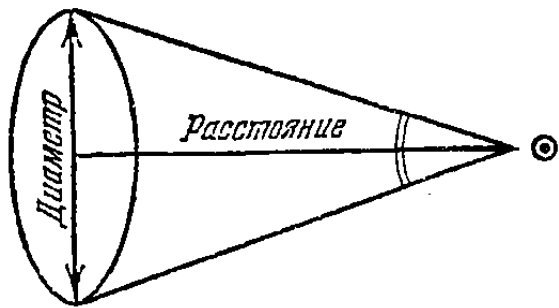
«СКРЫТЫЕ МАССЫ»

Одно из наиболее хорошо изученных скоплений галактик — скопление Кома, или Волосы Вероники. Но если созвездие состоит из близких к нам звезд нашей Галактики, то скопление Кома находится гораздо дальше, далеко за пределами Галактики. Расстояние до него составляет приблизительно 140 Мпс, т. е. $4 \cdot 10^{26}$ см.

О расстоянии до Комы и других скоплений (и сверхскоплений) судят по красному смещению в спектрах составляющих их галактик. Красное смещение — результат космологического расширения, общего разбегания этих систем. Скорость, с которой скопление Кома удаляется от нас, вычисляемая по измеренному красному смещению, определяется довольно точно: 6850 км/с. Закон Хаббла, связывающий скорость v взаимного удаления систем с расстоянием L между ними, $v=HL$, позволяет найти это расстояние. Приведенное выше расстояние до скопления Кома вычислено в предположении, что постоянная Хаббла $H=50$ км/(с·Мпс).

Если известно расстояние до скопления, то можно определить и его собственный размер. Для этого нужно измерить угол, под которым видно скопление, а затем воспользоваться простыми тригонометрическими соотношениями, связывающими стороны и углы в треугольнике, две вершины которого находятся на краях скопления, а третья — на Земле (рис. 48). Скопление Кома видно под углом, составляющим приблизительно 100 минут, т. е. 1,7 градуса, или 0,06 радиана. Тогда при расстоянии в 140 Мпс диаметр скопления составит приблизительно 8 Мпс, а радиус 4 Мпс, или 10^{25} см.

Скорость удаления от нас скопления Кома соответствует его движению как целого, или, что то же самое, движению центра масс скопления. Но внутри объема скопления каждая галактика движется относительно центра и эти



собственные движения галактик тоже находятся по красному смещению*) в их спектрах: красное смещение для каждой галактики слегка отличается от их среднего значения (последнее и приписывается, естественно, скоплению как целому). Типичная скорость собственных

Рис. 48. Как находят размер скопления.

движений галактик в скоплении Кома оценивается приблизительно в две тысячи

километров в секунду, т. е. $2 \cdot 10^8$ см/с.

Имеется универсальное соотношение, связывающее массу M и размер R стационарной гравитирующей системы со скоростями движений v составляющих ее тел: $v^2 \approx GM/R$ (G — гравитационная постоянная). Это соотношение называют теоремой вириала. Оно позволит нам найти массу скопления по известным значениям скорости собственных движений галактик и радиуса скопления. Для скопления Кома это даст массу $3 \cdot 10^{15}$ солнечных масс, что приблизительно в десять тысяч раз больше массы нашей Галактики.

Такого рода динамические оценки масс скоплений были сделаны в 30-е годы Ф. Цвикки, а позднее и другими астрономами.

Чтобы производить такие оценки, нужно быть уверенным, что галактики в скоплении связаны их общим тяготением и движутся в ограниченном объеме, никогда не выходя из него. Полной и единодушной убежденности в этом среди астрономов отнюдь не было, когда изучение скоплений только начиналось. Сомнения вызывались тем обстоятельством, что динамическая оценка масс скоплений противоречит другой оценке, основанной на измерении яркости галактик в скоплении. При этом втором методе исходят из того, что отношение массы галактики к ее све-

*) Точнее, таким путем находят лучевые скорости, т. е. соответствующие проекции скоростей галактик на луч зрения. Но обычно скорости по всем направлениям приблизительно одинаковы, как это имеет место для скопления Кома.

тимости, т. е. энергии, излучаемой в единицу времени, одинаково для галактик каждого данного типа. Если так, то, зная, на каком расстоянии находятся галактики и какого они типа — спиральные, эллиптические или неправильные, — можно по измеренному потоку излучения от них подсчитать массу каждой галактики и массу скопления в целом. (Разумеется, и этот метод опирается в конечном счете на динамику: при нахождении стандартного отношения массы к светимости используется то значение массы «образцовой» галактики, которое находят по движению ее звезд.) Массы, оцениваемые по светимости, оказываются в несколько раз, а иногда и в нескольких десятков раз, меньше, чем по динамической оценке.

Возникает альтернатива: либо скопления не связаны и динамическая оценка их масс просто невозможна, либо в скоплениях имеются значительные массы вещества, никак не проявляющие себя в излучении.

Рассмотрим сначала первую возможность.

Если скопления нестационарны и никакой другой массы, кроме массы галактик, в них нет, то движения галактик в скоплениях характеризуют не его полную массу, а степень нестационарности системы. Такая точка зрения была высказана в 50-е годы В. А. Амбарцумяном; она послужила одним из центральных пунктов космогонической гипотезы, разрабатываемой в Бюраканской астрофизической обсерватории.

Амбарцумян предположил, что скопления галактик возникают в результате «взрывов» плотных тел: каждое такое тело способно делиться на разлетающиеся фрагменты, которые превращаются затем в галактики. Энергия «взрыва» сообщает галактикам большие скорости. Образование звезд происходит в результате дальнейшего дробления фрагментов; в центре же галактики может остаться какая-то часть вещества в первоначальной форме. Дозвездное тело в ядре галактики может испытывать гигантские взрывы, сопровождающиеся выбросами значительных масс вещества, интенсивным радиоизлучением и т. д.

В этой космогонической концепции природа плотных дозвездных тел не конкретизируется. Делается лишь предположение, что эти тела не обязательно должны удовлетворять известным сейчас законам физики; в частности, при их взрывах не обязательно выполнение закона сохранения энергии, не обязательен для них также и закон сохранения вращательного момента.

Гипотезы, основанные на столь радикальных допущениях, трудно развивать теоретически *). Однако с наблюдательной точки зрения представление об активности ядер галактик оказалось важным и плодотворным; большой вклад в исследования этого явления внесли бюраканские астрономы.

Но идея разлета скоплений сталкивается с явным противоречием: как показал И. Д. Караченцев, при наблюдаемых скоростях галактик в скоплениях они могли бы оставаться в современном объеме этих систем в течение не более одного-двух миллиардов лет и, следовательно, сами скопления должны существовать не дольше этого времени. Однако возраст галактик в скоплениях не меньше 10—12 миллиардов лет, чего, конечно, не могло бы быть, если скопления разлетаются и галактики рождались в едином взрыве, породившем само скопление.

Ситуация в значительной степени прояснилась, когда веский довод в пользу стационарности и гравитационной связанности скоплений принесла рентгеновская астрономия, одна из самых молодых областей астрономии, изучающая небесные тела по излучаемым ими рентгеновским лучам. В 1972 г. американские астрономы с помощью специализированного исследовательского рентгеновского спутника «Ухуру» открыли горячий газ в скоплениях галактик. В скоплении Кома, о котором мы говорили выше, температура газа оказалась очень высокой, она достигает сотни миллионов градусов (потому-то этот газ и излучает в основном именно рентгеновские лучи, а не видимый свет или радиоволны). При такой температуре тепловые движения частиц **) характеризуются скоростями, близкими к тысяче километров в секунду, что приблизительно совпадает со скоростями галактик в этом скоплении. Такое совпадение, а оно отмечается не только для Комы, но и для ряда других скоплений, вряд ли случайно; скорее, оно означает, что и частицы газа и галактики, находящиеся в общем гравитационном поле скопления, «падают» в этом поле действительно с одинаковыми скоростями,

*) Между прочим, еще в 20-е годы Дж. Джинс заметил, не вдаваясь в подробности, что трудности с объяснением происхождения спиральных ветвей галактик способны навести на подозрение, что центры галактик — особые точки, через которые вещество, может быть, проникает в нашу Вселенную из каких-то других миров. Это в самом деле тоже довольно радикальная гипотеза.

**) Газ в скоплениях ионизован, и здесь речь идет о ядрах водорода — протонах.

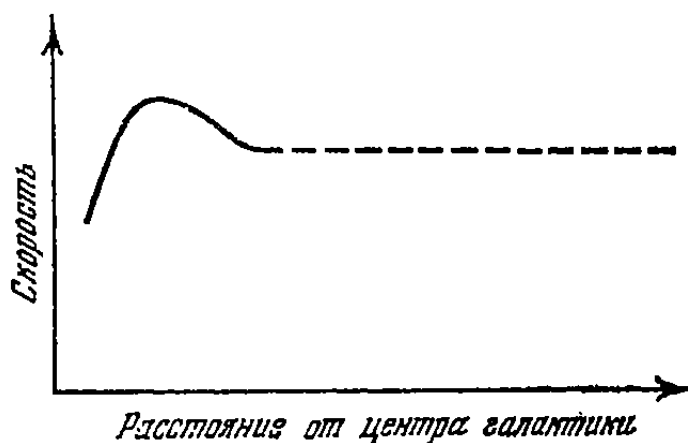
как это и должно быть, если и газ и галактики составляют единую гравитационно связанную стационарную систему.

Сейчас с ббльшим основанием, чем раньше, многие астрономы склонны доверять динамической оцепке масс. Но в таком случае пужно принять вторую из указанных выше возможностей и допустить, что в скоплениях галактик, кроме светящегося вещества, т. е. звезд, составляющих видимые галактики, имеется невидимая масса, которая и определяет динамику этих систем.

На основании новейших данных можно полагать, что эта невидимая масса, если она действительно существует, сосредоточена главным образом вокруг крупных галактик, образуя их массивные и протяженные короны. К этому выводу пришли Я. Э. Эйнасто и его коллеги в Тартуской обсерватории на основании изучения движений карликовых галактик-спутников массивных галактик. Несколько таких спутников имеется у нашей Галактики, наблюдаются они у Туманности Андромеды и у десятка других галактик. Измеряя скорости обращения спутников вокруг галактик и радиусы их орбит, можно оценить силу тяготения, действующую на спутники со стороны массивной галактики.

Тартуские астрономы, а вслед за ними и американские теоретики Дж. Острайкер, Дж. Пиблс и А. Яхил обратили

Рис. 49. Кривая вращения: зависимость скорости вращения диска (сплошная линия) и галактик-спутников от расстояния до гигантской спиральной галактики.



внимание на удивительную особенность в динамике галактик-спутников: скорости их обращения одинаковы на разных расстояниях от центральной галактики (рис. 49).

Но всегда считалось само собой разумеющимся, что эти скорости должны убывать с расстоянием от центра обратно пропорционально корню квадратному из радиуса орбиты, т. е. в соответствии с кеплеровским законом (которому подчиняются планеты в Солнечной системе). И это было бы действительно так, если бы вся масса центральной

галактики была сосредоточена в пределах ее видимого объема, что, собственно, и подразумевалось обычно.

Независимость скоростей спутников от радиусов их орбит заставляет считать, что масса центральной галактики не ограничивается на самом деле звездами, лежащими в пределах ее видимого объема. Кроме видимых звезд, должны существовать и какие-то иные тяготеющие массы, распределенные по гораздо большему объему вокруг гигантской галактики. Не те ли это массы, которые ранее были замечены по динамике скоплений? — такая догадка напрашивается сама собой.

Так возникло представление о невидимых коронах галактик, в которых главным образом и сосредоточена, вероятно, скрытая масса скоплений. Короны простираются на большие расстояния и достигают орбит самых дальних спутников, так что эти спутники движутся не в пустоте, а среди невидимых масс. Тяготеющая масса, которая действует при этом на каждый из спутников, складывается из массы видимых звезд и скрытой массы, заключенной в пределах орбиты данного спутника.

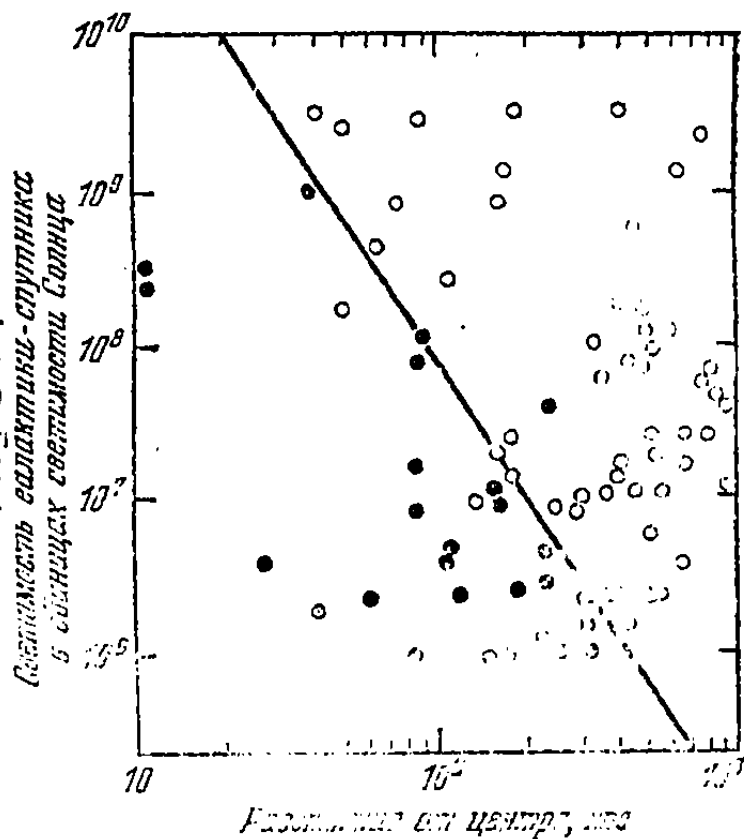
Галактика вместе с массивной невидимой короной и семейством спутников образует стационарную гравитационно-связанную систему; такая система получила название «гипергалактика». К гипергалактике полностью применимо общее соотношение между параметрами гравитационно-связанных систем, теорема о вириале, в которой теперь нужно только понимать v и R как скорость и радиус орбиты спутника, а M — как массу в пределах его орбиты. При неизменной скорости v из этого соотношения следует определенная зависимость массы скрытого вещества от расстояния до центра: масса нарастает пропорционально расстоянию: $M \propto R$. При возрастании массы по этому закону плотность вещества убывает наружу обратно пропорционально квадрату расстояния от центра. На достаточном удалении от центра плотность падает быстрее и сходит на нет.

В последние годы к данным о карликовых галактиках-спутниках прибавились и данные о движении облаков нейтрального водорода вокруг массивных галактик: их скорости также не зависят от радиуса орбиты. Объекты обоего рода прослеживаются на расстояниях, превышающих радиус видимого тела центральной галактики в несколько раз, а то и в несколько десятков раз. Из этого, в соответствии с только что сказанным, следует, что и полная масса галактики вместе с ее короной в несколько

раз или даже в несколько десятков раз больше суммарной массы видимых звезд. Типичная гипергалактика приблизительно в 3—5 раз массивнее ее центральной галактики.

Гипергалактики представляют собою, по-видимому, устойчивые системы тел, связанных общим происхождением. Составляющие их объекты — от массивной центральной галактики (иногда в центре системы вместо

Рис. 50. Галактики-спутники на диаграмме светимость — расстояние (по данным Я. Э. Эйпасто и др.). По обеим осям — логарифмическая шкала.



одной галактики находится достаточно тесная пара крупных галактик) до карликовых галактик-спутников на периферии — образовались в едином процессе, определившем и строгие системы в целом, и структуру всех ее членов.

Наблюдательные данные о карликовых галактиках, собранные и изученные В. Е. Караченцевой, специальные исследования гипергалактик, проведенные в Тартуской обсерватории, позволили выявить интересное свойство этих систем. Галактики-спутники, обращающиеся вокруг центра системы, бывают и эллиптическими, и спиральными, и неправильными; по эллиптические спутники гораздо чаще встречаются во внутренних областях системы, чем на ее краях, тогда как спиральные и неправильные спутники населяют главным образом периферию системы. На диаграмме, представляющей данные о спутниках нашей Галактики и трех других подобных ей галактик, эллиптические и неэллиптические (т. е. спиральные и неправильные) спутники оказались довольно четко разделенными: первые на-

селяют главным образом область слева от проведенной на диаграмме разделяющей линии, а вторые — справа (рис. 50).

Этот факт указывает на повышенную степень организации и регулярности гипергалактик по сравнению с обычными группами галактик. По-видимому, пространственное разделение эллиптических и неэллиптических галактик возникло на той стадии формирования этих систем, когда в них имелось еще немало газа, распределенного по всему их объему. В конце концов этот газ осел на центральную галактику, но прежде он успел повлечь на движущиеся сквозь него карликовые галактики. Если карликовая галактика обладает собственным межзвездным газом, то она может сохранить его при своем движении лишь в случае, когда гравитационная связь межзвездного газа внутри этой галактики сильнее, чем встречный «ветер» распределенного газа гипергалактики. «Ветер» может преобладать над такой связью во внутренней области системы, где плотность распределенного газа больше, и потому в этой области галактики-карлики не способны удержать межзвездный газ и теряют его уже через несколько оборотов по своим орбитам. Но галактика, лишенная межзвездного газа, должна выглядеть, как эллиптическая галактика: в ней нет ярких молодых звезд, характерных для богатых газом спиральных и неправильных галактик, а имеется лишь остов старых звезд, подобный сферической составляющей нашей Галактики. Во внешних же частях гипергалактик, где плотность распределенного газа ниже, выметание межзвездного газа из галактик-спутников менее эффективно, и там вполне могут существовать карлики спирального и неправильного типов.

Если этот газодинамический процесс действительно был эффективен, то должна проявиться еще одна особенность в распределении галактик-спутников — более массивные спутники могут сохранить свой межзвездный газ на меньших расстояниях от центра, чем менее массивные, так как в первых гравитационная связь газа со звездами сильнее, чем во вторых. Но именно это мы и видим на рис. 50; по вертикальной оси указана светимость галактик, но, очевидно, она тем больше, чем больше масса галактики, так что более массивные галактики всех типов располагаются на диаграмме выше менее массивных. В согласии со сказанным спиральные и неправильные галактики в верхней части диаграммы располагаются левее (т. е. ближе в центре), чем в нижней ее части.

В гипергалактиках, в скоплениях галактик стационарность и связанность достигаются благодаря наличию в них «скрытой массы». Но какова природа этой массы — космическая пыль, холодные сгустки газа, потухшие звезды, планеты, а, может быть, и черные дыры (последние всегда на подозрении, когда в астрономии возникают трудные загадки)...? Высказывалось немало предположений, но тщательный анализ наблюдательных данных резко сократил число теоретически допустимых возможностей, и постепенно сложилось и стало распространенным мнением, что скрытая масса складывается скорее всего из очень малых и очень слабых по блеску звезд, которые слишком тусклы, чтобы их можно было наблюдать. Но даже и с этими гипотетическими звездами — черными карликами, как их называли в литературе, — было далеко не все ясно. Например, теория звездообразования показывает, что такие звезды не могли рождаться в общих, единых комплексах с обычными звездами, а массовое рождение одних только «мелких» звезд трудно согласовать с известными соображениями о космогоническом процессе в галактиках.

Но с 1980 г. всеобщее внимание привлекла совсем иная возможность, на которую еще несколькими годами ранее указали астрофизики Будапештского университета Д. Маркс и Ш. Салаи. Они выдвинули гипотезу о нейтринно как носителях скрытой массы. Для этого, однако, нейтринно должны быть частицами, обладающими массой покоя. Когда весной 1980 г. группа московских физиков-экспериментаторов под руководством В. А. Любимова сообщила об открытии массы покоя нейтринно, гипотеза Маркса и Салаи получила физическое обоснование.

МАССА ПОКОЯ НЕЙТРИНО

В физических экспериментах, проводившихся в 30-е годы с радиоактивными ядрами, было установлено, что ядро трития — тяжелого изотопа водорода, при своем распаде превращается в ядро гелия, испуская электрон, но, кроме того, теряют и еще некоторую часть своей энергии. В. Паули предположил, что эту энергию уносят какие-то неизвестные частицы, которые в этих экспериментах остаются незарегистрированными (рис. 51). Они не должны иметь электрического заряда и этим похожи на нейтроны, открытые незадолго до того, но только гораздо легче их. По предложению Э. Ферми их называли на итальянский лад нейтринно, т. е. маленькие нейтроны.

Дальнейшие исследования позволили выявить многие их свойства, и главным оказалось то, что нейтрино очень слабо взаимодействуют друг с другом и с иными элементарными частицами*). В начале 50-х годов их удалось непосредственно зарегистрировать в экспериментах на

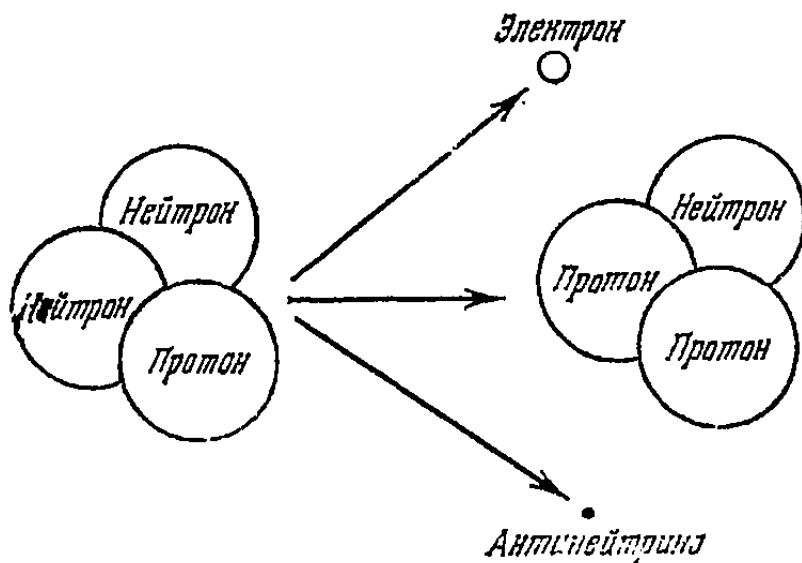


Рис. 51. Радиоактивный распад трития.

мощных ядерных реакторах, а в 70-е годы были обнаружены и первые космические нейтрино — нейтрино от Солнца. Было найдено также, что существуют три сорта нейтрино: электронные (которые и появляются при распаде трития), мюонные, рождающиеся обычно вместе мюонами, и тау-нейтрино, рождающиеся вместе с тау-мезонами.

Однако до последнего времени осталось неясным, имеют ли нейтрино массу покоя, т. е. такую массу, которой частица обладает в состоянии покоя. Согласно теории относительности масса каждого тела зависит от того, какова его скорость, и эта зависимость тем заметнее, чем ближе скорость тела к максимально возможной скорости — скорости света. У фотона, кванта света, масса целиком обязана движению, покой для него невозможен, фотон существует лишь в движении. Во всех экспериментах, проводившихся с нейтрино, эти частицы находились в движении, а их масса покоя не поддавалась измерению; оказывалось возможным лишь установить, что она во всяком случае во много раз меньше массы электрона, причем не исключает

*) Из четырех фундаментальных взаимодействий природы — электромагнитного, сильного (ядерного), слабого (управляющего радиоактивным распадом) и гравитационного — нейтрино участвуют лишь в двух последних,

лось, что она может быть и просто равна нулю, как равна нулю масса покоя фотона.

Повышение чувствительности физических приборов позволило В. А. Любимову и его сотрудникам найти веские доводы в пользу того, что масса покоя нейтрино не равна нулю. В традиционном для нейтринной физики эксперименте с распадом трития нейтрино вели себя как частицы с массой покоя, которая приблизительно в тридцать тысяч раз меньше массы электрона, считавшегося до того самой легкой частицей, имеющей массу покоя. Авторы считают свой результат пока что лишь предварительным, но если он подтвердится, это приведет, вероятно, к пересмотру определенных представлений в теории элементарных частиц; очень важные следствия связаны с этим и для астрофизики.

НЕЙТРИННЫЕ КОРОНЫ

Согласно современным космологическим представлениям нейтрино — одни из самых распространенных частиц во Вселенной. Их приходится в среднем примерно по 450 на каждый кубический сантиметр пространства. По распространенности нейтрино лишь немного уступают фотонам, но их приблизительно в миллиард раз больше, чем протонов и электронов. Важно, что этот вывод космологии никак не зависит от того, имеют ли нейтрино массу покоя или нет; он следует из первых принципов физики, и потому есть все основания считать его вполне надежным.

В своем подавляющем большинстве космические нейтрино (как и фотоны) имеют космологическую природу — они не испущены звездами или другими телами, а возникли вместе с протонами, электронами, нейтронами и другими частицами 15—18 миллиардов лет назад. Если нейтрино имеют массу покоя, они не могут быть рассеяны равномерно по всему пространству Вселенной, а подобно всем частицам с массой покоя, т. е. тем же протонам, электронам и т. д., должны сгущаться в образования того или иного масштаба под влиянием их взаимного тяготения. Из них не выйдет планета или звезда, но они вполне могут содержаться в межзвездном пространстве галактик, они способны также создать вокруг галактики обширное облако, корону. Если верна указанная выше оценка массы покоя нейтрино, то космических нейтрино достаточно, чтобы наполнить короны галактик, сделать их такими массивными, какими они и представляются по динамике га-

лактик и скоплений. В этом случае галактики и их скопления представляют собой лишь легкий светящийся узор, украшающий гигантские образования, состоящие почти из одних лишь нейтрино.

Открытие массы покоя нейтрино проливает новый свет и на проблему формирования космических тел из однородного вещества ранней Вселенной. При той массе покоя, которую сообщают экспериментаторы, и ввиду огромного преобладания по числу, нейтрино оказываются преобладающими приблизительно в десять раз и по полной массе над всеми другими частицами Вселенной. Ими определяется общее поле тяготения космической среды, их собственное взаимное притяжение заставляет нейтрино собираться в огромные по размеру и массе сгущения, а все остальные частицы (за исключением фотонов) следуют за нейтрино, увлекаемые гравитационным полем этих сгущений. Нейтрино принадлежит, таким образом, очень важная роль в космогонии галактик и скоплений.

Согласно теории, разрабатываемой группой Я. Б. Зельдовича, последовательность событий в эпоху формирования галактик такова, что сначала формируются нейтринные сгущения с массой самых крупных скоплений или сверхскоплений галактик. Газ «обычных» частиц, захваченный этими сгущениями, претерпевает сжатие и разогрев, потом наступает его охлаждение, а вслед за тем и фрагментация наиболее плотных слоев на протоскопления и протогалактики. Сами же сверхскопления, как системы, содержащие много галактик и целых скоплений, при этом не исчезают, а продолжают существовать, хотя они могут и не быть столь связанными и стационарными, как галактики и скопления. В ходе общей фрагментации среды нейтрино тоже испытывают сгущивание, образуя то, что в астрономических наблюдениях, о которых говорилось выше, проявляет себя как короны массивных галактик.

В этой картине не все пока что разработано одинаково подробно, возникают довольно сложные нелинейные задачи гравитационного взаимодействия нейтринной составляющей протоскоплений с газом, причем в самой нейтринной составляющей возможны взаимно проникающие потоки и т. п. Наиболее хорошо изучена сейчас, благодаря работам Г. С. Бисноватого-Когана, В. Н. Лукаша, И. Д. Новикова, начальная стадия процесса, когда исходные неоднородности, охватывающие массы сверхскопления, представляли собой слабые возмущения, усиливаемые гравитационной неустойчивостью.

В соответствии с данными о реликтовом излучении и сведениями о массе покоя нейтрино следует выделить три различные эпохи в эволюции первичных догалактических возмущений. В первую, самую раннюю из них, длившуюся не более долей секунды от начала космологического расширения, нейтрино испытывали столкновения между собой и с другими частицами, обмениваясь энергией и импульсом благодаря слабому взаимодействию*), и все частицы составляли вместе единую среду, находившуюся в термодинамическом равновесии; температура среды была так велика, что тепловые скорости всех частиц приближались к скорости света. Во вторую эпоху, длившуюся приблизительно сто тысяч лет, слабое взаимодействие уже несущественно из-за падения плотности и температуры среды в ходе ее общего расширения, нейтрино перестают сталкиваться и взаимодействовать между собой и с другими частицами, но остаются еще релятивистскими в том смысле, что скорости их тепловых движений сравнимы со скоростью света. Космическая среда в эту эпоху состоит из двух компонент, взаимодействующих только гравитационно, — из бесстолкновительных нейтрино и смеси вещества с фотонами. В третью эпоху, длящуюся до сих пор, бесстолкновительная нейтринная компонента является уже нерелятивистской.

Принципиальным результатом теории Лифшица, полностью сохраняющим свое значение, является то, что исходные возмущения, даже в первую эпоху, представляли собой некоторую структуру в том смысле, что их амплитуды (сами по себе и малые) на много порядков превосходили уровень статистических флуктуаций в среде. Природа этих затравочных возмущений остается пока неизвестной, и только в самое последнее время появилась надежда связать их с квантово-гравитационными процессами вблизи космологической сингулярности. Но дальнейшая судьба слабых возмущений во вторую и третью эпохи может быть прослежена достаточно уверенно.

Для развития гравитационной неустойчивости необходимо, чтобы тяготению, стремящемуся сблизить частицы, не мешали хаотические тепловые движения частиц. Для того чтобы гравитация была доминирующим фактором,

*) Здесь слово «слабое» — название одного из четырех фундаментальных типов взаимодействий, которое в рассматриваемых условиях было достаточно эффективно благодаря большой энергии сталкивающихся частиц и большой частоте этих столкновений.

размер области возмущения должен превосходить критическую величину, называемую джинсовой длиной.

В первые две эпохи эволюции возмущений джинсова длина была столь велика, что приближалась к расстоянию до горизонта. Но при переходе к третьей эпохе, когда тепловые скорости нейтрино становятся нерелятивистскими, джинсова длина убывает — см. рис. 52, где показана зави-

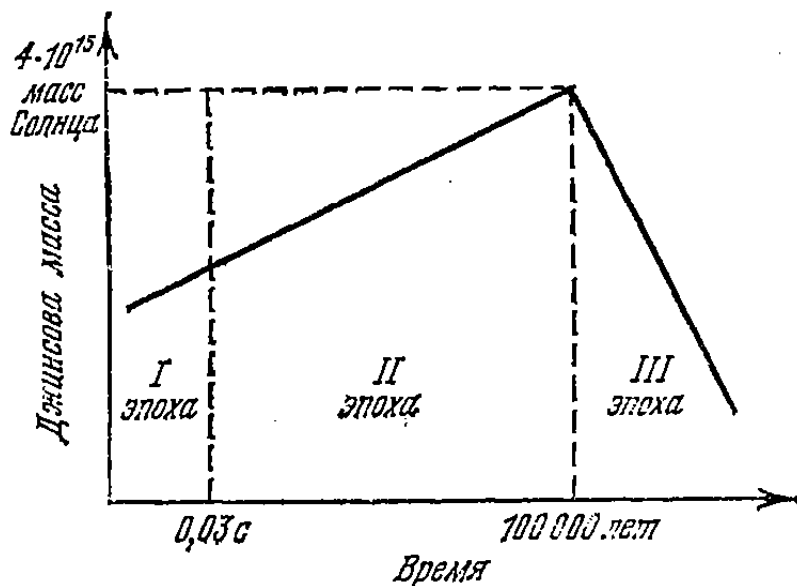


Рис. 52. Джинсова масса в расширяющемся мире с нейтрино, имеющими массу покоя. По обеим осям — логарифмическая шкала.

симость от времени джинсовой массы, т. е. массы нейтрино, заключенных в области джинсова размера. Эта масса достигает максимума на границе второй и третьей эпох, здесь она составляет $4 \cdot 10^{15}$ масс Солнца.

Как заметили Салаи и Маркс, масса, даваемая этим соотношением, должна играть ключевую роль в любом сценарии космогонического процесса. Действительно, она указывает наименьшее по размеру и массе возмущение, которое может беспрепятственно расти и усиливаться во все времена. В теории Я. Б. Зельдовича с ней связывается масса первых обособляющихся нейтринных сгущений. Для этой выделенной массы амплитуда возмущений считается наибольшей в третью эпоху, когда происходит переход к стадии сильных возмущений и начинается обособление отдельных масс, дающих затем начало космическим системам. Весьма важно, что указанная масса действительно близка к массам скоплений и сверхскоплений.

Заключительная стадия космогонического процесса началась, по-видимому, при возрасте мира в 1—3 миллиарда лет. Одной из замечательных ее особенностей является то, что нейтринные сгущения формировались не изолированно друг от друга, а всегда во взаимодействии, причем они как бы делили между собой весь имевшийся в наличии мате-

риал, сгребая его в уплотненные слои. В свою очередь эти слои соединяются и пересекаются друг с другом, образуя ячейки неправильной формы, и все в целом представляется какой-то квазиупорядоченной, сетчатой структурой, отдаленно напоминающей пчелиные соты (ср. рис. 15, на котором представлен результат машинного моделирования подобного процесса).

В последние годы стали появляться некоторые наблюдательные данные, которые, как полагают, указывают на то, что такая ячеистая «сверхструктура» действительно существует во Вселенной и, возможно, имеет универсальный характер, т. е. проявляющийся повсюду в мире. На крупномасштабной карте мира группы и скопления галактик оказываются в ряде известных случаев расположенными преимущественно в сравнительно тонких слоях или цепочках, служащих стенками ячеек с размером около 100 Мпс.

Важнейшие результаты теории образования галактик, полученные ранее, до открытия массы покоя нейтрино, целиком остаются в силе и в новой картине мира. Уплотненные сгущения-протоскопления, «блины», о которых мы говорили в главе второй, образуются и здесь; хотя сила тяготения, определяющая их формирование, создается не только самим газом, но главным образом нейтрино, физика «блинов» от этого не очень меняется. В сгущениях-протоскоплениях и в этом случае эффективно действуют газодинамические механизмы, создающие в среде завихренность, формирующие вращающиеся сгустки газа, способные превратиться в спиральные галактики.

ЗАКРЫТАЯ ВСЕЛЕННАЯ?

Усредненная по всему пространству плотность вещества галактик (т. е. фактически плотность барионов — протонов и нейтронов) составляет приблизительно 10^{-30} — 10^{-31} г/см³. Если нейтрино (и антинейтрино) всех трех сортов имеют массу покоя, даваемую экспериментаторами для электронных нейтрино, то их средняя плотность составит величину $(1 \div 3) \cdot 10^{-29}$ г/см³. Современные оценки критической космологической плотности дают значение $(1 \div 0,5) \cdot 10^{-29}$ г/см³. Из сравнения плотности нейтрино с критической плотностью видно, что обе величины близки друг к другу. Не исключается даже, что плотность нейтрино превосходит критическую плотность. Учет нейтрино, обладающих массой покоя, может радикально изменить

вывод о судьбе космологического расширения и геометрии мира.

Если не учитывать нейтрино, как это фактически и делалось всегда до открытия московских экспериментаторов, то средняя плотность Вселенной определенно меньше критической плотности, а это, по теории Фридмана, означает, что космологическое расширение будет продолжаться неограниченно и объем Вселенной бесконечен. Если же в «нейтринном» мире плотность больше критической, то этот вывод должен измениться на противоположный: расширение не вечно, оно рано или поздно сменится сжатием; вместе с тем и объем Вселенной нужно считать тогда конечным, ограниченным. Вместо открытой модели Вселенной нужно принять закрытую модель.

В конечности объема закрытой Вселенной нет ничего противоречащего общим принципам физики, но одних только принципов недостаточно для решения вопроса о конечности и бесконечности, здесь требуются наблюдательные, астрономические критерии и только они способны дать ответ на этот вопрос.

Одним из таких критериев является естественное требование, чтобы возраст Вселенной, вычисляемый на основании той или иной космологической модели, был не меньше возраста самых старых звезд Галактики. Звезды сферической подсистемы существуют по крайней мере 12 миллиардов лет, и это дает нижний допустимый предел возраста Вселенной. Еще более жесткий предел — 15—18 миллиардов лет — следует из возраста атомных ядер, оцениваемого по распространенности некоторых радиоактивных изотопов *). Ясно, что Вселенная не может быть моложе, чем то вещество, из которого она состоит. Но этому-то условию и не удовлетворяет закрытая космологическая модель: рассчитанный на ее основе возраст Вселенной получается слишком малым, меньше 10 миллиардов лет.

Интересно, что еще в 1966 г. С. С. Герштейн и Я. Б. Зельдович получили ограничение массы покоя нейтрино, исходя из требования, чтобы связанная с нейтрино плотность Вселенной была такова, что соответствующий ей возраст мира был бы достаточно велик. Верхний предел массы покоя нейтрино по такой космологической оценке был жестче существовавших тогда экспериментальных, лабораторных ограничений. Это был один из

*) Об изотопных методах оценки возраста ядер можно прочитать в книге Я. М. Крамаровского и В. П. Чечева (1978),

первых примеров, на которых демонстрировалась глубокая внутренняя связь между физикой микромира и Вселенной в целом.

Сейчас, после открытия массы покоя нейтрино, задачу можно, как мы видим, обратить и по известным значениям массы и концентрации нейтрино вычислить возраст Вселенной. Если такое вычисление проводится на основе модели закрытой Вселенной, то возникает серьезное противоречие — возраст мира оказывается, как мы сказали, меньшим возраста звезд и радиоактивных ядер. Более того, и в модели с плотностью, равной критической (что тоже допускается приведенными выше величинами плотностей), возраст мира меньше возраста атомных ядер.

ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ ВАКУУМ

В предпринимаемых сейчас попытках преодолеть противоречие, построить новую космологическую картину, выдвигаются далеко идущие гипотезы о природе космологического расширения, предлагаются обобщения теории Фридмана. Пожалуй, самое интересное обобщение такого рода основано на представлении о необычной вакуумоподобной среде, заполняющей всю Вселенную.

Идея такой среды возникла у Эйнштейна, когда в 1917 г. он впервые применил только что созданную им общую теорию относительности к космологии. В качестве исходной предпосылки к построению физической космологии Эйнштейн принял гипотезу идеальной регулярности, наивысшей симметрии Вселенной в целом. Эта симметрия относится как к пространственным свойствам мира, так и к его поведению во времени. Симметрия во времени — это одинаковость всех моментов в истории Вселенной, ее неизменность и вечность. Максимальная пространственная симметрия — равноправность всех точек (однородность) и равноправность всех направлений (изотропия) в пространстве.

Эти соображения не следовали с необходимостью ни из самой теории относительности, ни из каких-либо «первых принципов» или известных к тому времени фактов астрономии. Они представляли собой обобщение интуитивных представлений о глобальных свойствах мира, которые восходят к истокам науки нового времени: Земля не есть центр Вселенной. Солнце — одна из многих звезд, рассеянных в пространстве; планеты и звезды возникли из прежде однородно распределенного по всему миру

вещества (как полагал Ньютон); текущий момент в истории мира — это миг между бесконечным прошлым и бесконечным будущим и т. д.

Пространственная симметрия мира действительно максимальна, и сейчас, через шестьдесят лет после зарождения современной космологии, мы располагаем несомненным эмпирическим доказательством изотропии физического пространства — открыто реликтовое излучение и установлена его изотропия.

Симметрия мира во времени, как мы теперь знаем, отсутствует; Вселенная расширяется, испытывая разнообразные эволюционные изменения. С теоретической точки зрения невозможность покоя и статичности во Вселенной следует из закона всемирного тяготения — так как все тела притягиваются друг к другу и сила их взаимного притяжения ничем не компенсируется, эти тела должны находиться в движении. При общей однородности распределения вещества такое движение означает либо общее сжатие, либо общее расширение мира. Этот вывод и был получен А. А. Фридманом на основе общей теории относительности, служащей обобщением ньютоновского закона всемирного тяготения. Эйнштейн полностью принял теорию Фридмана и стал на его точку зрения, хотя поначалу и не без колебаний.

Первым откликом Эйнштейна на работу Фридмана, опубликованную в 1922 г. в ведущем международном журнале физиков, была краткая критическая заметка в том же журнале, в которой основной вывод Фридмана характеризовался как ошибочный. Вскоре, однако, последовала вторая заметка; в ней Эйнштейн писал: «... моя критика, как я убедился из письма Фридмана, сообщенного мне г-ном Крутковым, основывалась на ошибке в вычислениях. Я считаю результаты Фридмана правильными и проливающими новый свет».

Открытие Э. Хабблом общего космологического расширения окончательно подтвердило теорию Фридмана, сообщило ей надежную наблюдательную основу. Позднее, подводя итоги теоретических исследований, заложивших фундамент современной космологии, Эйнштейн писал, что «первым на этот путь ступил Фридман».

Решающим аргументом в теоретическом споре является эксперимент и наблюдение. В этом смысле теория расширяющейся Вселенной оказалась верной, а идеи статической Вселенной, неизменной во времени, были оставлены. Конечно, в теоретической модели статической Все-

ленной, которую построил Эйнштейн, никакой прямой ошибки не было (в цитированной выше заметке слова об ошибке в вычислениях относились не к его собственной теории, а к проверочным вычислениям, сделанным при разборе работы Фридмана).

В модели Эйнштейна содержался очень важный элемент — смелая гипотеза, позволяющая совместить статичность мира с законом всемирного тяготения. Статичность требовала, чтобы, кроме вещества, испытывающего всемирное тяготение, имелся какой-то посторонний по отношению к нему силовой фактор, способный уравновесить силы взаимного притяжения всех тел в масштабе Вселенной, рассматриваемой как целое*). В качестве такого фактора был привлечен гипотетический вакуум — однородная среда, не проявляющая себя ничем, кроме... антигравитации, т. е. способности отталкивать друг от друга находящиеся в ней тела.

Эта среда обладает плотностью массы и энергии, по, тем не менее, мы называем антигравитирующую среду Эйнштейна вакуумом (сам он, насколько известно, этой терминологией не пользовался), так как в ней нет никаких реальных частиц; кроме того, она обладает тем особым свойством, что движение и покой относительно этой среды неразличимы. Например, мы знаем, что при движении относительно газа возникает, так сказать, встречный ветер частиц, молекул или атомов, и подсчитав, сколько частиц в единицу времени проносится этим «ветром» через единичную поперечную площадку, можно узнать скорость «ветра», а значит, и скорость нашего движения относительно газа. При движении же в эйнштейновской среде никакого «встречного ветра» не возникает; выходит, что среда покоится относительно нас, а мы покоимся относительно среды, как бы мы ни перемещались в пространстве с любыми скоростями в любых направлениях. Это, конечно, совсем особенное, удивительное свойство среды; но как раз этим свойством и должен обладать вакуум — ведь в пустоте никакого «ветра» никогда, естественно, не возникает. Можно сказать, что эйнштейновская среда обладает механическими свойствами вакуу-

*) Разумеется, в масштабах Солнечной системы, отдельных звезд и галактик все оставалось «по-старому» и никакой компенсации тяготения этих тел не было; скомпенсированным должно было быть лишь поле тяготения космологического масштаба, создаваемое общим однородным, в среднем, распределением вещества.

ума, т. е. такими его свойствами, которые проявляются в отношении движений тел (на это обратил внимание Э. Б. Глинер).

Это свойство эйнштейновского вакуума описывается определенным соотношением между его плотностью массы ρ_v , или плотностью энергии $\epsilon_v = \rho_v c^2$ и давлением p_v , которое тоже должно быть приписано этой среде: $\epsilon_v = -p_v$. Ни одна «нормальная» среда не имеет давления, которое было бы противоположно по знаку ее плотности энергии и равнялось бы ей по модулю. Но именно при такой и только такой связи между давлением и плотностью среда не создает «встречного ветра», как бы мы ни перемещались в ней.

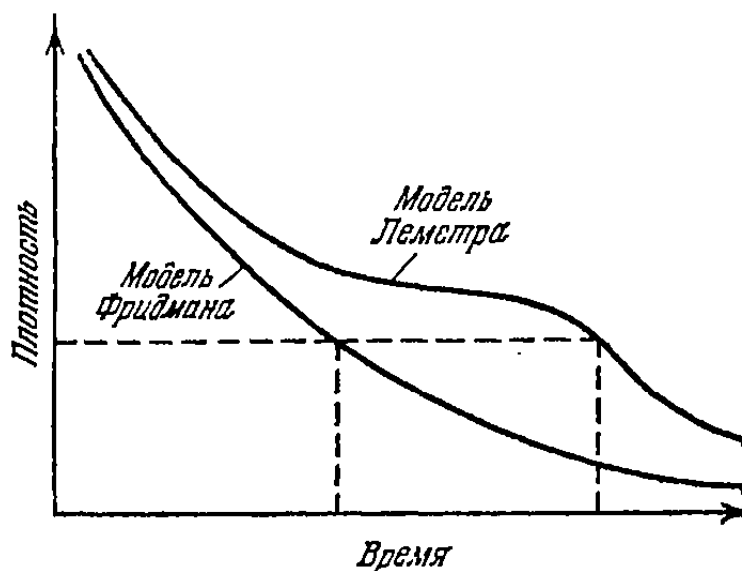
Другое не менее удивительное свойство антигравитирующей среды (связанное с указанным соотношением между ее плотностью и давлением) — это ее полная однородность в пространстве и неизменность во времени. Плотность и давление эйнштейновского вакуума всюду одинаковы и не меняются с течением времени. Этим свойством антигравитирующая среда обладала в статической, идеально симметричной космологической картине Эйнштейна. Она сохраняет его и в теории расширяющейся Вселенной: плотность и давление «нормального» вещества убывает при расширении, а с вакуумом при этом ничего не происходит.

Плотность вакуума не меняется со временем, и это означает, что, по существу, речь идет о новой мировой постоянной. Ее величина должна быть определена путем астрономических наблюдений, и если она действительно окажется отличной от нуля, то тем самым и будет решен вопрос о существовании в природе столь необычной среды, равномерно разлитой по всей Вселенной. Такие наблюдения — дело будущего; сейчас же можно лишь утверждать, что плотность ρ_v , вероятнее всего, не может сильно превосходить современную плотность вещества во Вселенной; в правдоподобной модели, о которой мы скажем ниже, фигурирует $\rho_v \leq 10^{-28}$ г/см³. (Напомним, что плотность, связанная с нейтрино, составляет приблизительно 10^{-29} г/см³.)

Нужно отметить все же, что указанная здесь величина — это по своему смыслу только верхний предел плотности вакуума: вакуум не может иметь плотность, превышающую указанную величину, но этим, очевидно, не исключается еще, что его плотность может и просто разниться нулю.

Вечность и неизменность эйнштейновского вакуума всегда вызывали определенное недоумение. Что это за среда, которая влияет на другие среды, создает силы, управляющие движением тел, а сама никаким влияниям, никаким противодействиям не подвержена? Это действительно странное обстоятельство, которому до сих пор нет объяснения. Может быть, что-то удастся выяснить в будущем, когда будет установлена природа эйнштейновского

Рис. 53. Зависимость между плотностью мира и его возрастом в «стандартной» модели Фрийдмана и в модели Леметра.



вакуума, когда она будет понята и осознана на основании общих представлений о физике микромира.

Как мы уже говорили, антигравитирующий вакуум сам по себе совместим с расширением Вселенной. Поэтому возможны соответствующие обобщения «стандартных» космологических моделей Фрийдмана. Они имелись, собственно, уже и у самого Фрийдмана в его классических работах 1922—24 гг. Подробный анализ таких моделей провел позднее Ж. Леметр, внесший в 30-е годы значительный вклад в исследование связи между космологическими моделями и реальными астрономическими наблюдениями.

Возвращаясь к проблемам, которые возникли в космологии в связи с открытием массы покоя нейтрино, обратим внимание на то, что в моделях с антигравитирующим вакуумом изменяется связь между плотностью мира и его возрастом. Вместо однозначной зависимости между этими величинами, которая имеется в «стандартных» моделях Фрийдмана, здесь появляется новый «свободный параметр» — плотность вакуума. И в принципе этот параметр можно выбрать таким, что возраст мира будет достаточно велик. Рис. 53 иллюстрирует эту возможность: в обобщенной модели определенного типа — ее называют

моделью Леметра — заданной плотности (горизонтальная прерывистая линия) может отвечать возраст Вселенной, заметно больший, чем в модели Фридмана без вакуума. В этом случае плотность эйнштейновского вакуума сравнима с плотностью вещества, т. е. фактически нейтрально: $\rho_v \simeq (10^{-29} \div 10^{-28}) \text{ г/см}^3$.

Интересно, что в космологических моделях с эйнштейновским вакуумом связь между геометрией мира и его динамикой не столь однозначна, как в «стандартной» модели Фридмана, где открытому пространству соответствует бесконечное по времени расширение, а закрытому — смена расширения сжатием. В модели Леметра объем мира конечен, Вселенная замкнута, но ее расширение продолжается неограниченно во времени.

Такая модель Вселенной находится, кажется, в согласии со всей совокупностью астрономических сведений и экспериментальных фактов физики.

И все же это еще отнюдь не окончательный ответ на вопрос о конечности и бесконечности мира, который издавна занимает воображение людей. Как писал в 1743 г. Ломоносов,

Сомнений полон ваш ответ
О том, что окрест ближних мест.
Скажите ж, коль пространен свет?
И что малейших дале звезд?

В этой книге мы стремились познакомить читателя с самыми важными и самыми интересными фактами и идеями новой области астрофизики — космогонии галактик и звезд. Галактики стали предметом космогонических исследований с 20-х годов нашего века, когда была надежно установлена их действительная природа и оказалось, что это не туманности, т. е. не малые облака газа и пыли, находящиеся неподалеку от нас, а огромные звездные миры, лежащие вне нашей звездной системы на очень больших расстояниях от Млечного Пути. В названиях некоторых галактик до сих пор сохранились следы распространенных некогда представлений и взглядов, так что, например, ближайшую к нам гигантскую спиральную галактику и сейчас еще называют Туманностью Андромеды. Развитие последовательной картины возникновения и эволюции звезд тоже стало возможным лишь в последние полвека благодаря успехам наблюдательной астрономии и разработке физической теории, позволившей понять природу светимости звезд. Открытия и исследования в области космологии прояснили в последние десятилетия многое из того, что касается предыстории галактик и звезд, физического состояния разреженного вещества, из которого они формировались в очень отдаленные времена.

Читатель мог заметить, что в основе всей современной космологии лежит одна фундаментальная идея — восходящая к Ньютону идея гравитационной неустойчивости. Вещество не может оставаться однородно рассеянным в пространстве, ибо взаимное притяжение всех частиц вещества стремится создать в нем сгущения тех или иных масштабов и масс. В ранней Вселенной гравитационная неустойчивость усиливала первоначальные очень слабые нерегулярности в распределении и движении вещества и в определенную эпоху привела к возникновению сильных неоднородностей: «блинов» — протоскоплений. Границами этих слоев уплотнения служили ударные волны, на фрон-

тах которых первоначально невращательное, безвихревое движение вещества приобретало завихренность. Распад слоев на отдельные сгущения тоже происходил, по-видимому, из-за гравитационной неустойчивости, и это дало начало протогалактикам. Многие из них оказывались быстро вращающимися благодаря завихренному состоянию вещества, из которого они формировались. Фрагментация протогалактических облаков в результате их гравитационной неустойчивости вела к возникновению первых звезд, и облака превращались в звездные системы — галактики. Те из них, которые обладали быстрым вращением, приобретали из-за этого двухкомпонентную структуру — в них формировались гало более или менее сферической формы и диск, в котором возникали спиральные рукава, где и до сих пор продолжается рождение звезд. Протогалактики, у которых вращение было медленнее или вовсе отсутствовало, превращались в эллиптические или неправильные галактики. Параллельно с этим процессом происходило формирование крупномасштабной структуры Вселенной — возникали сверхскопления галактик, которые, соединяясь своими краями, образовали подобие ячеек или пчелиных сот; их удалось распознать в последние годы.

Такова в самых общих чертах картина космогонического процесса во Вселенной, которой посвящена эта книга, и нам остается лишь рассказать об одном частном, единичном случае возникновения звезды, вполне обычной и даже заурядной среди миллиардов звезд нашей Галактики, но самой важной для нас. Расскажем в заключение о возникновении Солнца и Солнечной системы.

Солнечная система стала в последние годы предметом прямых экспериментальных, а не только наблюдательных исследований. Полеты межпланетных космических станций, орбитальных лабораторий, экспедиции на Луну принесли множество новых конкретных знаний о Земле, околоземном пространстве, планетах, Солнце. Тем самым создается совершенно новая основа для развития космогонии Солнечной системы.

Происхождение Солнечной системы было исторически первой проблемой космогонии, сформулированной как проблема естественных наук. В 1644 г. Декарт выдвинул концепцию протосолнечной туманности — вращающегося, завихренного облака газа и пыли, в центре которого формировалось Солнце, а на периферии — планеты с их спутниками. Столетием позже Кант, а затем Лаплас,

развивая эту идею, исследовали динамику вращающегося облака на основе механики Ньютона. Сжимаясь под действием собственного тяготения, облако вращалось все быстрее, происходило его сплющивание в диск, и на определенном этапе из-за возросших центробежных сил от края диска последовательно отделялись быстро вращающиеся кольца. В дальнейшем материал отдельных колец должен был конденсироваться и из него образовались планеты — каждая на своей орбите. В такой картине получалось наглядное объяснение важнейшее свойство Солнечной системы — то, что ее планеты движутся по (почти) круговым орбитам, орбиты лежат в одной плоскости и планеты вращаются по орбитам в одну сторону — в ту, в которую вращается вокруг своей оси и само Солнце.

Гораздо труднее было объяснить другие закономерности в Солнечной системе и в первую очередь распределение вращательного момента между Солнцем и планетами. На планеты приходится масса, составляющая всего $1/700$ долю массы Солнца; вращательный же момент, связанный с их орбитальным движением*), составляет 98% всего момента вращения Солнечной системы. На собственное вращение Солнца вокруг своей оси остается только 2% от общего момента системы. Другими словами, вращение оказалось почему-то крайне неравномерно распределенным по массе системы от ее центра наружу: подавляющая часть массы находится в самом центре, а подавляющая часть момента — снаружи.

Замечательным является то обстоятельство, что Юпитер обладает вращательным моментом, превосходящим момент Солнца более чем в тридцать раз. (Масса Юпитера $2 \cdot 10^{30}$ г, радиус его орбиты $7,8 \cdot 10^{18}$ см, орбитальная скорость $1,3 \cdot 10^6$ см/с; оценка момента вращения получается перемножением этих трех величин.) Момент Сатурна составляет менее половины момента Юпитера, а момент всех остальных планет вместе — менее четверти момента Юпитера.

Такое распределение момента никак не может получиться при последовательном отделении экваториальных колец от вращающегося облака. Проблема момента оставалась не решенной и в ряде других космогонических

*) Доля момента, связанная с собственным вращением планет вокруг своих осей, пренебрежимо мала по сравнению с моментом их орбитального движения.

моделей, выдвигавшихся в прошлом и обсуждаемых в той или иной форме и в настоящее время. В 1745 г. Бюффон предположил, что вещество планет было вырвано из Солнца пролетающим около него небесным телом (например, кометой). Джинс в начале нашего века, а за ним и другие космогонисты, вплоть до 40-х годов считали, что вещество планет могло быть вырвано из Солнца (которое могло бы к этому времени вполне сформироваться) из-за близкого прохождения одной из соседних звезд. Предполагалось, что сила тяготения пролетающей звезды создавала струю вещества, истекавшего из Солнца. Вещество струи оставалось тем не менее гравитационно связанным с Солнцем и после удаления звезды из него и формировались планеты.

В реальных условиях тесное сближение звезд, сопровождающееся истечением вещества, представляет собою крайне маловероятное событие. Конечно, ничего не зная о распространенности планетных систем, не видя вообще никакой другой системы, кроме нашей, мы не можем исключить возможность единичного события такого рода. Но с теоретической точки зрения предположение об очень близком прохождении звезд выглядит слишком искусственным. Существенно также, что условия для конденсации планет в выброшенной из Солнца струе, по-видимому, неблагоприятны, и ее вещество должно скорее рассеяться, чем собраться в сгустки.

В сороковые годы О. Ю. Шмидт, а затем и шведский физик Х. Альвен исследовали возможность захвата протопланетного материала при прохождении Солнца через газо-пылевые облака, которые могли встречаться на его пути в диске Галактики. Трудностей с конденсацией и моментом вращения не удастся, кажется, избежать и в этой картине.

Широкий спектр мнений и идей содержится в сборнике «Происхождение Солнечной системы», вышедшем в 1976 г. под редакцией Г. Ривса. Исходным пунктом многих современных космогонических схем остается представление о едином исходном вращающемся газо-пылевом облаке, из которого формировались Солнце и планеты. В этой картине, восходящей к классической гипотезе Декарта — Канта — Лапласа, могут, вероятно, найти решение такие вопросы космогонии, как вопрос о химическом составе Солнца и планет и вопрос о конденсации вещества в протопланетном облаке; привлечение новых идей позволяет надеяться и на решение ключевой проблемы — проблемы момента,

В современных исследованиях по космогонии Солнечной системы исходят из того, что материалом протопланетного облака была межзвездная среда, химический состав которой мало отличался от состава современной межзвездной среды. Тяжелые элементы, на которые приходится приблизительно два процента (по массе), были сосредоточены главным образом в пылинках; водорода имелось 70—75%, а гелия — около 28—23%. При сжатии облака под действием собственной силы тяжести его вращение ускорялось, и рано или поздно центробежная сила стала мешать сжатию поперек оси вращения. Сжатие же вдоль оси вращения продолжалось, причем пылинки — эти малые плотные тела — оседали к средней, экваториальной плоскости облака быстрее, чем водородно-гелиевый газ. В средней плоскости облака пылинки накапливались и потому там довольно часто должны были происходить их столкновения друг с другом, при которых частицы могли слипаться в более крупные твердые тела. В результате возникал довольно плоский диск, состоявший главным образом из таких тел, а также и отдельных пылинок.

Вероятно, вместе с формированием диска происходил и другой процесс — в центре облака возникало плотное газовое сгущение, которое превратилось затем в звезду, и в ее недрах зажглись термоядерные реакции. Солнце стало тогда нагревать окружающее его вещество, и из-за этого водород и гелий постепенно улетучивались из близкой к Солнцу области, уходили в наружную часть облака. Химический состав протопланетного облака стал неоднородным: оно разделилось на область, близкую к Солнцу, где преобладали тяжелые элементы, собранные в пылинки и образованные из них твердые тела, и периферию, где химический состав остался почти прежним.

Вот почему планеты, которые формировались из материала протопланетного облака, оказались столь различными по своему физическому состоянию и химическому составу. Во внешней области, на периферии Солнечной системы, возникали газообразные шары — планеты, состоящие главным образом из водорода и гелия — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Во внутренней области возникали твердые планеты, в веществе которых преобладают элементы, более тяжелые, чем водород и гелий. Там, где формировалась Земля, летучие вещества, и в первую очередь водород и гелий, испарились почти полностью, и потому Земля, и также Марс, Венера, Меркурий оказались твердыми,

В работах Л. Э. Гуревича, А. И. Лебединского, Б. Ю. Левина, В. С. Сафронова построена подробная картина фрагментации протопланетного облака в различных его слоях. Оказалось, что в этом процессе возникали не непосредственно планеты, а сначала более мелкие сгустки, которые получили название планетезималей. Постепенное слияние этих сгустков, объединение планетезималей в планеты представляло собой финальную стадию формирования Солнечной системы.

Однако остается вопрос: как же все-таки возникло наблюдаемое распределение вращательного момента в Солнечной системе? Интересная идея на этот счет высказана недавно Э. М. Дробышевским. Исходным пунктом его гипотезы служит довольно неожиданный результат численного моделирования эволюции вращающегося гравитирующего облака. Такое численное исследование, проведенное Р. Ларсоном, показало, что по мере сжатия и ускорения вращения облако превращается не в гладкий плоский диск, а во вращающийся бублик — тор. Но вращающийся тор без центральной массы — абсолютно неустойчивая конфигурация (это доказано В. А. Антоновым). Она должна распасться на отдельные сгустки, вращающиеся вокруг их общего центра масс.

Э. М. Дробышевский полагает, что вероятнее всего образуются два довольно крупных сгустка и множество других, менее массивных. Один из крупных сгустков превращается со временем в Солнце, а другой в самую массивную планету Солнечной системы — Юпитер. Но до этого между сгустками происходит сложное взаимодействие, сопровождающееся перетеканием вещества с одного из них на другой (как, например, в тесной двойной системе барстера). Вещество перетекает в виде струи с будущего Юпитера к будущему Солнцу. При этом вокруг протосолнечного сгустка образуется аккреционный диск, вращение которого может оказаться противоположным осевому вращению самого этого сгустка. Когда материал диска оседает на поверхность сгустка, он замедляет осевое вращение. По этой причине вращение Солнца оказывается медленным, а его вращательный момент соответственно малым.

Количественные оценки остаются, правда, не слишком определенными, и потребуется еще, по-видимому, немало усилий, прежде чем проблему вращательного момента Солнечной системы можно будет считать решенной.

Многое должны прояснить еще астрономические наблюдения, связанные с поисками других планетных систем.

Ведь до сих пор нет еще наблюдательного ответа на принципиальный вопрос: представляет ли собой Солнечная система обычное или исключительное явление? Известно лишь, что у одной из ближайших к Солнцу звезд — так называемой летящей звезды Барнарда — обнаружен невидимый спутник.

Этот спутник не может быть звездой (для этого его масса слишком мала) и представляет собой именно планету. У более отдаленных звезд спутники столь малой массы при современных возможностях наблюдений еще не могут быть обнаружены. Звезда Барнарда находится от нас на расстоянии 1,8 пс, и то обстоятельство, что у единственной близкой звезды, для которой это оказалось возможным, обнаружен планетоподобный спутник, делает вероятным предположение, что их наличие может быть обычным для звезд определенных типов.

Вернемся, однако, к Солнечной системе и завершим рассказ историей нашей планеты — Земли. Планетезимали, из которых она формировалась, сталкивались и оттого слипались, разогревались и могли расплавляться. Возможно, именно так возникло горячее расплавленное ядро Земли. Земля и в современном состоянии имеет расплавленное ядро, разогрев которого создается сейчас благодаря радиоактивному распаду тяжелых атомных ядер. Ядро Земли состоит главным образом из железа (с примесью никеля), а водород, кремний, магний и их соединения всплыли в свое время из горячего расплава к поверхности и, остыв, образовали затем окружающую ядро твердую мантию. Из кремниевых пород, имеющих меньшую плотность, возникли континенты. А наиболее легкие элементы и их химические соединения образовали океаны и атмосферу Земли.

Атмосфера и океаны послужили средой, в которой зарождалась жизнь на Земле. В смеси газов атмосферы могли образовываться сложные органические молекулы; этому способствовало ультрафиолетовое излучение Солнца, а, может быть, и мощные грозы, которые, как полагают, бушевали тогда в атмосфере. Вероятно, таким путем возникали многие аминокислотные и другие органические соединения. Попадая с дождями в океан, они были способны создавать там более сложные, длинные цепочки молекул — белки и нуклеиновые кислоты, из которых постепенно формировались первые живые клетки, развивались простейшие формы растительности, такие, как водоросли. Позднее растения появились и на суше.

Постепенные изменения происходили тем временем и в атмосфере. Ее первоначальный состав сильно отличался от современного: имелось много водорода и гелия, водородосодержащих газов — аммиака, метана, водяного пара. Водород и гелий, самые легкие из элементов, улетучивались со временем, в атмосфере появился кислород — главным образом благодаря растениям, вырабатывающим его в процессе протекающего в них фотосинтеза. «Выдыхая» кислород, растения создавали благоприятные условия для зарождения животного мира нашей планеты.

Могла ли эволюция такого рода, приводящая к возникновению жизни, а затем и разума, протекать и на других планетах, в других звездных системах? Кажется, нет никаких оснований отрицать такую возможность. Мнение, что разумная жизнь существует не только на Земле, считавшееся несколько столетий назад еретическим, стало сейчас почти что общеприятным. Его придерживаются не только энтузиасты «летающих тарелок», но и ученые, тщательно анализирующие в последние годы возможности целенаправленных поисков внеземных цивилизаций. Вместе с тем никакими достоверными данными о конкретных примерах хотя бы самых простых форм жизни где-либо кроме Земли мы сейчас не располагаем.

Читатель, вероятно, согласится с тем, что каждая из двух возможностей — множественность обитаемых миров и уникальность разума на Земле — сама по себе в высшей степени увлекательна и способна волновать воображение...

- Агекян Т. А. Звезды, галактики, Метагалактика.— 3-е изд.— М.: Наука, 1981.
- Бок Б., Бок П. Млечный Путь.— М.: Мир, 1978.
- Вайнберг С. Первые три минуты.— М.: Энергоиздат, 1981.
- Воронцов-Вельяминов Б. А. Очерки о Вселенной.— 8-е изд.— М.: Наука, 1980.
- Гинзбург В. Л. Космические лучи у Земли и во Вселенной.— М.: Наука, 1967.
- Гинзбург В. Л. Современная астрофизика.— М.: Наука, 1970.
- Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. Общая теория относительности в физической картине мира.— М.: Знание, 1970.
- Дибай Э. А. Нестационарные явления в галактиках.— М.: Знание, 1977.
- Долгов А. Д., Зельдович Я. Б. Космология и элементарные частицы.— Успехи физических наук, 1980, т. 130, № 4, с. 559.
- Ефремов Ю. Н. В глубины Вселенной.— 2-е изд.— М.: Наука, 1977.
- Ефремов Ю. Н. Звездные скопления.— М.: Знание, 1980.
- Засов А. В. Галактики.— М.: Знание, 1976.
- Зельдович Я. Б. Тяготение, заряды, космология и когерентность.— Успехи физических наук, 1977, т. 123, № 3, с. 392.
- Зельдович Я. Б. Теория вакуума, быть может, решает загадку космологии.— Успехи физических наук, 1981, т. 133, № 3, с. 479.
- Каплан С. А. Физика звезд.— 3-е изд.— М.: Наука, 1977.
- Компанеев А. С. Законы физической статистики. Ударные волны. Сверхплотное вещество.— М.: Наука, 1976.
- Крамаровский Я. М., Чечев В. П. Радиоактивность и эволюция Вселенной.— М.: Наука, 1978.
- Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной.— М.: Знание, 1976.
- Новиков И. Д. Эволюция Вселенной.— 2-е изд.— М.: Наука, 1983.
- Происхождение Солнечной системы / Под ред. Г. Ривса.— М.: Мир, 1976.
- Тейлер Р. Дж. Строение и эволюция звезд.— М.: Мир, 1973.
- Тейлер Р. Дж. Происхождение химических элементов.— М.: Мир, 1975.
- Хойл Ф. Галактики, ядра и квазары.— М.: Мир, 1968.
- Шкловский И. С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть.— 2-е изд.— М.: Наука, 1977.
- Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум.— 5-е изд.— М.: Наука, 1980.
- Шкловский И. С. Проблемы современной астрофизики.— М.: Наука, 1982.

*Лев Эммануилович Гуревич,
Артур Давидович Чернин*

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГАЛАКТИК И ЗВЕЗД

Редактор *Г. С. Куликов*
Техн. редактор *Е. В. Морозова*
Корректор *Е. В. Сидоркина*

ИБ № 12018

Сдано в набор 22.02.83. Подписано к печати 21.06.83. Т-14256.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2.
Обыкновенная гарнитура. Высокая печать.
Условн. печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 10,68.
Тираж 100 000 экз. Заказ № 2621. Цена 30 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

30 коп.

