

ЗВЕЗДНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

«Число звезд, которые видны без помощи телескопа, весьма незначительно. Г-н Аргеландер в своей «Уранометрии» дает список 3256 звезд, видимых невооруженным глазом, от Северного полюса до 36° Южного склонения, т. е. немного менее, чем на восьми десятых небесного свода. Для других двух десятых в окрестностях Южного небесного полюса нужно прибавить 844 звезды. Мы будем иметь тогда на всем небесном своде 4100 звезд, видимых человеком со средним зрением. Это число увеличивается почти до 6000 для лиц, наделенных острым зрением.

Поэтому мы видим в хорошую ночь, вне сумерек и без лунного света, в каждое мгновение на видимой половине неба не более чем от 2000 до 3000 звезд», — так писал В. Я. Струве, основатель Пулковской обсерватории, в «Этюдах звездной астрономии» (1847 г.). И далее: «Те же, которые не знают их действительного счета, оценивают число звезд гораздо выше. Это частично объясняется неправильным распределением звезд и отсутствием границ на небе; частично же — действием, которое производит вид неба на воображение».

Это впечатление бесчисленности звезд — «открылась бездна, звезд полна, звездам числа нет...» — точно передал М. В. Ломоносов в знаменитом стихотворении.

Все видимые глазом звезды принадлежат Галактике — гигантской звездной системе, насчитывающей в общей сложности несколько сотен миллиардов звезд. Среди этих звезд и наше Солнце, обычная звезда, каких в Галактике большинство.

Солнце и Галактика

Солнце — горячий газовый шар массой $2 \cdot 10^{30}$ кг и радиусом $7 \cdot 10^8$ м. Его вещество состоит главным образом из самых легких элементов: водорода при-

близительно 71% (по массе); гелия около 27%; на все остальные элементы приходится не более 2%.

Масса Солнца служит в астрономии удобной единицей измерения; в солнечных массах выражают массы других звезд, массы звездных систем. Массу Солнца обычно обозначают как M_{\odot} . Кругом с точкой посередине, которым отмечают физические характеристики Солнца, давно вошел в астрономию; он встречается как знак Солнца еще в древнеегипетских надписях. Масса всех звезд Галактики оценивается величиной в сто миллиардов солнечных масс, или $\sim 10^{11} M_{\odot}$.

Конечно, это лишь приближенное число, указывающее на самом деле только порядок величины, т. е. степень десятки в этом большом числе. (Знак \sim служит для равенств по порядку величины.) Точное же значение массы, которое содержало бы еще и соответствующий числовой множитель, остается пока не вполне определенным. Измерение массы Галактики — трудная астрономическая задача. К тому же, кроме звезд, Галактика содержит очень значительные по величине «скрытые массы», которые не излучают света и проявляют себя только тяготением. Что это — потухшие звезды или, может быть, газ мельчайших элементарных частиц нейтрино? К этому вопросу мы специально обратимся в гл. 5. Сейчас же дадим общую схему строения нашей звездной системы, основанную на данных многочисленных наблюдений, производимых со времен Галилея и до наших дней.

В строении Галактики различают три главных структурных элемента — диск, сферическую составляющую, или гало, и корону (рис. 1). У диска имеется центральное утолщение, или балдж, с размерами 6—10 кпк (килопарсек *)), диаметр диска — 30 кпк. Солнце находится в диске, вблизи его центральной плоскости, на расстоянии около двух третей радиуса от центра. Видимый изнутри диск Галактики представляется нам на небе светящейся полосой Млечного Пути (**). Молодые и яркие звезды Галактики вместе с диффузным веществом — облаками газа и космической пыли — сосредоточены главным образом в ее диске. Химический состав звезд и облаков диска Галактики близок к составу Солнца.

*) 1 пк (парсек) = $3,086 \cdot 10^{16}$ м.

***) Кстати, слово «галактика» образовано из новогреческого «галактос», что значит «млечный».

Сферическая составляющая (гало) представляет собою не строго сферический, а скорее слегка сплюснутый эллипсоидальный объем с большой полуосью, близкой к радиусу диска, и малой полуосью, которая составляет приблизительно три четверти от большой. Гало населяют преимущественно старые и слабые по блеску звезды; они состоят из вещества, в котором тяжелых элементов еще

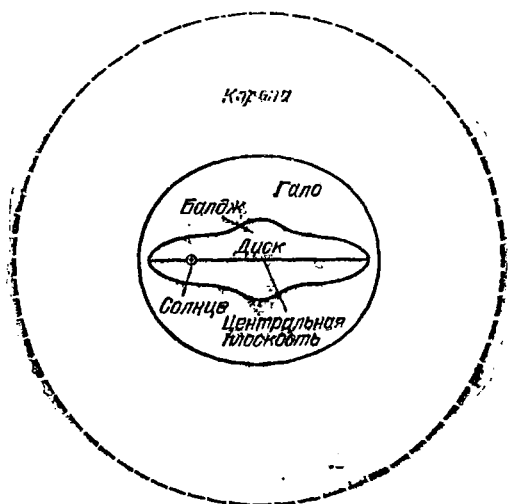


Рис. 1. Три главных элемента строения Галактики. Пространственные масштабы не выдержаны.

меньше, чем в Солнце. Газ и пыль в гало практически отсутствуют. Плотность звезд гало нарастает к центру Галактики. Массы диска и гало приблизительно равны.

Диск и окружающее его гало погружены в очень разреженную корону, которая служит третьим главным элементом структуры Галактики; она-то и состоит из «скрытых масс». По данным Я. Эйнасто и его коллег в Тартуской обсерватории, радиус короны в 5 или даже 10 раз больше радиуса галактического диска. Масса короны в 5–10 раз больше суммарной массы звезд Галактики — вот почему «скрытые массы» так привлекают сейчас астрономов и физиков.

Туманности

Кроме звезд и Млечного Пути, глаз различает на небе слабые по блеску, размытые пятнышки, которые астрономы XVII века называли туманностями. Предполагалось, что это небольшие облака газа и пыли, находящиеся неподалеку от нас. Многие из них оказались в действительности огромными звездными системами, подобными нашей Галактике, лежащими на очень больших расстояниях от Млечного Пути.



Рис. 2. Схема спиральных рукавов в диске Галактики.

Об этом астрономы подозревали еще в XVIII и XIX веках, такую точку зрения разделял и В. Я. Струве; но надежное подтверждение стало возможным лишь в 20-е годы нашего столетия, когда вошли в строй первые крупные телескопы. Далекие туманности — звездные системы стали называть галактиками*).

Американский астроном Э. Хаббл — один из первых исследователей галактик — нашел, что они не во всем похожи друг на друга и распадаются на три главных класса — спиральные галактики, эллиптические и неправильные.

Наша Галактика принадлежит к классу спиральных. Самые молодые и яркие звезды очерчивают в ее диске широкие дуги, которые отходят от галактического центра подобно ветвям спирали (рис. 2). В спиральных ветвях находится небольшая доля звезд, но зато они ярче всех, и потому в удаленных галактиках этого класса часто виден только их спиральный узор (рис. 3). Самая близкая к нам гигантская спиральная галактика — знаменитая Туманность Андромеды. Как и наша Галактика, она содержит диск, сферическую составляющую и корону из невидимых масс. Суммарная масса всех звезд Андромеды вдвое больше массы звезд нашей Галактики; массивнее, вероятно, и ее корона.

Характерная черта спиральных галактик — быстрое вращение их дисков. В районе Солнца диск нашей Галактики

*) В отличие от остальных галактик нашу Галактику мы будем писать с заглавной буквы.

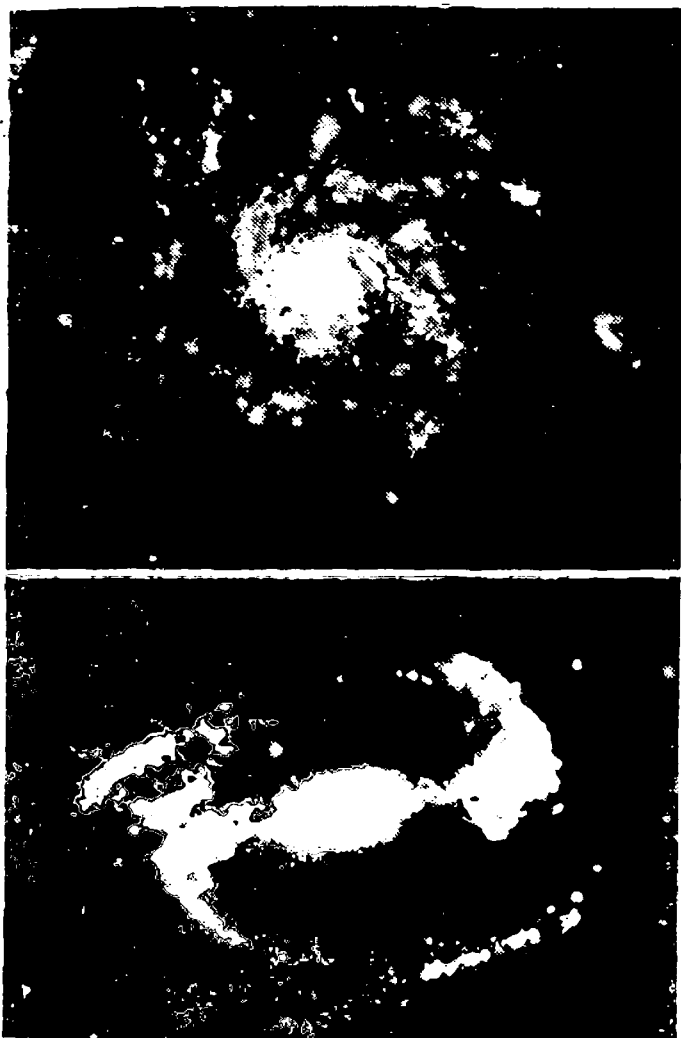


Рис. 3. Две спиральные галактики.

тики вращается вокруг ее центра со скоростью 220—250 км/с.

Галактики, лишенные спирального узора, обычно не имеют и дисковой составляющей. Их сферическая составляющая (всегда в той или иной степени сплюснутая) представляется на астрономических фотографиях эллип-



Рис. 4. Эллиптическая галактика.

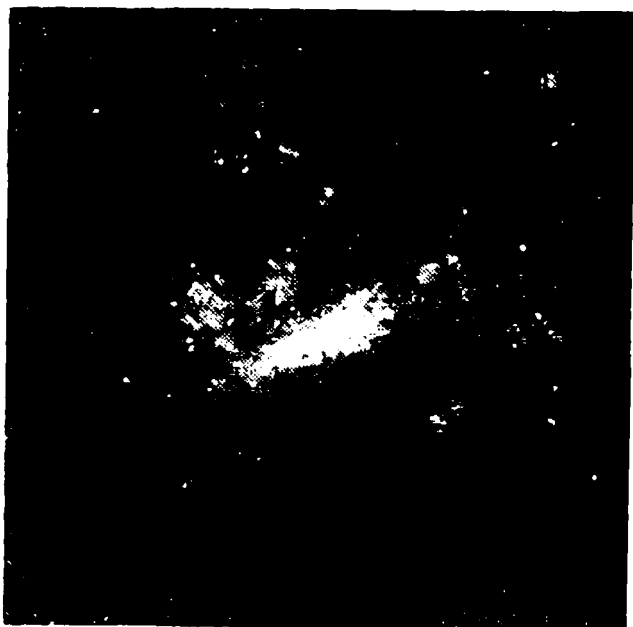


Рис. 5. Неправильная галактика.

сом (рис. 4); поэтому такие галактики называют эллиптическими. Их звезды подобны звездам гало Галактики. У самых крупных эллиптических галактик общая масса звезд в 10 раз больше, чем у нашей Галактики. Имеют они и невидимые короны большой массы.

Встречаются бесструктурные на вид звездные системы, называемые неправильными галактиками. Они выглядят ключковатыми облаками молодых ярких звезд и диффузного вещества (рис. 5). Иногда оказывается, что у них имеется сферическая составляющая, содержащая, как и в других случаях, старые неяркие звезды. Массы неправильных галактик обычно невелики — $(10^6-10^9)M_{\odot}$. У них не замечено коронок; короны не наблюдаются и у галактик двух других классов, если их массы тоже невелики.

Кроме галактик, принадлежащих к Хаббловским классам, сейчас находят и совсем особые звездные системы, напоминающие плотные центральные области спиральных и эллиптических галактик, только их ядра еще плотнее и массивнее и проявляют к тому же бурную активность — у них видны светящиеся выбросы и струи вещества, наблюдается мощное радиоизлучение и т. п. Самыми активными и необычайно мощными ядрами обладают квазары. Об этих явлениях мы говорим в гл. 6.

Метагалактика

Почти все галактики собраны в разного рода группы и скопления, насчитывающие от 3—4 единиц до нескольких тысяч членов. Наша Галактика вместе с Туманностью Андромеды и тремя десятками других менее крупных галактик образует Местную группу галактик. Эта группа в свою очередь входит в крупное скопление галактик с центром в направлении на созвездие Девы. В центре скопления находится очень массивная эллиптическая галактика, обозначаемая как Дева А, и само это скопление, насчитывающее в своем составе около тысячи галактик, называется скоплением в Деве. Скопление в Деве служит ядром еще более крупного образования, называемого Местным сверхскоплением. Кроме скопления в Деве в него входит еще несколько скоплений и групп галактик. Местное сверхскопление — это уплощенная система с продольным наибольшим размером до 10^{23} м и поперечным размером, приблизительно в 5 раз меньшим.

Сейчас находят и другие сверхскопления, подобные Местному сверхскоплению. Вместе они образуют нечто вроде сетчатой структуры. Протяженные сверхскопления соединяются и пересекаются; они служат «стенками» ячеек, внутри которых галактики почти полностью отсутствуют. Имеется несколько хорошо различимых примеров таких ячеек,

Общая картина распределения галактик и скоплений на небе показана на рис. 6; это как бы снимок Вселенной «с птичьего полета». Вся видимая область Вселенной называется Метагалактикой. В ней наблюдается сложная иерархия астрономических структур — от Солнечной системы, Галактики и галактик до сверхскоплений и ячеек.

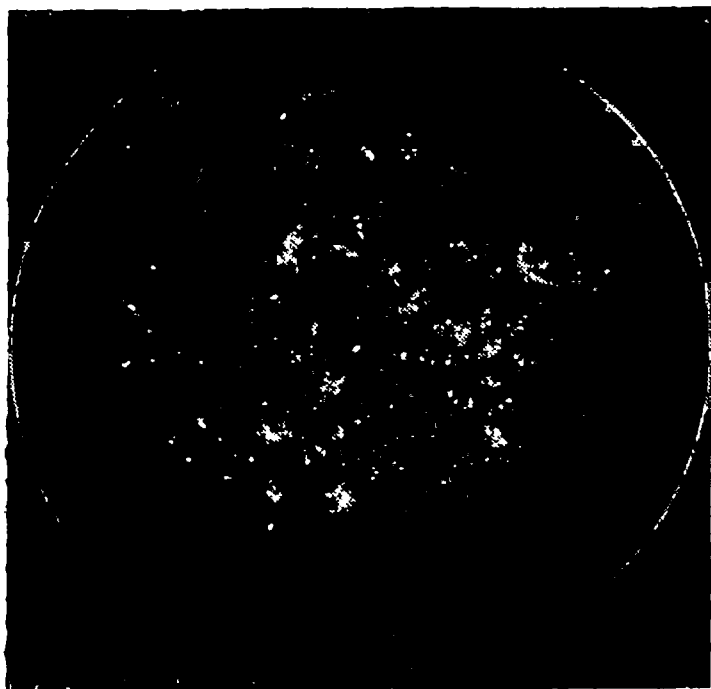


Рис. 6. Распределение галактик во Вселенной (по Дж. Пибблсу).
Каждая светлая точка — это целая галактика.

Но систем более крупных, чем ячейки, в Метагалактике нет — на них космическая иерархия обрывается. Это означает, что Вселенная, рассматриваемая в больших масштабах, — а дальность действия современных телескопов достигает $3 \cdot 10^{25}$ м — уже бесструктурна. Можно сказать, что наблюдаемая Вселенная в целом однородна по распределению в ней вещества: если подсчитать число галактик в любом объеме пространства с размером $3 \cdot 10^{24}$ м и больше, то окажется, что это число одинаково во всех таких объемах, где бы во Вселенной они ни находились.

Одинаковой оказывается и средняя плотность вещества во всех таких объемах. Плотность получается из подсчета полной массы всех галактик в каждом объеме; если разделить эту массу на объем, то получим плотность, приблизительно равную 10^{-27} кг/м³, которая характеризует только видимое, светящееся вещество галактик. Если же учесть еще и невидимые короны галактик, то плотность может оказаться приблизительно в 10 раз больше. Величина 10^{-26} кг/м³ — это средняя плотность Вселенной.

История Вселенной

Мы обрисовали в общих чертах современную астрономическую картину мира. Теперь нужно ответить на вопрос, всегда ли Вселенная была такой, как сейчас, или ее строение прежде было иным, а современное состояние возникло в результате каких-то процессов эволюции и развития.

Первая попытка ответить на этот вопрос была принята А. Эйнштейном в 1917 г., когда он применил только что созданную им общую теорию относительности к Вселенной как целому, т. е. к Вселенной, рассматриваемой как единое физическое тело или единая физическая система. Конечно, во все времена не было недостатка в рассуждениях о том, какова должна быть Вселенная. Но научный, физический подход к космологии — науке о Вселенной в целом — стал возможен лишь на основе общей теории относительности. Физика, существовавшая ранее, была для этого непригодна, да она и не предназначалась для столь грандиозного предмета, как вся Вселенная.

Прежде всего Эйнштейн стремился проверить одно из давних, традиционных представлений о мире — представление о том, что Вселенная вечна и неизменна. В ней постоянно происходят те или иные локальные, местные и частные перемены, но как целое она остается стационарной, одной и той же во все времена. К такой картине, судя по всему, склонялся и сам Эйнштейн. Оказалось, однако, что общая теория относительности этой возможности не допускает. В поисках выхода из положения Эйнштейн допускал и видоизменения основных уравнений самой исходной теории...

К концу 20-х годов космологическая проблема была решена. Сначала А. А. Фридман, петроградский математик и гидромеханик, показал в 1922—1924 гг., что общая

теория относительности указывает на неизбежность эволюционирующей Вселенной — либо расширяющейся как целое, либо сжимающейся. Затем Э. Хаббл в своих наблюдениях галактик доказал в 1929 г., что Вселенная действительно нестационарна, она расширяется. Это проявляется в общем разбегании галактик, в их взаимном удалении.

Теоретический вывод Фридмана, подтвержденный прямыми астрономическими наблюдениями, стал теперь общепринятым. Так было сделано одно из самых выдающихся

открытий в истории физики и астрономии — открытие общего расширения Вселенной.

Расширение Вселенной началось 18 млрд. лет назад «Большим Взрывом». Что в действительности произошло тогда и каким образом всему веществу Вселенной были сообщены начальные скорости расширения, неизвестно; это составляет, пожалуй, самую трудную проблему современной астрономии и физики. И все же многое уда-

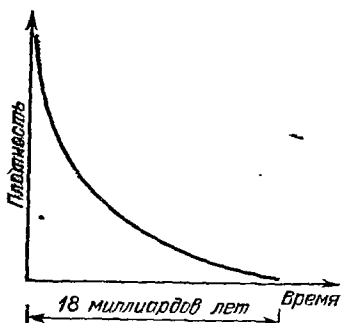


Рис. 7. Плотность вещества в расширяющейся Вселенной.

лось узнать о физическом состоянии вещества в первые минуты, часы, годы от начала расширения.

Вещество Вселенной представляло собою тогда необычайно плотную и горячую плазму, ионизованный газ, пронизанный к тому же мощным электромагнитным излучением. Высокая плотность вещества в ранние эпохи следует из теории космологического расширения: если сейчас в среднем по Вселенной плотность вещества падает из-за общего расширения, то в прошлом она была, очевидно, больше. Чем дальше в прошлое, тем более плотным должно быть вещество Вселенной. Теория утверждает, что в прошлом Вселенной существовал такой момент, когда плотность была (формально) бесконечной (рис. 7). Этот момент отстоит от нас на 18 млрд. лет; тогда-то и произошел «Большой Взрыв», с которого началась история расширяющейся Вселенной.

Формальная бесконечность какой-либо величины в теории — это верный признак того, что сама теория в этом случае «отказывает». Бесконечное значение плотности означает скорее всего, что в исходный момент физические

условия во Вселенной были столь необычны, что ни общей теории относительности, ни всей вообще современной физики недостаточно для их правильного понимания. Однако через несколько секунд после начала расширения «обычная» физика уже применима. За эти мгновения плотность успевает измениться от (формально) бесконечной до еще очень большой, но тем не менее поддающейся теоретическому анализу, — она становится сравнимой с плотностью вещества внутри атомных ядер, которая составляет приблизительно 10^{18} кг/м³. А далее плотность постепенно падает, Вселенная становится со временем все более и более разреженной, и так до современной эпохи, когда средняя плотность вещества окажется равной приблизительно 10^{-27} кг/м³. Вот таков перепад плотности — на целых 45 порядков, с которым имеет дело космология.

Космология Фридмана дает динамику Вселенной, но ничего не говорит о ее температуре. Динамику нужно дополнить еще термодинамикой. При этом, в принципе, допустимы две крайние возможности: 1) неограниченное возрастание в прошлое плотности вещества сопровождается и неограниченным возрастанием его температуры; 2) начальная температура Вселенной равна нулю.

Идею «горячего начала» Вселенной выдвинул в 40-е годы американский физик Г. Гамов, работавший тогда в Колорадском университете (США). Это была смелая идея, богатая далеко идущими выводами, и она в дальнейшем нашла прямое наблюдательное подтверждение. Но до поры до времени с ней успешно конкурировала и идея «холодного начала», тоже отнюдь не тривиальная. (Вспомним высказывание Н. Бора о том, что по-настоящему глубокая идея всегда такова, что противоположное ей утверждение тоже представляет собой глупую идею.)

Исходным мотивом и целью гипотезы горячей Вселенной было объяснение наблюдаемого химического состава звезд. В плотном и горячем веществе в первые минуты космологического расширения могли происходить разнообразные ядерные реакции, и в этом «котле», как предполагалось, должно было «свариться» вещество нужного состава, из которого в дальнейшем и образуются все звезды Вселенной. И действительно, теоретический расчет показывает, что по завершении этого процесса подавляющая часть вещества — до 75% (по массе) — приходится на водород и почти 25% — на гелий. Это очень близко к тому, что в действительности наблюдается. Что же ка-

сается более тяжелых элементов, то в космологическом «котле» их может «свариться» очень мало, меньше сотой доли процента. Они возникают в основном гораздо позже, в термоядерных реакциях, протекающих уже в самих звездах.

Согласно общим законам термодинамики вместе с горячим веществом в ранней Вселенной обязательно должно было существовать излучение — совокупность электромагнитных волн, распространявшихся во всех направлениях. Об этой совокупности волн можно говорить и как о газе частиц — фотонов, квантов электромагнитных волн. Температура газа фотонов такая же, как и температура излучения. В ходе общего космологического расширения температура вещества и фотонов падает с падением плотности от очень больших до очень малых значений, но фотоны при этом никуда не исчезают, они должны сохраниться до современной эпохи, создавая общий фон излучения во Вселенной.

Это предсказание теории Гамова подтвердилось в 1965 г., когда американские астрофизики А. Пензиас и Р. Вильсон обнаружили космический фон электромагнитного излучения. В соответствии с низким значением современной плотности мира, температура фотонов оказалась тоже очень низкой — всего около трех кельвинов. Электромагнитные волны, соответствующие такому холодному газу фотонов, принадлежат в основном диапазону миллиметровых волн. По предложению советского астронома И. С. Шкловского это излучение было названо реликтовым, т. е. остаточным.

Об этом замечательном открытии, не уступающем по важности открытию космологического расширения, подробно рассказывается в гл. 7. Многие другие достижения космологии освещаются в научно-популярной книге И. Д. Новикова «Эволюция Вселенной» (М.: Наука, 1983).

Рождение галактик

Глубокие теоретические идеи и выдающиеся наблюдательные открытия в космологии прояснили многое из того, что касается ранней истории Вселенной. Они создали надежную базу для развития современной космогонии — науки о происхождении Солнечной системы, звезд и галактик, скоплений и сверхскоплений.

Но самая главная идея космогонии восходит еще к Ньютону. В 1692 г. он писал, что Солнце и звезды

образовались, вероятно, из вещества, которое прежде было равномерно рассеяно по всему объему Вселенной. Каждая частица вещества испытывала «врожденное тяготение» ко всем остальным, и потому в однородном распределении неизбежно должны были возникать и разрастаться сгущения, в которые взаимное тяготение частиц втягивало со временем все больше и больше вещества. Так возникало «бесконечное число больших масс, разбросанных по всему бесконечному пространству на большие расстояния друг от друга».

Процесс, о котором говорил Ньютон, способен развиваться в однородном веществе расширяющейся Вселенной. Это было доказано в 40-е годы советским физиком-теоретиком Е. М. Лифшицем. Позднее, в последние 10—15 лет, на этой основе стала развиваться детальная теория возникновения галактик и скоплений из первоначальных, слабых и расплывчатых, сгущений первичной горячей плазмы. Наиболее важные результаты в этой области получены группой московских и ленинградских астрофизиков, руководимой Я. Б. Зельдовичем.

Согласно этой теории за первые 2 или 3 млрд. лет, протекших от начала расширения, в веществе Вселенной сформировались огромные по размеру газовые сгущения, содержащие до $(10^{15} - 10^{16}) M_{\odot}$ вещества. Эти сгущения были не сферическими, а, скорее, довольно плоскими. Это были слои уплотнения, которые получили сейчас название «блинов». Они возникали не изолированно друг от друга, многие из них соединялись друг с другом своими краями, образуя вместе сложную систему сгущений и пустот, отдаленно напоминающих пчелиные соты.

Такая теоретическая картина находится в хорошем согласии с наблюдательными данными о самых крупных образованиях во Вселенной — сверхскоплениях, которые тоже представляют собой стенки, ограничивающие огромные пустоты, почти полностью лишенные галактик. Вероятно, из первоначальных газовых «блинов» и должны были формироваться сверхскопления путем дробления этих слоев на различные по массе и размеру фрагменты. Отдельные фрагменты превращались со временем в галактики, испытывая дальнейшее дробление на все меньшие по массе сгустки, которые, сжимаясь, превращались в конце концов в звезды. Физической причиной последовательного дробления вещества служит все то же ньютоново «врожденное тяготение» каждой частицы ко всем остальным, которое привело к возникновению и самих

первоначальных крупномасштабных сгущений — «блинов» и всех последующих астрономических систем и тел.

Многие галактики, формирующиеся таким путем, должны обладать быстрым вращением, характерным для спиральных галактик (точнее, для их дисков). Это вращение имели уже газовые фрагменты, на которые распался каждый из «блинов», хотя никакого исходного вращения всего «блина» как целого или каких-то его частей с самого начала и не было. Вращение фрагментов обязано вихревым движениям, которые, как оказывается, неизбежно рождаются на границах «блинов» и внутри их самих, когда эти слои уплотнения окончательно выделяются и обособляются из общего распределения вещества в расширяющейся Вселенной.

Подробное научно-популярное изложение достижений современной космогонии читатель может найти в книге Л. Э. Гуревича и А. Д. Чернина «Происхождение галактик и звезд» (М.: Наука, 1983).

Эволюция звезд

Звезда начинает свое существование как сжимающийся под действием собственного тяготения сгусток вещества. В ходе сжатия вещество нагревается, и в нем возрастает давление, которое вскоре начинает препятствовать этому сжатию. Постепенно давление отнавликает сжатие и в сгущении достигается равновесие, баланс обеих сил — силы тяготения, стремящейся и далее сжимать вещество, и силы давления, действующей против сжатия.

Но еще до остановки сжатия давление, температура и плотность в самой внутренней, центральной области сгустка достигают столь высоких значений, что там «зажигаются» термоядерные реакции. Они служат источником энергии, благодаря которой поддерживается высокая температура и высокое давление в звездных недрах. Эта энергия питает излучение звезды.

Солнце — это газовый шар, находящийся в равновесии под действием сил тяготения и давления. В его недрах давление составляет 10^{16} Па, температура — 15 миллионов градусов, плотность — 10^5 кг/м³. Там идет реакция превращения ядер водорода в ядра гелия. За счет этого Солнце излучает каждую секунду $4 \cdot 10^{26}$ Дж энергии. Оно может светить еще не менее 10 млрд. лет, пока водород в его недрах не превратится в гелий.

Энергия, излучаемая в единицу времени, называется светимостью звезды. Светимость Солнца, $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26}$ Вт, не очень высока, поэтому оно считается звездой-карликом. Встречаются звезды-гиганты, светимость которых в десятки тысяч раз больше. Эти звезды имеют массы, иногда в десятки раз превосходящие массу Солнца. Вообще же звезды не слишком сильно отличаются друг от друга по массе: самые крупные из известных звезд имеют массу около $50 M_{\odot}$, а самые малые — около $0,01 M_{\odot}$. Различие светимостей гораздо сильнее: от $(10^{-3} - 10^{-4}) L_{\odot}$ у звезд, называемых белыми карликами *), до $(10^4 - 10^5) L_{\odot}$ у звезд-гигантов и сверхгигантов.

Чем больше звезда, тем ярче она светит; при этом зависимость светимости звезды от массы, как видно из приведенных данных, более сильная, чем по закону прямой пропорциональности. Для звезд, в три и более раз превосходящих по массе Солнце, светимость пропорциональна кубу массы. Так как запасы ядерной энергии определяются содержанием водорода в звезде, т. е. фактически ее массой, то время исчерпания запасов ядерного горючего обратно пропорционально квадрату массы звезды. Если, например, звезда имеет массу $30 M_{\odot}$, то ее основное горючее — водород — будет израсходовано за 10 миллионов лет. После исчерпания водорода центральная область звезды сжимается, температура и плотность в ней повышаются, и по этой причине становятся возможными ядерные реакции превращения гелия в углерод, а затем и дальнейшие реакции с образованием все более сложных ядер. Вместе с тем оказывается возможным и горение водорода в слое, окружающем центральную область. Все это приводит к существенной перестройке внутренней структуры звезды. На этих поздних стадиях своей эволюции звезда разбухает, ее внешние слои расширяются, тогда как центральная область, ядро звезды, продолжает постепенно сжиматься. Поверхностные слои могут отделиться от плотного ядра и образовать вокруг него газовое облако (туманность).

Что же касается ядра **), то рано или поздно ядерные источники энергии окажутся в нем исчерпанными. Ядро

*) Карлики они по светимости, а белые по цвету. Солнце — желтый карлик.

**) В массивных звездах ($M > 12 M_{\odot}$) ядерные реакции способны превратить все его вещество в железо — конечный продукт горения: ядра железа не могут соединяться в более тяжелые ядра с выделением энергии.

звезды, не питаемое больше энергией, начинает охлаждаться, давление в нем падает, и вскоре сила давления оказывается уже недостаточной для противодействия собственной тяжести звездного вещества. Ядро испытывает дальнейшее быстрое сжатие, итогом которого — в зависимости от его массы — может быть одно из трех новых состояний.

1. *Белый карлик.* Если масса ядра не превышает $1,4 M_{\odot}$, то сжатие его останавливается, когда средняя плотность вещества достигает значения $\sim 10^9$ кг/м³. Возникает белый карлик — звезда размером с Землю и светимостью от $\sim 10^{-3} L_{\odot}$ и ниже. Она светит за счет остатка своей тепловой энергии. Постепенно остывая, белый карлик может светить еще многие миллиарды лет.

Предельную массу белого карлика рассчитал в 30-е годы американский астрофизик С. Чандрасекар.

Белые карлики и газовые оболочки вокруг них (эти оболочки называют планетарными туманностями — когда-то думали, что там идет образование новых планетных систем) хорошо известны в астрономии (рис. 8). Об их общем происхождении говорил И. С. Шкловский еще в 1956 г.

2. *Нейтронная звезда.* Ядро звезды, имеющее массу от $1,4$ до $2 M_{\odot}$ (а может быть, и $3 M_{\odot}$), сжимается сильнее белых карликов. Его сжатие останавливается при очень большой плотности, сравнимой с плотностью вещества в атомных ядрах, $\sim 10^{18}$ кг/м³. Легко подсчитать, что диаметр такой звезды составляет всего 20 км.

Вещество, сжатое до ядерной плотности, испытывает превращение, называемое нейтронизацией: электроны как бы вдавливаются в ядра и там сливаются с протонами. Из слияния электрона с протоном получается нейтрон, а ядра (это были преимущественно ядра железа — конечного продукта термоядерных реакций в звезде) оказываются состоящими почти целиком из нейтронов. Эти ядра неустойчивы и быстро разваливаются на отдельные нейтроны, образуя таким образом сплошную смесь нейтронов с очень небольшой примесью протонов и электронов. Так возникает звезда, почти целиком состоящая из нейтронов, — нейтронная звезда.

Процесс нейтронизации в сверхплотном веществе исследовал наш замечательный физик-теоретик Л. Д. Ландау. В 1932 г. — это год открытия нейтрона — Л. Д. Ландау теоретически предсказал существование нейтронных звезд, обнаруженных астрономами 35 лет спустя, в 1967 г.



Рис. 8. Планетарная туманность и белый карлик — светящаяся точка в самом ее центре. (Догадайтесь, почему сферическая оболочка может выглядеть на фотографии как кольцо.)

Расчет предельной массы нейтронной звезды произвести гораздо труднее, чем в случае белого карлика. Для этого требуется знание тонких свойств взаимодействия нейтронов, которым физика пока еще не располагает. Скорее, эта масса составляет две солнечных массы, но может быть, что и три.

По той же причине очень непросто исследовать и внутреннее устройство нейтронной звезды. Тем не менее

удаётся установить (хотя точные расчёты остаются ещё делом будущего), что — в отличие от Солнца, других «обычных» звезд и белых карликов — нейтронная звезда представляет собой не газовую, а жидкую сферу. Нейтронное вещество в недрах нейтронной звезды находится в жидком состоянии и обладает, как предполагается, удивительным свойством — эта жидкость абсолютно невязкая, или, как говорят, сверхтекучая. Не менее удивительным свойством обладают, вероятно, и остаточные протоны, образующие (как и электроны) газ, растворенный в нейтронной жидкости. Газ протонов способен вести себя как идеальный проводник электричества, т. е. проводник без сопротивления, или сверхпроводник.

Нейтронная жидкость заключена в железную сферическую оболочку, твердую кристаллическую кору нейтронной звезды, в которой — из-за сравнительно малой плотности — нейтронизация не произошла.

Сильное сжатие в процессе формирования нейтронной звезды сопровождается выделением большой энергии (за счет гравитационной потенциальной энергии исходного состояния ядра звезды). Это служит причиной яркого астрономического явления — вспышки сверхновой звезды*). Светимость звезды на заключительной стадии ее эволюции внезапно увеличивается до колоссальных значений порядка $10^{10} L_{\odot}$ и даже выше. Одна звезда светит так ярко, как целая галактика. Светимость держится на таком уровне недолго — несколько недель, а затем постепенно падает и через несколько месяцев звезда обычно становится невидимой.

Так выглядят вспышки сверхновых в соседних к нам галактиках. Сверхновая в нашей Галактике наблюдалась в последний раз И. Кеплером в 1604 г.; среди самых древних сведений — записи в китайских хрониках, относящиеся к 1054 г.; тогда вспыхнула столь яркая сверхновая, что она была видна даже на дневном небе. Сверхновая 1054 г. дала начало Крабовидной туманности, в центре которой находится нейтронная звезда — радиопульсар. Эта туманность (рис. 9) возникла из вещества внешних слоев исходной звезды, отделившихся от ее ядра в ходе вспышки сверхновой. Об этой туманности и пульсаре в ней рассказывается в гл. 4.

Вещество оболочки, сбрасываемой при вспышке сверх-

*) Такая идея выдвинута в 1934 г. американскими астрономами В. Бааде и Ф. Цвикки.

новой, обогащено тяжелыми элементами, продуктами термоядерных реакций, протекавших в недрах звезды в течение всей ее жизни, а возможно, и в самый момент вспышки. Это вещество постепенно рассеивается в пространстве и затем оседает под действием сил тяготения к средней плоскости Галактики. В галактическом диске оно смешивается

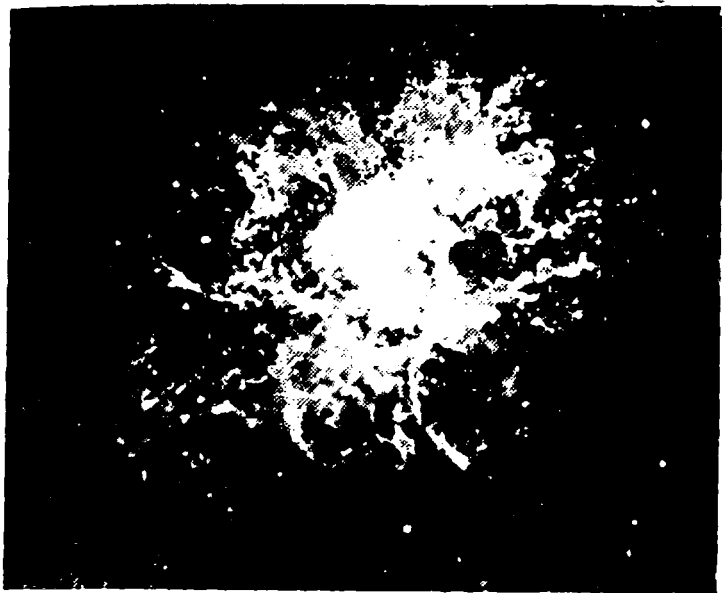


Рис. 9. Крабовидная туманность.

вается с газом, сохранившимся там еще со времен образования первых звезд Галактики; из этого материала могут формироваться звезды новых поколений, химический состав которых должен отличаться повышенным содержанием тяжелых элементов, что и наблюдается в действительности. Старые звезды Галактики преобладают в ее гало и по своему химическому составу они очень близки к первичному, дозвездному веществу Вселенной — тяжелых элементов в них почти нет. Образование звезд новых поколений продолжается в диске Галактики; здесь звезды в целом моложе, чем в гало, и содержание тяжелых элементов в них достигает уже заметной величины (1–3%), в сотни раз большей, чем в дозвездном веществе.

3. *Черная дыра.* Это третье из возможных конечных состояний ядра звезды, исчерпавшей запасы ядерного горючего. Оно возникает в результате неупругого сжатия ядра под действием его собственного тяготения. Никакое давление, никакая упругость вещества не могут противодействовать сжимающей силе тяготения, если масса ядра превышает $(2-3)M_{\odot}$. Стремительное сжатие ведет к неограниченно большой плотности и неограниченно малым размерам ядра. Этот процесс называется гравитационным коллапсом.

Тело, претерпевшее неупругий гравитационный коллапс, образует то, что называется черной дырой.

В ходе коллапса силы тяготения, действующие внутри сжимающегося тела и вблизи него, нарастают и становятся столь значительными, что ничего — даже свет — не выпускают наружу и захватывают, необратимо поглощают в черной дыре все, что может находиться поблизости от нее.

Черные дыры еще не открыты в природе, они остаются пока гипотетическими объектами, но в их существовании вряд ли можно сомневаться. Наблюдательные поиски черных дыр составляют одну из самых увлекательных задач астрономии. Сейчас имеется целый ряд объектов, которые считаются реальными кандидатами в черные дыры. Среди них — двойная звездная система в созвездии Лебедя, излучающая рентгеновские лучи и получившая название Лебедь X-1. Она находится от нас на расстоянии в 2 кпк $\approx 6 \cdot 10^{19}$ м и состоит из «обычной» массивной звезды (с массой около $20 M_{\odot}$) и ее невидимого компаньона с массой до $10 M_{\odot}$. Последняя величина наверняка превышает верхний предел массы нейтронной звезды ($(2-3)M_{\odot}$); если эта оценка окончательно подтвердится, то можно будет с уверенностью сказать, что источник Лебедь X-1 содержит черную дыру.

Еще один и, как считают, даже более надежный кандидат в черные дыры обнаружен совсем недавно в соседней к нам неправильной галактике, называемой Большим Магеллановым Облаком. Там тоже имеется двойная система с рентгеновским излучением; она состоит из «обычной» звезды с массой $6 M_{\odot}$ и ее невидимого компаньона с массой $8 M_{\odot}$ или даже $12 M_{\odot}$.

Не удивительно, что черные дыры ищут в двойных звездных системах. Астрономические оценки масс звезд основаны на наблюдении их движений в звездных парах: измеряя скорости обращения звезд по их орбитам и раз-

меры орбит, находят силы тяготения, удерживающие звезды на их орбитах, а по ним восстанавливают и массы звезд. Оценки масс можно производить и по движениям одной звезды в паре, когда другая не видна: эти движения определенно укажут на то, что звезда имеет компаньона. И если масса невидимого компаньона оказывается больше массы видимой звезды, то сразу можно сказать, что этот компаньон не может быть обычной звездой — иначе он светил бы ярче видимой звезды. Если же его масса превышает к тому же предельную массу белого карлика и нейтронной звезды, то эта необычная звезда может быть только черной дырой.

О черных дырах речь пойдет еще в гл. 6, где обсуждаются источники светимости квазаров. Возможно, ядра квазаров содержат черные дыры незвездного происхождения, массы которых сравнимы с массами целых галактик.

Сколько звезд во Вселенной

Во всей наблюдаемой области Вселенной, в Метагалактике, сферическом объеме радиусом $3 \cdot 10^{25}$ м, содержится масса $\sim 10^{50}$ кг. В этой области имеется приблизительно миллион сверхскоплений и десять миллиардов галактик различных типов, среди которых преобладают спиральные, подобные нашей Галактике. Общее число звезд во всех этих системах оценивается величиной $\sim 10^{20}$. Большинство из них — красноватые карлики, светимостью и массой уступающие Солнцу, но по своему устройству похожие на него; излучают они, как и Солнце, за счет медленного термоядерного горения водорода в их недрах. Ярких звезд-гигантов очень мало, не более сотой доли процента. Белых карликов около одного процента. Нейтронных звезд, вероятно, в 10 раз меньше, чем белых карликов. Черных дыр, возникших среди звезд нашей Вселенной за всю историю ее существования, должно быть, по-видимому, приблизительно столько, сколько и нейтронных звезд, т. е. $\sim 10^{17}$.

Но что лежит за пределами видимой части мира? Сколько звезд во всей Вселенной? Конечно ли Вселенная или бесконечна? Это вопросы, которые во все времена горячо обсуждались в астрономии. Лишь в наши дни появляется возможность дать на них обоснованный ответ.

Согласно космологической теории Фридмана геометрические свойства Вселенной и прежде всего величина ее полного объема зависят от реального распределения и

движения вещества в пространстве. Распределение вещества характеризуется его средней плотностью, а движение — скоростями общего космологического расширения. Оказывается, что для ответа на вопрос нужно сравнить плотность вещества с так называемой критической плотностью — физической величиной, вычисляемой по данным о скоростях расширения. Если плотность больше критической, то объем Вселенной конечен, если меньше — бесконечен. В бесконечном объеме бесконечно и число звезд.

На основании современных наблюдений критическая плотность оценивается как $(1-0,5) \cdot 10^{-26}$ кг/м³. Средняя плотность светящегося вещества звезд и галактик приблизительно в 10 раз меньше. Но полная плотность, с учетом скрытых масс $\sim 10^{-26}$ кг/м³, сравнивается с критической или даже превышает ее. Эти величины близки друг к другу, и сказать, какая из них больше, затруднительно — ведь обе они определены пока что не слишком точно.

Точные астрономические измерения в космологических масштабах, а с ними и ответ на вопрос о конечности и бесконечности мира, остаются делом будущего. Но замечательно уже и то, что мы определенно знаем сейчас, какие величины и с какой именно точностью нужно измерить в наблюдаемой Вселенной, чтобы решить этот вопрос вопросов астрономии.