

Протоны и нейтроны называют адронами, поэтому последняя часть этих 10^{-5} секунд зовется эпохой адронов.

По прошествии этих 10^{-5} секунд температура оставалась довольно высокой, и у фотонов было достаточно много энергии, чтобы преобразовывать ее в материю и создавать лептоны. Но через секунду Вселенная охладилась, появление лептонов прекратилось, а созданные тогда лептоны сохранились до наших дней (кроме лептонов, созданных в ядерных реакциях). То, что происходило между 10^{-5} до 1 секунды после Большого взрыва, называют эпохой лептонов.

В промежутке примерно от 1 секунды до 100 секунд Вселенная достаточно охладилась, чтобы нейтроны и протоны смогли объединяться, образуя первые атомные ядра. Но свободный нейтрон по своей природе нестабилен и может распадаться на электрон и протон. Таким образом, по истечении этих 100 секунд нейтронов осталось не так много: из каждых 16 адронов лишь два были нейтронами, а остальные 14 — протонами. В этой порции из 16 адронов два нейтрона могли соединиться с двумя протонами и образовать ядро гелия. Оставшиеся 12 протонов образовали ядра водорода. Таким образом, гелий составлял четверть массы Вселенной (так как четыре из каждых 16 адронов стали гелием), а оставшиеся три четверти приходились на водород (его образовали 12 из каждых 16 адронов). Образовались и другие элементы, такие как литий и более тяжелые разновидности (изотопы) водорода (например, дейтерий, ядро которого содержит и нейтрон, и протон), но в очень

малых количествах, потому что Вселенная охладилась слишком быстро, чтобы могло сформироваться большее количество этих веществ. То, что массовая доля элементов во Вселенной осталась неизменной с тех самых пор, а именно примерно 75% водорода, 25% гелия и крайне небольшое количество более тяжелых элементов (подробнее об этом ниже), является еще одним, причем успешно проверенным, аргументом в пользу теории Большого взрыва.

На протяжении последующих 100 000 лет Вселенная была еще слишком горячей, чтобы атомные ядра могли захватить электроны и образовать целый атом. Плотность материи и энергии фотонов была достаточно высокой, чтобы они «застряли» друг в друге. Это означает, что материя была слишком плотной и потому непрозрачной, а энергии было слишком много, чтобы позволить материи собраться в нечто большее, чем существующие отдельно друг от друга атомные ядра и электроны. Это время обычно называют радиационной эрой или стадией радиационного доминирования, так как Вселенная была пронизана фотонами. Примерно через 100 000 лет после Большого взрыва масса и плотность фотонов уменьшилась настолько, что свет смог отделиться от материи. А когда после Большого взрыва прошло около 380 000 лет, Вселенная достаточно охладилась, чтобы ядра смогли соединиться с электронами и образовать атомы. С этого момента начинается эра доминирования вещества, в которой мы в общем-то и живем. Благодаря этому последнему соединению высвободилось

большое количество энергии, остатки которой наблюдаются сейчас в виде реликтового излучения. Это окончательное соединение атомов и высвобождение энергии может содержать следы слегка небольшой комковатости кварковой плазмы после эпохи быстрого расширения. Таким образом, малые флуктуации яркости космического реликтового излучения — это сильно расширившиеся следы ранних флуктуаций плотности вещества.

По окончании стадии радиационного доминирования и высвобождения энергии от соединившихся атомов свет отделился от вещества, и Вселенная на 300 млн лет погрузилась во тьму. Этот период называется Темными веками. Коротко говоря, Вселенная остыла, и материя рассеялась настолько, что в тот период не было источников света.

В конце Темных веков слабые флуктуации в плотности водорода и гелия вызвали повышенное гравитационное притяжение к более плотным участкам, которые притягивали все больше вещества. Дополнительное количество вещества вызвало «сгущение» этих флуктуаций, увеличение массы и т.д., что впоследствии привело к появлению гравитационно-связанных структур в форме огромных межзвездных облаков. В этих газовых облаках начали формироваться первые звезды.

По-видимому, первые звезды состояли только из водорода и гелия, а их формирование обозначило окончание Темных веков — 300 млн лет после Большого взрыва. После того как самые массивные из первых

звезд закончили свою эволюцию и взорвались, создав более тяжелые химические элементы (подробно об этом в следующей главе), более маленькие звезды начали формироваться в этих огромных межзвездных облаках, становясь гравитационно-связанными системами — первыми галактиками, пик появления которых пришелся на период между 1–3 млрд лет после Большого взрыва. Хотя галактики во Вселенной разлетаются, они не находятся в состоянии полностью свободного плавания, их группы гравитационно связаны друг с другом, образуя скопления галактик. Сами эти скопления связаны друг с другом вдоль галактических нитей, пронизывающих нашу Вселенную. Сети этих нитей являются крупнейшими структурами во Вселенной, а в промежутках между ними находятся пустые пространства космоса (войды).

Наша Галактика, Млечный Путь, связана с галактикой Андромеды (в отдаленном будущем они могут даже столкнуться). Обе они являются крупными галактиками в скоплении Девы, которое может быть частью еще большего скопления под названием Ланиакея. Тем не менее, после того как через миллиард лет после Большого взрыва возникли первые галактики, потребовалось еще 1–2 млрд лет, чтобы сформировались скопления галактик и галактические нити.

Галактики сегодня не одинаковы по форме и размеру, но в то же время они не образуют совершенно случайные фигуры. Самые большие из них — эллиптические галактики, которые представляют собой

сферические шары из звезд, обращающиеся вокруг центра по хаотически ориентированным орбитам. Распространенными видами галактик являются дисковые, спиральные, а также спиральные галактики с перемычкой — плоские и обращающиеся вокруг массивного тела, находящегося в их центре, например Млечный Путь или Андромеда. Гигантское облако из газа и звезд, сформировавших спиральную галактику, уплотнялось под действием своей гравитации, но центробежная сила препятствовала сжатию перпендикулярно оси вращения, позволяя облаку сжиматься параллельно оси, создавая таким образом форму плоского диска (это похоже на формирование Солнечной системы, о чем мы поговорим позднее). В центре сжимающегося облака всегда собирается бóльшая часть массы: в Солнечной системе это Солнце, а в галактиках масса их центра столь велика, что там образуется сверхмассивная черная дыра — объект настолько тяжелый, что даже свет не может преодолеть его притяжение, если подойдет слишком близко.

Обычно диаметр галактик составляет около 100 000 световых лет (1 световой год — это расстояние, которое проходит свет за 1 год, примерно 10^{13} км или 10 трлн км; для сравнения: Нептун, самая далекая от нас планета, находится на расстоянии 4,5 млрд км от Солнца, что в 2000 раз меньше светового года). Наша галактика содержит в себе сотни миллиардов звезд. Однако, по некоторым данным, можно предположить, что масса звезд составляет лишь крохотную долю общей массы

галактики. Галактики содержат огромное количество скрытой массы, которую называют темной материей.

В 1960-х гг. американский астроном Вера Рубин и ее коллеги обнаружили, что в спиральных, дисковых и спиральных с перемычкой галактиках большинство звезд обращаются вокруг галактического центра почти с одинаковой скоростью независимо от расстояния от центра галактики, и это сильно отличается от обращения планет Солнечной системы вокруг Солнца. Орбитальные скорости планет уменьшаются с удалением от светила, ведь единственная сила, удерживающая их на орбите, — это гравитационное притяжение Солнца, которое слабеет по мере увеличения расстояния (это называют Кеплеровым движением — в честь Иоганна Кеплера и его законов движения планет по орбитам). Одинаковая орбитальная скорость звезд означает, что чем дальше они находятся от галактического центра, тем бóльшая масса должна содержаться внутри их орбиты, чтобы сохранялась гравитационная связь с галактикой. Однако, чтобы звезды продолжали двигаться таким образом, требуется намного бóльшая масса, чем та, которую мы можем наблюдать. Это указывает на присутствие темной материи, которая и составляет остальную часть необходимой массы.

Астрономы также заметили, что относительные скорости галактик внутри скоплений слишком высоки, чтобы оставаться гравитационно связанными друг с другом, если их масса состоит только из наблюдаемой звездной массы. Таким образом, звездные скопления могут

быть стабильными и не разлетаться, только если они содержат гораздо больше массы, чем та, которую мы наблюдаем. Есть и другие данные, подтверждающие наличие темной материи, например гравитационное линзирование, из-за которого свет искривляется, проходя мимо таких массивных объектов, как скопления галактик.

Эта невидимая темная материя, удерживающая вместе галактики и скопления галактик, не наблюдается ни в одном из диапазонов электромагнитного спектра — от микроволнового до инфракрасного и ультрафиолетового излучения. Однако в последние годы ученые пришли к выводу, что бóльшая часть материи в космосе — именно темная и первые галактики состояли по большей части из нее, а не из водорода и гелия. Пока остается загадкой, что же она из себя представляет, поскольку мы не можем наблюдать ее непосредственно.

Поскольку Вселенная после Большого взрыва продолжает расширяться, резонно задаться вопросом о ее будущем. Если расширение Вселенной замедляется под действием собственной гравитации, хватит ли начальной взрывной энергии, чтобы продолжать расширяться, или же это расширение «выдохнется» и гравитация заставит Вселенную сжаться обратно в точку? Недавние исследования говорят нам, что ни одна из этих гипотез не верна. Расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется. Прежде гравитацию считали единственной силой, действующей на большие расстояния, она

должна была бы замедлять скорость расширения Вселенной (и, возможно, привести к ее сжатию) под действием собственной массы. Ускоренное расширение Вселенной стало немалым сюрпризом и свидетельством действия не обнаруженной до сих пор силы. Создающее ее энергетическое поле фактически создает и давление, разгоняющее Вселенную все быстрее. Это поле называли темной энергией. («Темная энергия» и «темная материя» называются темными не потому, что они как-то похожи друг на друга, а потому, что их нельзя увидеть с помощью света.) Темная энергия — сверхдальнодействующая сила, которая обнаруживается только на уровне сверхскоплений галактик. Вероятно, она не играла особой роли, пока Вселенная не расширилась до достаточно больших размеров. Преобладание темной материи над гравитацией (и наблюдающееся в результате расширение Вселенной), предположительно началось около 4 млрд лет назад, после формирования Солнечной системы. В некотором смысле расширение Вселенной похоже на то, как вода постепенно заполняет таз, пока не доходит до краев и не выливается с другой стороны.

Учитывая объем Вселенной, в котором имеется темная энергия, можно сделать вывод, что она занимает примерно 70% содержимого (вместе взятых массы и энергии) Вселенной, при этом темная материя составляет 25% объема, а оставшиеся 5% — это обычная барионная материя, из которой состоят звезды, планеты и мы с вами. (Хотя большая часть этой материи по-прежнему представлена водородом и гелием.) Темная материя

и темная энергия дают о себе знать только в масштабах галактик и их скоплений — совсем не те уровни, которые мы могли бы как-то чувствовать, наблюдать или понять интуитивно. Гравитация, пожалуй, единственная сила, которую мы физически ощущаем и с которой постоянно сталкиваемся — например, когда встаем с кровати, поднимаемся по лестнице или наливаем кофе. А будь мы размером с букашку или микроба, для нас важнее было бы электромагнитное излучение, которое вызывает статическое электричество и поверхностное напряжение воды. Гравитация была бы для нас менее важна и едва заметна. (Муравей легко взбирается вверх по стене и ничуть не пострадает, упав с высотного здания.) В общем, пока мы находимся на крайне низком, микроскопическом уровне понимания природы темной материи и темной энергии.

Звезды и элементы

.....

Темные века ранней Вселенной закончилась, когда огромные облака водорода и гелия (и темной материи), сжимаясь под воздействием собственного гравитационного притяжения, начали формировать первые звезды, а затем и галактики. Похожее звездообразование происходит и сейчас, одним из примеров является туманность Орла в нашей Галактике, которая до сих пор «штампует» новые звезды и звездные системы. Как мы уже отмечали, первые такие газовые облака состояли только из диффузной космической материи (если не считать темную материю), в основном в виде водорода и гелия, и потому не содержали ничего, из чего могли бы сформироваться планеты. Формирование первых и последующих за ними звезд обусловило появление более тяжелых элементов, из которых были созданы планеты и все живущее на них.

Когда протосолнечное облако начинает сжиматься под воздействием собственного гравитационного притяжения, молекулы устремляются к его центру с возрастающей скоростью — как шарик, катящийся с горки. Ускоряясь, они сталкиваются и отскакивают друг от друга, и энергия их движения преобразуется в тепло. Это повышает температуру и давление облака и в конце концов останавливает сжатие. (Размеры, формы и эволюцию этих облаков мы обсудим в следующей главе.)

Облако не может долго сжиматься под воздействием собственных гравитационных сил, в какой-то момент коллапс останавливается. Это зависит от размера. Не слишком массивное облако вообще не сжимается, а чем больше его масса, тем больше внутренняя гравитация, такое облако уплотнится еще до того, как внутри него станет слишком горячо.

Некоторые процессы помогают облаку избежать коллапса. Большая часть облака — это водород, молекулы которого состоят из двух связанных между собой атомов водорода. Если центр коллапсирующего облака становится достаточно горячим, чтобы молекулы водорода смогли распасться на атомы, этот распад поглотит энергию и не даст облаку нагреваться, позволяя ему продолжить существование.

Это похоже на фазовый переход, который происходит в кипящей воде (мы использовали такую аналогию при описании Большого взрыва). Тепловая энергия плиты передается воде, и вода закипает. Но превращение воды в пар поглощает энергию, и температура кипящей воды остается неизменной, пока вся вода не выкипит. Таким же образом превращение молекулярного водорода в атомарный поглощает тепловую энергию уплотняющегося облака и сохраняет его температуру стабильной, пока конверсия — в той части облака, которая стала достаточно горячей, — не завершится. То же происходит позже и в центре облака, где среда еще горячее и температура достаточно высока, чтобы атомы водорода испускали электроны и становились ионами.

Это происходит по принципу «фазового перехода», выравнивающего температуру.

Поэтому только очень большие молекулярные облака могут коллапсировать сами по себе. Первые звезды, которые полностью состояли из водорода и гелия (их называют звездами населения III, сегодня это «исчезнувший вид»), формировались в облаках, в тысячи и даже миллионы раз более массивных, чем Солнце, и были в сотни раз тяжелее его. Небольшим облакам, чтобы они продолжили сжатие, после того как станут достаточно плотными, необходим триггер, воздействие извне (к примеру, смерть гигантских звезд, которая часто сопровождается вспышками сверхновых). Распространяющиеся при этом ударные волны могут задеть молекулярное облако и запустить его коллапс. С такого стечения обстоятельств началось формирование первых малых звезд, которые живут очень давно и являются одними из основных доказательств возраста Вселенной. Части метеоритной пыли содержат доказательство того, что Солнечная система образовалась именно так. Мы еще вернемся к этому вопросу.

Если все условия выполнены и коллапсирующее облако достигает пика температуры (10 млн градусов Цельсия), начинается рождение звезды. При такой температуре ядра ионизованного водорода начинают двигаться достаточно быстро, преодолевают электрическое отталкивание друг от друга (на этой стадии ядра представляют собой протоны, они несут положительный заряд

и потому взаимно отталкиваются) и соединяются с гелием, ядра которого, как правило, состоят из двух протонов и двух нейтронов. При ядерном синтезе выделяется огромное количество энергии за счет перехода массы в энергию. Мы уже упоминали известное уравнение Эйнштейна $E = mc^2$, где E — это энергия, m — масса, c — скорость света, равная примерно 300 000 км/с (и достаточная, чтобы за секунду восемь раз облететь вокруг Земли). С учетом огромной величины c^2 превращения всего 1 мг (масса крохотной таблетки) в энергию будет достаточно, чтобы испарить 40 000 л воды, а преобразование в энергию 60 мг массы (небольшая упаковка таблеток) полностью превратит в пар воду олимпийского бассейна. Процесс термоядерной реакции был открыт в 1920–1930-е гг. и впоследствии использовался для разработки теории звездного ядерного синтеза (в основном физиком Хансом Бете и астрофизиком Фредом Хойлом, хотя ранее идею нуклеосинтеза высказывал астроном Артур Эддингтон). Эту теорию мы здесь и излагаем.

В коллапсирующем протосолнечном облаке первый переход массы в энергию происходит потому, что масса четырех атомов водорода немного больше, чем масса одного атома гелия, и вся ненужная оставшаяся масса превращается в энергию. Этот колоссальный выброс тепла останавливает дальнейшее сжатие облака и удерживает температуру примерно на уровне 10 млн градусов Цельсия (температура внутри солнечного ядра равна 15 млн градусов Цельсия). Переставшее

уплотняться облако по сути уже является звездой, например, Солнце — это плотное облако газа, прекратившее сжатие из-за тепла, высвобожденного в результате термоядерной реакции.

Эта термоядерная реакция может происходить только в самой глубокой и самой горячей части звезды — в ее ядре. Снаружи ядра температура недостаточно высока для термоядерного процесса, но благодаря конвекции — переносу горячих плавучих масс к внешним слоям, из-за чего Солнце выглядит зернистым, — жар от ядра поднимается к поверхности светила и улетучивается вместе с радиацией или фотонами, достигая Земли в виде солнечной энергии (света). Солнце испускает и более тяжелые электроны и протоны, которые разлетаются с солнечным ветром и в конце концов попадают на Землю и другие планеты.

Сжатие звезд размером с Солнце или меньшего размера (красные карлики) останавливается благодаря «средней» температуре, поддерживаемой синтезом атомов водорода. За счет водорода эти малые звезды смогут гореть весьма долго, ведь синтез атомов водорода процесс не быстрый, нельзя просто взять и соединить четыре ядра атомов водорода (или четыре протона), чтобы сразу создать ядро атома гелия. Этот процесс, называемый протон-протонной цепочкой, протекает в несколько этапов. Первые два протона, преодолевая электрическое отталкивание, сливаются, создавая двупротонное ядро — легкий изотоп гелия. (Различные изотопы одного элемента имеют атомные ядра с одинаковым