

## 8. ДИНАМИЧЕСКАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Космология. Расширяющаяся Вселенная. Горячая Вселенная. Антропный принцип и эволюция Вселенной.

### 8.1. Космология

Вселенная – это многозначное понятие, которое относится ко многим вмещающим человека системам. Самое широкое понимание *Вселенной* – это все существующее вокруг нас вместе с человеком, т.е. мир в целом. В этом смысле используется и термин “мироздание”. В более узком смысле термин “*Вселенная*” означает окружающую нас часть пространства материального мира, доступную наблюдению. Она включает в себя разнообразные типы объектов, различающиеся размерами и массой (от микро до мегамира). Другими словами, под Вселенной понимают наибольший возможный объем пространства вместе со всей материей и излучением, которые каким-то образом могут воздействовать на нас. Видимую часть Вселенной называют *Метагалактикой*. С нашей точки зрения существует только одна видимая вселенная. Но в принципе могут существовать и другие вселенные. В последние годы это утверждение начинает получать подтверждения, так как появились реальные способы увидеть и доказать, что некоторые явления, наблюдаемые в нашей Вселенной, свидетельствуют о существовании соседних вселенных (Вестник РАН. Т.71. №10.).

Наука, изучающая строение и эволюцию Вселенной, называется *космологией* – это учение о Вселенной. Термин “космология” пришел к нам из Древней Греции. Он происходит от слова “космос”, которое в переводе означает “порядок”. Древнегреческие ученые считали Землю неподвижным и центральным телом Вселенной, вокруг которого движутся все небесные светила. Им казалось, что движение небесных светил периодически повторяется из года в год, из века в век безо всяких изменений. Поэтому учение о Вселенной стали называть космологией. Вопросами происхождения и развития космических тел (звезд, планет и т.п.) занимается *космогония*. **Космос**, или *мегамир*, современная наука рассматривает как взаимодействующую и развивающуюся систему всех небесных тел. Он имеет системную организацию: планеты и планетные системы, звезды и звездные системы – галактики, системы галактик – Метагалактика.

Космология – это один из разделов естествознания (астрономии). Она использует методы многих наук: физики, математики, философии. Предмет ее исследования – весь окружающий нас мегамир, вся Вселенная в целом, т.е. пространство и время в больших масштабах. В основе космологии лежит **вера** в то, что *законы физики универсальны и считаются действующими во всей Вселенной*. Как и любая область науки, она имеет свою историю. Космология развивается по мере накопления знаний о природе небесных тел и их систем. Постепенно выяснилось, что во *Вселенной нет ничего неподвижного, вечного, неизменного*. Известный астрофизик И. Новиков отмечает, что в настоящее время *эволюция Вселенной – безусловный научный факт*, всесторонне обоснованный и имеющий под собой теоретический базис всей физики. При изучении Вселенной предполагается, что, во-первых, законы природы во всей Вселенной одинаковы; во-вторых, предполагается, что Вселенная в больших масштабах распределена в пространстве и времени более или менее однородно; и, в-третьих, в космосе нет выделенных направлений, а Вселенная не имеет центра и краев, т.е. свойства пространства одинаковы во всех направлениях.

Выводы космологии имеют большое мировоззренческое значение. К основным достижениям космологии относят: установление факта *расширения Вселенной*; измерение расстояний до наиболее удаленных объектов; открытие *реликтового излучения*, доказывающего высокую температуру вещества в прошлом; установление ядерных реакций, происходивших в самом начале расширения Вселенной; понимание общих черт процесса образования галактик и их скоплений. Теоретической основой современной космологии является общая теория относительности. Изучая Вселенную как единое космическое целое, мы достигаем наивысшего уровня понимания пространства-времени.

В больших масштабах общая картина Вселенной представляется совокупностью отдельных *скоплений галактик*. Все галактики удерживаются в скоплениях силами тяготения. Размеры скоплений и количество галактик в них различны. Большие скопления содержат тысячи галактик и имеют размеры несколько мегапарсек (1 парсек (пк) =  $3,1 \cdot 10^{18}$  см, 1 мегапарсек (Мпк) =  $10^6$  пак). Среднее расстояние между большими скоплениями около 30 Мпк, т.е. всего на порядок больше размеров скоплений.

Скопления галактик, в свою очередь, группируются в сверх-

скопления, которые отделены друг от друга гигантскими пустыми пространствами. Внутри сверхскоплений имеются как бы “пузыри” размерами в миллионы световых лет, не содержащие галактик. Сверхскопления складываются в нити и ленты, придавая Вселенной в самом грандиозном масштабе губчатую структуру.

В сравнительно небольшом масштабе звезды и галактики распределены в пространстве неравномерно. Но если проследить за удаленными галактиками, то они распределены во Вселенной примерно равномерно по всем направлениям. Поэтому считается, что *в большом масштабе Вселенная приблизительно однородна и изотропна*. Здесь речь идет о масштабах в сотни Мпк. Это означает, что если взять куб с линейным размером 300 Мпк, то, где бы его не помещали во Вселенной, в нем будет *примерно* одно и то же количество скоплений галактик (около 1000). Говорят, что *Вселенной присуща крупномасштабная однородность и изотропия*. Доказательством этому служит фоновое микроволновое электромагнитное излучение – *реликтовое излучение*, которое приходит к нам из очень удаленных областей, а его интенсивность практически не зависит от направления наблюдения.

Вселенная однородна и в том смысле, что структурные элементы далеких звезд галактик, физические законы, которым они подчиняются, а также физические константы (мировые постоянные), по-видимому, *одинаковы всюду*, т.е. одни и те же, что и в нашей области Вселенной. Представление об однородности Вселенной доказывает, что Земля не занимает во Вселенной сколько-нибудь привилегированного положения. Конечно, Земля, Солнце и Галактика кажутся нам, людям, исключительными и важными, но для Вселенной в целом они таковыми не являются.

*Галактики* – это гигантские звездные системы (скопления), содержащие от нескольких миллионов до многих сотен миллиардов звезд, связанных силами тяготения. Основное различие между галактиками и скоплениями галактик состоит в том, что расстояния между галактиками всего лишь в несколько раз больше размера самой галактики, тогда как в галактике расстояние между звездами во много раз превышает размеры самих звезд. Помимо звезд в состав галактик входят межзвездный газ и пыль, космические лучи. Галактики имеют различную форму: плоские диски, сферы, спирали и др. Все внутри галактик находится в постоянном движении. Масса галактики может достигать  $10^{12} - 10^{13}$  масс Солнца. Кант называл галактики “островами Вселенной”.

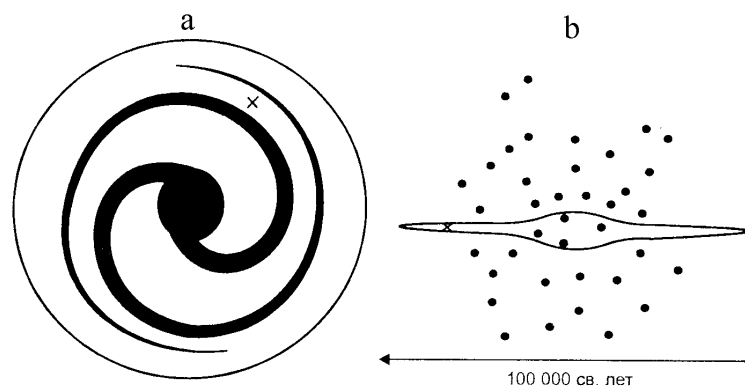


Рис. 8.1. Схема Галактики (крестиком обозначено положение Солнца): а) вид сверху; б) вид сбоку (черные точки изображают шаровые скопления)

Нашу галактику называют просто *Галактикой*. Она имеет средние размеры и состоит примерно из 150 – 200 млрд звезд, включая *Млечный путь* (древнее название полосы звезд на небе, отмечающих плоскость нашей Галактики), и представляет собой огромный диск, который состоит из звезд и звездных скоплений, вращающихся в пространстве, подобно гигантскому колесу. Звезды, входящие в Галактику, описывают вокруг ее центра окружности разного диаметра (рис. 8.1).

Во все времена люди хотели знать, откуда и каким образом произошел мир. Уже на заре цивилизации они задумывались над тем, имеет ли Вселенная начало во времени, настанет ли конец света, бесконечен или конечен мир в своем пространственном протяжении и т.п. В большинстве древних мифологических и религиозных систем предполагалось, что Вселенная сотворена неким божественным существом в какой-то определенный момент времени сравнительно недавнего прошлого. Необходимость "первоначального толчка", ответственного за сотворение нашего мира, использовалась религией в качестве одного из аргументов в пользу существования Бога.

Платону и Аристотелю не нравилась мысль о прямом вмешательстве божества в мирские дела, и они предложили считать, что Вселенная существовала всегда и будет существовать вечно. В древнем мире верили, что Вселенная ограничена в пространстве. В ранних космологических теориях мир представлялся плоской тарелкой, накрытой небом, как миской. Древние греки поняли, что мир круглый. Они создали сложную теорию, согласно которой Земля является сферой, окруженной целым рядом других сфер, несущих Солнце, Луну и планеты. На самой далекой сфере укреп-

лены неподвижные звезды, которые вращаются на небе как единое целое, так что их положение сохраняется неизменным. Эта модель с центральным положением Земли была принята и христианской церковью. Она выглядела очень привлекательно, поскольку оставляла место за пределами звездной сферы и длярая, и дляада. Такая модель пользовалась признанием вплоть до XVI в., пока наблюдения Г. Галилея не доказали, что ее необходимо заменить на модель Коперника, в которой Земля и другие планеты обращаются вокруг Солнца. Модель Коперника избавилась не только от всех сфер, но и показала, что "неподвижные" звезды должны находиться на огромных расстояниях от нас, поскольку они практически не сдвигаются с мест на небе при годовом движении Земли вокруг Солнца. Все видимое движение звезд связано с вращением Земли вокруг собственной оси.

Со временем поняли, что *звезды* – это "плазменные шары", подобные нашему Солнцу, но находящиеся гораздо дальше. В звездах сосредоточена основная масса видимого вещества видимой части Вселенной. В настоящее время **общепризнано** то, что в галактикам и звездам свойственна эволюция. *Вселенная – это динамическая система*, заполненная эволюционирующими космическими объектами, где все постоянно меняется: звезды появляются, растут и "умирают"; создаются облака газа и пыли, образуются галактики, все находится в движении.

Но так было не всегда. Долгое время предполагалось, что звезды распределены практически равномерно в бесконечной Вселенной, хотя такое предположение приводило к некоторым трудностям в теории Ньютона, которые выглядели как парадоксы. Например, если согласно теории гравитации Ньютона каждая звезда притягивается всеми другими звездами во Вселенной, то почему они не соберутся вместе? Было показано, что бесконечное распределение звезд не может оставаться статическим: если все они притягиваются друг к другу, то должны сближаться – *гравитационный парадокс*. Другой парадокс состоит в том, что если в бесконечной Вселенной существует бесконечное множество звезд, то небо было бы сплошь усеяно ими и имело бы такую яркость, что даже Солнце на этом фоне казалось бы черным пятном – *фотометрический парадокс*.

Тем не менее в классической ньютоновской космологии считалось, что пространство и время Вселенной абсолютны и беско-

нечны, однородны и изотропны, а Вселенная стационарна и существует сама по себе. Вера в такую статическую Вселенную была настолько сильной, что даже А. Эйнштейн, основываясь на общей теории относительности, построил космологическую модель Вселенной, в которой Вселенная *стационарна и время ее существования бесконечно*, т.е. не имеет ни начала, ни конца, пространство безгранично, но конечно. Для этого ему пришлось в уравнения теории ввести так называемый космологический член, который приводил к отталкиванию между телами, находящимися на большом расстоянии, чтобы избежать коллапсирования (схлопывания). В такой Вселенной ее можно облететь всю, двигаясь в одном и том же направлении, но так и не пересечь границу.

## 8.2. Расширяющаяся Вселенная

В начале 20-х годов XX в. А. Фридман, используя уравнения Эйнштейна, построил другую математическую модель, описывающую вещество и геометрию Вселенной в целом. Результат, полученный им, был совершенно неожиданным: оказалось, что согласно общей теории относительности Вселенная не может быть стационарной, она должна либо *сжиматься*, либо *расширяться* с течением времени. В этой модели Вселенная одинакова в каждой точке пространства и во всех направлениях, так как в ней были заложены предположения о крупномасштабной однородности и изотропности распределения вещества. Это было столь неожиданно, что А. Эйнштейн не сразу согласился с выводами Фридмана.

Существует три нестационарные модели Вселенной. В одной из них галактики удаляются друг от друга "достаточно медленно" (гравитационная энергия преобладает над кинетической энергией разлета), так что гравитационное притяжение между ними в конце концов должно остановить их разбегание и заставить галактики сближаться. Такая Вселенная будет расширяться до некоторого максимального размера, а затем начнет сжиматься – *модель пульсирующей Вселенной*. В этой модели Вселенная конечна, но безгранична; она не имеет начала (*замкнутая Вселенная с положительной кривизной пространства*). Такую Вселенную, в принципе, можно облететь, двигаясь все время в одном и том же направлении (подобно земным кругосветным путешествиям). Она похожа на четырехмерную сферу с изменяющимся радиусом. Поэтому объем ее конечен, но в то же время она не имеет границ,

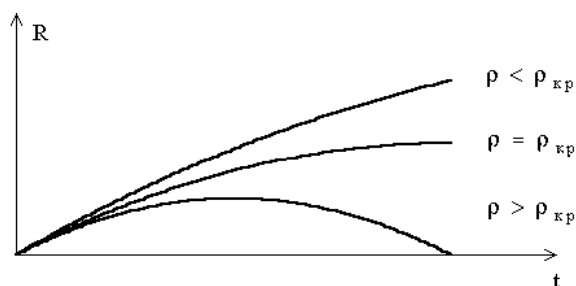


Рис. 8.2. Зависимости расстояния между двумя галактиками от времени для различных моделей Вселенной

т.е. безгранична, как не имеет их поверхность любой сферы.

Во второй модели галактики разбегаются настолько быстро, что гравитационные силы никогда не смогут остановить их, поскольку кинетическая энергия разлета превышает энергию притяжения. Такая *Вселенная будет вечно расширяться. Это модель бесконечной незамкнутой Вселенной с отрицательной кривизной пространства.*

В третьей модели скорость разбегания галактик равна некоторому минимальному значению (энергия гравитации уравновешивается кинетической энергией разлета), которое еще позволяет избежать сжатия Вселенной; ее расширение замедляется все сильнее и сильнее, хотя продолжается неограниченно долго. В этой модели Вселенная также *бесконечна, но ее пространство евклидово* (нулевая кривизна пространства).

Какая из рассмотренных моделей реализуется, зависит от отношения между плотностью массы Вселенной  $\rho$  и *критическим значением плотности*  $\rho_{кр} = 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. Если  $\rho > \rho_{кр}$ , то реализуется первая модель замкнутой Вселенной; если  $\rho < \rho_{кр}$  – то вторая, а при  $\rho = \rho_{кр}$  – третья. На рис. 8.2 показаны зависимости расстояния между галактиками от времени для каждой из рассмотренных моделей.

Во всех этих моделях, как видно из рис. 8.2, время имеет край (границу), откуда началось расширение. Какая из моделей соответствует нашей действительности, зависит от *средней плотности массы Вселенной*  $\rho$ . Та масса во Вселенной, которая непосредственно доступна нашим наблюдениям, приводит к  $\rho = 3 \cdot 10^{-31}$  г/см<sup>3</sup>  $\ll \rho_{кр}$ , что соответствует второй модели. Однако имеются косвенные указания, что во Вселенной присутствует еще и масса, которую мы не видим – *скрытая масса*. Это черные дыры, остывшие звезды или еще не открытые элементарные

частицы и т.п. На роль скрытой массы претендуют, например, нейтрино, который, как предсказывают современные теории, является самой распространенной частицей во Вселенной: на каждый протон приходится примерно один миллиард нейтрино. В настоящее время осуществлены опыты, которые указывают на то, что нейтрино имеет массу покоя, хотя до этого он считался безмассовой частицей, как и фотон. Если данные опытов подтвердятся, то средняя плотность Вселенной окажется больше критической и в далеком будущем ее расширение должно смениться сжатием и возвращением в сингулярное состояние. Таким образом, проблема скрытой массы во Вселенной является одной из самых актуальных проблем современной физики. С учетом скрытой массы, которую пока удалось оценить с достаточно большой вероятностью, в настоящее время принято считать, что  $\rho = (0.1 - 1)\rho_{кр}$ . Эти данные указывают на то, что наша Вселенная весьма близка к евклидову пространству с нулевой кривизной. Но этот вопрос все еще остается открытым.

В 1929 г. американский астроном-наблюдатель Э. Хаббл доказал, что *Вселенная расширяется*. Он обнаружил *красное смещение* спектральных линий в спектрах галактик, объяснил его эффектом Доплера, обусловленного разбеганием галактик, и определил скорости, с которыми они разбегаются. Он показал, что *скорость удаления галактик от наблюдателя прямо пропорциональна расстоянию между ними*:  $v = HR$ , где  $R$  – расстояние,  $H$  – постоянная Хаббла. Это утверждение верно для всех галактик, т.е. постоянная Хаббла в каждый момент времени одинакова во всей Вселенной, но, вообще говоря, она меняется со временем. В настоящее время она считается равной  $75 \text{ км} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ . В какой бы галактике мы не находились, остальные будут от нас удаляться с большой скоростью, а скорость самых дальних из них может приблизиться к скорости света.

Итак, мы живем в *расширяющейся Вселенной*. Расширение проявляется на уровне галактик, и не существует центра, от которого галактики разбегаются. Будущее Вселенной зависит от ее средней плотности. Чтобы понять, что представляет собой это расширение, рассмотрим простую аналогию на примере двумерного пространства, хотя следует не забывать, что она не полная. Представим воздушный шарик, на поверхность которого нанесено много точек. Шарик условно изображает Вселенную, его двумер-



ная искривленная поверхность – двумерное пространство, а точки – галактики, содержащиеся во Вселенной. Когда мы надуваем шарик, расстояния между точками увеличиваются. Если теперь представить, что мы находимся на одной из них, все остальные точки будут удаляться от нас все дальше и дальше.

Расширение Вселенной очень похоже на приведенный пример: в какой бы галактике ни оказывался наблюдатель, все остальные будут удаляться от него. Применительно ко Вселенной три обычных измерения расширяются в четырехмерном пространстве-времени, где четвертое измерение – это время. С течением времени три пространственных измерения увеличивают свою протяженность. Скопления галактик, неразрывно “скрепленные” с расширяющимся пространством, все время удаляются друг от друга. Поэтому говорят, что разбегание галактик обусловлено расширением пространства с течением времени. Однако не надо думать, что вследствие расширения Вселенной расширяется все на свете. Галактики разбегаются, но сами они не расширяются; не расширяются и отдельные звезды. Гравитационно связанные тела – галактики, звезды, Земля – не подвержены космологическому расширению.

Если проследить за этим процессом в обратном направлении, то мы увидим, что в некоторый момент времени в прошлом все расстояния между объектами Вселенной обратятся в нуль (см. рис. 8.2). Этот момент и называют *началом расширения Вселенной*. Определить его можно, используя закон Хаббла. Перепишем его в виде  $R/v = 1/H$ . Если  $R$  – расстояние от наблюдателя до выбранной галактики, то  $R/v$  означает время  $\tau$ , за которое галактика успела удалиться на расстояние  $R$ . Учитывая однородность и изотропность Вселенной, можно применить эту формулу для любой пары галактик, и, взяв постоянную Хаббла равной  $75 \text{ км} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ , получаем  $\tau = 1/H \simeq 13 \cdot 10^9$  лет. Конечно, эта цифра приближительна, так как сама постоянная Хаббла изменяется со временем. Поэтому, говоря о возрасте Вселенной, часто приводят цифру 10–20 млрд лет. Для сравнения: возраст шаровых звездных скоплений в Галактике оценивается 10-14 млрд лет, т.е. лишь немногим меньше возраста Вселенной. Возраст Земли заведомо меньше времени, прошедшего от начала расширения –  $5 \cdot 10^9$  лет.

Теория Фридмана также предсказывает, что 10-20 млрд лет назад, вблизи момента начала расширения, плотность вещества во Вселенной была гораздо больше, чем сегодня. Отдельные звезды и галактики не могли существовать как изолированные тела. Вся

материя находилась в состоянии непрерывно распределенного однородного вещества. Лишь позже, в ходе расширения, оно распалось на отдельные "комки", что привело к образованию отдельных небесных тел.

Общая теория относительности приводит к тому, что в момент начала расширения Вселенная существовала *в бесконечно малом объеме и имела бесконечно большую плотность*, или, как говорят, существовала в виде *сингулярности*. При этом она была *очень горячей*. Вселенная начала *расширяться* (существовать) с момента, который называют **Большим взрывом**. Большой взрыв – уникальное явление, не имеющее аналогов в физике, не зря его еще называют особой точкой. По сути дела, это некое первичное событие, знаменующее начало нашей Вселенной. Оно относится к числу самых неожиданных результатов, когда-либо полученных наукой. Некоторые в этом усматривают триумф библейского варианта сотворения мира.

Мы не будем здесь обсуждать, как и почему произошел Большой взрыв, поскольку на этот вопрос еще нет однозначного ответа, но отметим, что Большой взрыв совсем не похож на известные нам обычные взрывы. Он качественно отличается от них, его объяснение требует привлечения необычных квантовых представлений, которые имеют место при больших плотностях вещества. Ученым удалось теоретически проследить (достаточно достоверно) за развитием Вселенной, начиная с малых долей первой секунды Большого взрыва. На меньших временах теория Фридмана "не работает", так как в сингулярности кривизна пространства-времени становится бесконечной, а сами понятия пространства и времени, как мы их представляем, теряют смысл. Здесь необходимо использовать квантовую теорию гравитации, которая пока не создана.

В 1965 г. А. Пензиасом и Р. Вилсоном совершенно случайно было обнаружено слабое космическое микроволновое электромагнитное излучение, равномерно заполняющее всю Вселенную – *реликтовое излучение*, хотя теоретически оно было предсказано еще в 1953 г. Г. Гамовым. Это очень важное событие в истории космологии. Реликтовое излучение – это удивительное космическое явление, которое воспринимается как слабый фоновый радишум, приходящий из космоса независимо от направления антенны. По современным данным температура космического излучения 2,73 К. Если измерять на одной и той же длине волны интенсивность реликтового излучения, приходящего к нам с разных направлений,

то в пределах точности измерений она оказывается практически одинаковой. Это доказывает, что расширение Вселенной происходило и происходит изотропно. *Вселенная прозрачна для реликтового излучения*, которое приходит к нам с огромных расстояний. Расчеты показывают, что число фотонов реликтового излучения составляет  $500 \text{ фот/см}^3$ , т.е. эти кванты во Вселенной распространены гораздо больше, чем обычное вещество ( $1 \text{ атом/м}^3$ ).

Реликтовое излучение не возникло в каких-либо источниках, подобно свету звезд или радиоволнам, а существовало с самого начала расширения Вселенной. Оно возникло в том горячем веществе Вселенной, которое начало расширяться с момента Большого взрыва, и является наглядным следом событий, связанных с Большим взрывом. В нем содержится информация о свойствах Вселенной в точках, разнесенных очень далеко друг от друга в пространстве. *Существование реликтового излучения доказывает, что на ранних стадиях расширения Вселенная была горячей, а вещество и излучение находились в термодинамическом равновесии.*

### **8.3. Горячая Вселенная**

В эволюции Вселенной от момента Большого взрыва до наших дней выделяют три периода: *первую секунду, первый миллион лет* и все *остальное время*. Время отсчитывают от момента, когда плотность материи была бесконечной.

*Первый период* называют "*очень-очень ранней Вселенной*", когда Вселенная была необычайно плотная и горячая. Моменту времени  $0,01 \text{ с}$  от Большого взрыва соответствовала температура  $10^{11} \text{ К}$ ; в конце первой секунды температура снизилась (за счет расширения) до  $10^{10} \text{ К}$ . Вся материя в конце первой секунды существовала в виде фотонов, электронов, позитронов, нейтрино, протонов, нейтронов и их античастиц; все это образовывало своеобразный "суп" плотностью, в миллиарды раз большей плотности воды. На ранних стадиях этого периода основную долю массы физической материи составляло излучение, при этом вещество, представленное элементарными частицами, находилось в динамическом (тепловом) равновесии с ним. Частиц и античастиц было примерно поровну, и с равной вероятностью шли процессы рождения пар и аннигиляции. Но уже к концу первой секунды из-за остывания Вселенной начинают преобладать процессы аннигиля-

ции, и доля излучения возрастает. Если бы с самого начала взрыва частиц и античастиц было поровну, то вследствие аннигиляции во Вселенной не осталось бы в конечном счете ничего, кроме фотонов и нейтрино. Однако, как показывают расчеты, на  $10^8$  частиц приходилось 99 999 999 античастиц. Поэтому во Вселенной, кроме фотонов и нейтрино, существует вещество, из которого построены галактики, звезды, планеты и т.п.

Следующий период – *эра плазмы* – охватывает, примерно, первый миллион лет. Здесь вещество представляло собой ионизированную плазму, непрозрачную для реликтового излучения. Наиболее важными считаются первые несколько минут, в течение которых шел процесс образования самых легких атомных ядер – дейтерия и гелия. К концу 5-й минуты вещество уже состояло примерно на 30 % из ядер атомов гелия и на 70 % из протонов. Через 5 мин температура упала настолько, что реакции ядерного синтеза временно прекратились, поэтому ядра остальных элементов возникнут значительно позднее. В конце этого периода температура Вселенной снизилась до 4000 К и возникли условия, благоприятные для образования атомов водорода; начался третий период. Детальное описание первых трех минут дано в книге С. Вайнберга "Первые три минуты" (М.: Энергоиздат, 1981).

Третий период называют *эрой "прозрачной Вселенной"*. В начале этого периода произошло разделение вещества и излучения. Плазма превратилась в нейтральное вещество. С этого времени подавляющее большинство реликтовых фотонов движется по прямой, уже не взаимодействуя с атомами. Поэтому когда мы наблюдаем реликтовое излучение, то как бы заглядываем в столь далекое прошлое Вселенной, когда в ней происходили процессы рекомбинации – захват электронов атомными ядрами. Вместо плазмы Вселенную теперь заполняло гигантское облако газа, состоящего из атомов водорода и гелия; плотность облака была в начале этого периода примерно  $10^{-21}$  г/см<sup>3</sup>. После образования облаков из атомов водорода и гелия во Вселенной начинают формироваться галактики и звезды. Под действием сил тяготения вещество собирается в сгустки, при сжатии этих сгустков температура повышается и приближается к  $10^7$  К. Снова становятся возможными термоядерные реакции. Благодаря энергии, выделяющейся в этих реакциях, сила давления в недрах звезд повышается настолько, что уравнивает силу тяжести. Дальнейшее сжатие прекра-

щается, и устанавливается равновесие. В этом равновесном состоянии звезда может пребывать очень долго – пока весь водород в ходе термоядерной реакции не превратится в гелий. Для звезды типа нашего Солнца эта стадия может длиться около 10 млрд лет. В более массивных звездах температура выше, и они сгорают быстрее – за миллионы лет. За такой срок в недрах звезд проходят медленные ядерные реакции, которые не успели пройти за первые секунды в начале эволюции Вселенной. В этих реакциях образуются элементы более тяжелые, чем гелий.

Время жизни массивных звезд – десятки миллионов лет. Поэтому те из них, которые образовались в первый миллиард лет истории Вселенной, уже давно закончили свой путь, обогатив мир тяжелыми элементами. Солнце и планеты, включая Землю, сформировались значительно позже из вещества, оставшегося от массивных звезд первого поколения. Происходило это около 5 млрд лет тому назад, или примерно 15 млрд спустя после Большого взрыва. Можно сказать, что звездное небо, каким мы его видим, – это итог работы гравитационных сил в течение многих миллиардов лет.

Говорят, что Вселенная имеет *горизонт видимости*. Чем дальше от нас находится галактика, тем больше времени потребовалось свету, чтобы достичь наблюдателя. Свет, который сегодня достигает наблюдателя, покинул галактику в эпоху прозрачной Вселенной. Свет, вышедший в момент начала расширения мира, успел пройти лишь конечное расстояние во Вселенной –  $(3-6) \cdot 10^9$  Мпк. Точки пространства Вселенной, лежащие от нас на этом расстоянии, называют *горизонтом видимости*. Области Вселенной, лежащие за горизонтом, сегодня принципиально ненаблюдаемы. Таким образом, мы видим ограниченную часть Вселенной с радиусом 10–20 млрд световых лет. Вблизи самого горизонта мы должны видеть вещество в далеком прошлом, когда его плотность была гораздо больше сегодняшней; отдельных объектов тогда еще не было, а вещество было непрозрачно для излучения. Горизонт образовался в момент, когда Вселенная стала прозрачной.

Таким образом, общая теория относительности неизбежно приводит к выводу о существовании *сингулярного состояния Вселенной* в прошлом – состояния с бесконечной плотностью вещества. Она не объясняет, почему началось расширение, откуда в веществе, из которого потом образовались звезды и галактики, взялись

начальные скорости расширения. По-видимому, это связано с тем, что эта теория классическая, а не квантовая. Поэтому фридмановская модель применима для описания развития Вселенной от долей секунды после начала расширения и в течение всего последующего времени. Физики надеются, что квантовая теория сможет описать и то, что называют сингулярностью. И здесь физика мегамира смыкается с физикой микромира, с физикой элементарных частиц.

Сингулярность, от которой начала расширяться Вселенная, называется *космологической сингулярностью* в отличие от сингулярности в черных дырах. Они во многом похожи, но имеются существенные различия. Во-первых, *космологическая сингулярность относится ко всей Вселенной*, а не к какой-то ее части, как в случае черных дыр. Во-вторых, космологическая сингулярность лежит не в конце процесса сжатия, а в начале процесса расширения. Это очень существенно. Сингулярность в черных дырах мы извне увидеть не можем, она никак не влияет на события во Вселенной вне черной дыры. *Космологическая сингулярность явилась истоком всех процессов в расширяющейся Вселенной*. Все, что мы видим сегодня, есть следствие космологической сингулярности, поэтому мы можем изучать ее по наблюдаемым следствиям.

А что было до сингулярности? Было ли сжатие вещества, и текло ли время или нет? Окончательного ответа на эти вопросы нет. Большинство специалистов считают, что никакого сжатия не было и космологическая сингулярность является истоком времени в том смысле, как и сингулярность в черных дырах является концом "ручейков времени". Это означает, что в космологической сингулярности время тоже распадается на кванты и, возможно, сам вопрос: "Что было до того?" – теряет смысл. Но подчеркнем, что теории о природе сингулярности, в том числе и о свойствах времени в ней, в принципе, проверяются наблюдениями и физическими экспериментами. Таким образом, проблема истоков времени является объектом физического и астрофизического исследования, а не пустыми домыслами и рассуждениями. Рассмотренную модель часто называют *стандартной моделью Вселенной*. Она не является единственной, но считается наиболее общепринятой. Здесь еще имеется много открытых вопросов.

#### 8.4. Антропный принцип и эволюция Вселенной

В настоящее время ученые не сомневаются, что устройство Вселенной определяется свойствами составляющих ее микрочастиц. Но невозможно до конца понять сущность Вселенной, не поняв, какое место в ней занимает *жизнь*, включая в том числе и человека, как высшую форму ее проявления. Поскольку направленность развития считается данностью, которая изначально присуща материи, то появление разума во Вселенной, по-видимому, должно иметь какой-то смысл. Поэтому человек давно пытается найти ответы на такие вопросы, как, например: “Значит ли что-нибудь в этом огромном мире маленький человек?”, “Кто он – цель развития Вселенной, венец Творения или что-нибудь случайное, ничем, в принципе, не отличающееся от остальных объектов природы?”, “Является ли появление человека итогом развития Мироздания или это какой-то случайный поворот?”

Долгое время наука не располагала фактами для того, чтобы ответить на эти вопросы аргументированно. Сведения о мире, которыми она располагала, были фрагментарными, общая картина развития Вселенной не просматривалась. Теперь мы уже в состоянии говорить о научной картине мира, о целостном взгляде на Вселенную, хотя многого не знаем и еще не способны дать исчерпывающего ответа. Эти вопросы потому и называются *вечными*, что на них нельзя ответить раз и навсегда.

С другой стороны, математическая формулировка целого ряда законов природы включает в себя параметры, которые не определяются в теории, а принимаются как данность. Некоторые из них получили статус *мировых фундаментальных постоянных* из-за их фундаментального характера. К их числу относятся: *заряд электрона* ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), *постоянная Планка* ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с), *скорость света в вакууме* ( $c = 3 \cdot 10^8$  км/с), *гравитационная постоянная* ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>), *масса электрона* ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг) и *протона* ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг). Они получены экспериментальным путем и независимо. Некоторые их безразмерные комбинации также имеют универсальное значение, хотя бы потому, что они определяют безразмерные константы четырех фундаментальных взаимодействий. Например, отношение  $e^2/hc = 1/137$ , называемое *постоянной тонкой структуры*, характеризует “силу” электромагнитного взаимодействия (по отношению к ядерному), а  $Gm_p^2/hc = 10^{-39}$  характеризует “силу” гра-

витационного взаимодействия. Оказывается, существует только очень **узкая область изменения** этих величин, в которой возможно существование сложных структур вплоть до живых систем.

*Гравитационная постоянная* определяет размеры звезд, температуру и давление в них, влияющие на ход реакций. Если бы она была чуть меньше, звезды были бы недостаточно горячими для протекания в них ядерных реакций; если чуть больше, звезды превзошли бы "критическую массу" и обратились бы в черные дыры, выйдя из круговорота материи. В стандартной модели скорость расширения Вселенной и силы тяжести согласованы друг с другом с точностью  $1 : 10^{55}$ . Если бы расширение Вселенной происходило быстрее, то галактики и звезды не образовались бы – не создались условия для жизни. Если бы этот процесс протекал медленнее, то Вселенная пережила бы коллапс еще до образования хотя бы одной звезды.

*Постоянная сильного взаимодействия* определяет ядерный заряд в звездах. Если ее изменить, цепочки ядерных реакций не дойдут до углерода и азота. Если бы ядерные силы были всего на 0,3 % больше или на 2 % меньше, то никакой жизни бы не возникло.

*Постоянная электромагнитного взаимодействия* определяет конфигурацию электронных оболочек и прочность химических связей; ее изменение делает Вселенную мертвой.

Перечень подобных следствий можно продолжить. Итак, *существуют очень узкие "рамки" в выборе подходящих значений фундаментальных постоянных, допускающих существование знакомой нам Вселенной, включая и саму жизнь.*

Создается впечатление, что природа с очень высокой точностью "подогнала" большое число представляющихся нам независимыми параметров, а выход за пределы этих "рамок" закрывает возможность протекания в системе процессов нарастания сложности и упорядочения вещества. Либо надо признать случайность такого совпадения. Совокупность таких многочисленных "случайностей" называют **тонкой подстройкой Вселенной**. Не менее удивительные совпадения встречаются и при рассмотрении процессов, связанных с возникновением и развитием жизни. Вероятность каждого подобного совпадения мала, а уж совместное их существование и вовсе невероятно.

*По-видимому, все это говорит о том, что в самой струк-*



*туре законов природы скрыт какой-то важный принцип. Его математическая формулировка пока неизвестна, известны лишь некоторые следствия этого принципа. В конечном счете все известные законы природы объединяет один всеобщий закон: человек должен появиться.*

В связи с этим и был сформулирован методологический принцип, получивший название **антропного** или **антропоцентрического принципа**. Различают *слабый* и *сильный* варианты.

*Слабый вариант: наше положение во Вселенной (как во времени, так и в пространстве) является привилегированным в том смысле, что оно должно быть совместимым с нашим существованием в качестве наблюдателей (живых, мыслящих существ).* Можно встретить и такую формулировку: *физическая Вселенная, которую мы наблюдаем, представляет собой структуру, допускающую наше присутствие как наблюдателей.* Этот принцип говорит о том, что при разработке теорий необходимо изначально учитывать наблюдателя (человека). Явления должны рассматриваться с учетом влияния на них человека. Применительно к космическим теориям это означает, что не надо создавать теорий, вообще не допускающих существование наблюдателей. В этом смысле антропный принцип играет как бы роль “фильтра” или ограничителя для возможных теорий. Однако согласно сегодняшним представлениям этот фильтр практически ничего не пропустит. Действительно, если рассмотреть совокупность всех мыслимых космосов с различными законами природы, различными мировыми постоянными и разнообразными граничными и начальными условиями, то часть тех, в которых могла возникнуть жизнь на основе углерода, будет очень мала. Рассмотренные выше примеры тонких согласованностей показывают, в каких узких границах значений констант вообще возможна жизнь.

Антропный принцип обращает внимание на то, что *возможность для жизни тесно связана с законами природы и обще-космическим развитием*, и их развитие нельзя рассматривать и понимать независимо от последних. Согласно антропному принципу разум является естественным и закономерным космическим фактором, ускоряющим, с определенного этапа, развитие Вселенной. Это отражает единство сознания и материи, их цельность и неразрывность. Наиболее отчетливо это проявляется, когда от созерцания человек переходит к творению окружающего мира.

Сильный вариант антропного принципа: *законы физики, которые управляют Вселенной, должны быть такими, чтобы в ней на некотором этапе эволюции допускалось существование человечества (наблюдателей)*, т.е. наблюдатели могут появиться только при *определенных значениях физических констант и при определенных физических законах*. Поэтому можно сказать, что *наша Вселенная такая, какая она есть, именно потому, что в ней существуем мы*, или, как более тонко заметил известный астрофизик А. Зельманов: "... мы являемся свидетелями природных процессов определенного типа, потому что процессы иного типа протекают без свидетелей". (Цит. по кн.: Комаров В.Н. По следам бесконечности, 1974.)

В такой формулировке антропный принцип декларирует *возникновение жизни как необходимое свойство Вселенной*. Но сильный вариант антропного принципа не сводится к перечислению условий, несовместимых с жизнью, он только фиксирует необходимые условия для ее возникновения, как бы подчеркивая выделенность, особенность нашей Земли, исключительность положения человечества во Вселенной. Он отражает идею обусловленности появления жизни и наблюдателя глобальными свойствами Вселенной, которые критичны к численным значениям ряда фундаментальных физических постоянных – даже небольшое их изменение влечет далеко идущие следствия, которые делают проблематичным само существование человечества. Сама Вселенная и процессы, происходящие в ней, определяют значения этих констант и их соотношения.

С точки зрения антропного принципа наше пространство трехмерно, потому что в нем существуем мы. В пространстве другого числа измерений, если оно и существует, жизнь, подобная нашей, невозможна. Конечно, антропный принцип не объясняет, почему реальное пространство трехмерно, он лишь подчеркивает важность трехмерности для существования всего, что есть во Вселенной.

Проследим элементы тонкой подстройки в процессе эволюции Вселенной. По современным представлениям Вселенная ограничена во времени и в пространстве, т.е. возраст ее конечен (10–20 млрд лет), объем тоже. Количество частиц оценивается огромным, но конечным числом  $N = 10^{80}$ . Вселенная стартовала с сильно сжатого и горячего состояния, начальный радиус кривизны был

близок к нулю. С тех пор Вселенная непрерывно расширяется, как надуваемый воздухом шарик, а "заполняющие" ее галактики удаляются друг от друга. Материя, пространство и время взаимосвязаны, они начались вместе.

В первые моменты температура была столь велика, что никаких устойчивых структур не могло образоваться. Даже элементарные частицы непрерывно превращались друг в друга. По мере расширения температура падала и стали образовываться стабильные частицы – электроны, протоны, нейтроны. Это первая структура, и с ее появлением связано первое *удивительное* обстоятельство. В первоначальном кипящем котле *частиц и античастиц было поровну*, а при остывании *симметрия нарушилась*, и *число частиц оказалось чуть больше, чем античастиц*. Поэтому аннигиляция вещества не оказалась полной, не вся материя превратилась в свет. Расчеты показывают, что в свет не превратилась одна миллиардная часть частиц. При дальнейшем остывании образуются атомы простейших элементов – водорода и гелия. Для их существования необходим стабильный протон. Известно, что массы протона и нейтрона несколько отличаются: примерно на две с половиной массы электрона. Более тяжелый нейтрон живет всего 16 мин, распадаясь затем на протон, электрон и электронное нейтрино. Внутри ядер идет и обратная реакция, поэтому нейтроны существуют в состоянии динамического равновесия. Если бы *нейтрон был чуть легче, то протон распадался бы на позитрон, нейтрон и электронное нейтрино, и водорода, который является главным топливом звезд, не было бы*.

Но образование простейших атомов – водорода и гелия – все же произошло. Они синтезировались, а для синтеза ядер более тяжелых элементов требуются уже специальные условия – для этого нужны простейшие стабильные ядра как исходный материал и высокие температуры, при которых эти ядра могут слиться. Причем эти температуры должны держаться миллиарды лет, так как термоядерные реакции идут медленно. Но за сотни тысяч лет Вселенная уже оказалась в состоянии, напоминающем современное. Такие условия благоприятны для существования атомов, но не годятся для синтеза их ядер.

Таким образом, *условия устойчивости атомов и синтеза ядер несовместимы*. Чтобы процесс усложнения, т.е. формирование более сложных структур, пошел дальше, необходимо, что-

бы Вселенная потеряла пространственную однородность. Это происходит за счет сил гравитации. В газе возникают сгущения – прообразы будущих галактик. Они, в свою очередь, дробятся на еще более мелкие сгущения — протозвезды. Гравитация должна “успеть” сформировать звезды, пока Вселенная не слишком расширилась. По мере уплотнения протозвезды температура в ней растет, пока начавшиеся термоядерные реакции, сопровождающиеся выделением энергии, не остановят сжатие.

Первые звезды состояли из *водорода* – так произошло потому, что протоны легче, чем нейтроны, их было больше и они не были все истрачены целиком на образование гелия. Гелиевые звезды были бы очень горячими и жили бы недостаточно долго, чтобы на их планетах могла возникнуть биологическая эволюция. В недрах звезд идут превращения – ядра легких элементов, сталкиваясь, слипаются в ядра более тяжелых. И здесь оказывается, что процесс усложнения обусловлен весьма *тонкой подстройкой ядерных и электромагнитных взаимодействий*. Без этой подстройки цепочка реакций, ведущая от гелия через углерод и кислород к железу и далее, могла бы оборваться на первых звеньях. Совсем незначительное увеличение взаимодействия привело бы к тому, что ядра водорода во Вселенной были бы истрачены уже в ходе Большого взрыва.

Когда звезда достаточно обогащается тяжелыми элементами, она взрывается с резким увеличением светимости (вспышка Сверхновой) и сбрасывает большую часть своей массы. Из этого “праха” формируются звезды нового поколения, еще более богатые тяжелыми элементами и т.д. Космологи установили, что наше Солнце принадлежит к четвертому поколению звезд. Средний срок жизни звезды около 3 млрд лет, но этого времени не хватает для биоэволюции (возраст Земли 5 млрд лет). Наше Солнце принадлежит к довольно редкому типу долгоживущих звезд.

Таблица Менделеева “появилась на свет” в том порядке, в каком стоят в ней элементы. Дальнейший процесс усложнения идет через образование молекул, а неограниченный характер этого процесса обеспечивается наличием такого удивительного элемента, как *углерод*. На его основе могут возникать цепи молекул огромной длины. Углерод для этого идеально приспособлен. Он четырехвалентен, и углы между его валентными связями равны 90°; атомы углерода, цепляясь друг за друга, как бы образуют “строч-

ки”, а на оставшиеся две валентности ”салятся” другие атомы и молекулы – возникает нечто вроде ”надписи”. Образно можно сказать, что весь космический процесс до образования цепей углерода был как бы процессом формирования букв; далее буквы-атомы начинают объединяться в слова-молекулы.

Чем дальше идет процесс усложнения структур, тем жестче становятся условия их протекания. Ядра не распадаются до температур в миллиарды градусов, атомы не выдерживают даже нескольких тысяч, у молекул речь идет уже о сотнях градусов. Температура – это мера хаоса, а хаос, как известно, враг структуре. Но процесс организации не может обойтись без хаоса, поскольку ему нужна энергия, а именно тепло ее и дает. Этот процесс зажат между двумя полюсами – жары и холода: перегреться – значит развалиться, переохладиться – значит застыть. На уровне возникновения жизни это общее противоречие процесса усложнения становится настолько острым, что *для существования жизни на основе органических молекул остается очень узкий интервал температур*. Точно он не известен, но это всего лишь десяток-другой градусов. То, что этот интервал температур существует, не является чем-то само собой разумеющимся. Его существование обеспечивается **тонкой настройкой законов природы**.

Но одной принципиальной возможности еще мало, необходимо место, где эта возможность смогла бы превратиться в действительность. Где найти такое место, где бы на протяжении миллиардов лет поддерживалась температура  $+20 \pm 15^0$  С, где была бы вода в свободном состоянии (ведь только в ней можно сварить этот ”суп”), не было бы убийственной ультрафиолетовой радиации и т.п.? Здесь уже дело не в законах природы, а в конкретном совпадении. Условия на Земле как нельзя лучше подходят для жизни. Но малейшее ее перемещение относительно Солнца уже грозит жизни катастрофой. Если расстояние Земля – Солнце увеличить, то понижение температуры будет лавинообразным. Напротив, незначительное приближение к Солнцу, небольшое первоначальное повышение температуры также может закончиться ее скачком; условия на Земле станут почти как на Венере. Уникальное положение Земли оставляет мало надежд на то, что где-либо в обозримой близости может найтись вторая такая планета.

Почему происходит усложнение материи? Это важнейший во-

прос естествознания, на который окончательного и полного ответа нет. Как оно происходит, в какой-то мере начинает прояснять синергетика. Законы физики, содержащие фундаментальные постоянные, подтверждают наиболее вероятные пути зарождения жизни.

**Основные понятия и термины, которые необходимо знать:**

большой взрыв, галактика, Метагалактика, реликтовое излучение, сингулярность, скрытая масса, эффект Доплера.

**Контрольные вопросы**

1. Что такое космология и что она изучает?
2. Что означает расширение Вселенной?
3. Охарактеризуйте основные стадии расширяющейся Вселенной.
4. Какое излучение называют реликтовым? Что оно доказывает?
5. Имеет ли Вселенная начало?
6. Является ли Вселенная бесконечной?
7. Раскройте сущность антропного принципа, что он выражает?
8. Укажите различия слабого и сильного варианта антропного принципа?
9. Какие факты доказывают однородность Вселенной?
10. Что означает выражение "тонкая подстройка Вселенной"?
11. Перечислите мировые постоянные.

**Литература:** [21, 22, 24, 39, 65, 66].

**Дополнительная литература:** [1, 3, 6, 8, 9, 41, 43, 44, 45, 46].