

взять, с одной стороны, искусственный спутник Земли, а с другой стороны, Землю. Хотя вполне возможно обнаружить совсем незначительные изменения в относительной скорости с помощью доплеровского смещения частоты сигнала, испускаемого радиопередатчиком на Земле и ретранслируемого спутником, другие эффекты, такие, например, как обычное ньютоновское притяжение других тел нашей солнечной системы, будут смазывать наблюдаемую картину, и не исключено даже, что полностью забьют сигналы, которые несут с собой гравитационные волны, возникшие далеко за пределами нашей солнечной системы.

До сих пор никаких следов гравитационных волн обнаружено не было, и нет никаких надежд на то, что в ближайшем будущем будет достигнут успех в этом направлении, хотя в 1967 г. Вебер сообщил о некоторых наблюдениях на своем детекторе, которые могли бы быть интерпретированы как прием гравитационных волн.

19. Космология

Общая теория относительности, едва появившись на свет, стимулировала исследования в области космологии. *Космология* имеет дело со всей Вселенной в целом, она занимается ее строением и развитием. Как и любая область научного исследования, космология имеет два аспекта — наблюдательный и теоретический.

С точки зрения наблюдательной астрономии всегда интересовались крупномасштабной структурой видимых астрономических объектов. Астрономы уже давно обнаружили, что неподвижные звезды группируются в грандиозные скопления, называемые галактиками. Наша солнечная система входит в галактику, содержащую несколько сотен миллионов звезд. Не все галактики похожи друг на друга; разница между ними отражает — по крайней мере частично — различные стадии развития, начинающиеся, быть может, с первоначального объединения звездного материала в относительно небольшие структуры с последующим образованием более сложных структур (ответвлений) и исчезновением отдельных объектов, — содержащих заметное количество вполне оформившихся звезд. Некоторые галактики обнаруживают следы взрывных явлений, охватывающих большую часть галактики. Мы еще не знаем, являются ли эти галактиче-

ские взрывы нормальной стадией развития галактики или же, напротив, они представляют собой исключительное явление.

Галактики образуют скопления в том смысле, что расстояния между галактиками внутри скопления намного меньше расстояний между скоплениями. Пока что скопления галактик представляют собой самую крупномасштабную форму организации вещества, которую мы знаем. Судя по всему, скопления галактик распределены по Вселенной совершенно беспорядочным образом.

Первые космологические теории исходили из того, что отдельные звезды и отдельные галактики совершали свой жизненный цикл, у которого было свое начало и свой конец, но Вселенная в целом не изменялась и не старилась.

Согласно этим гипотезам, если бы наблюдатель мог повторять свои наблюдения, скажем, через несколько миллиардов лет, он обнаруживал бы все тот же состав звезд и галактик, грубо говоря, все с тем же распределением объектов по их типам и возрасту. Такая всеобщая стационарность состава возможна, конечно, лишь в том случае, когда существует некий механизм, который обеспечивает как возникновение новых звезд и галактик, так и исчезновение объектов, достигших конечной стадии своего развития.

Предположения о стационарности Вселенной, выдвинутые на заре развития космологии, были оставлены после того, как американский астроном Эдвин Поуэлл Хаббл (1889—1953) в конце двадцатых годов нашего столетия обнаружил, что спектральные линии отдаленных галактик и туманностей — все без исключения — обнаруживают смещение в направлении к длинным волнам, так называемое красное смещение. Красное смещение наиболее естественным образом объясняется как доплеровское смещение тел, быстро удаляющихся от нас и вообще друг от друга. Эта интерпретация подтверждается еще тем, что вплоть до самых далеких расстояний, где еще оценки оптической яркости достаточно надежны, красное смещение пропорционально расстоянию объектов от нас. Этот тип красного смещения часто называют *эффектом Хаббла* или космологическим красным смещением.

Если интерпретировать эффект Хаббла как доказательство того, что все удаленные объекты удаляются от нашей Галактики, тогда все объекты во Вселенной должны быть вовлечены в процесс рассеяния, который должен иметь своим следствием постоянно уменьшающуюся плотность вещества по Вселенной. Рассуждая «в обратном направлении по времени», можно сказать, что плотность вещества во Вселенной должна была быть в прошлом значительно больше, чем теперь. Проследив

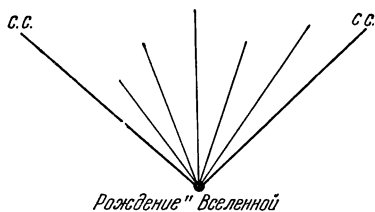


Рис. 62. Линейно расширяющаяся Вселенная.

движение отдаленных тел в обратном направлении, можно прийти к выводу, что если скорости тел раньше в течение довольно длительного периода времени были такими же, какими они являются сейчас, то момент времени, когда все вещество, которое мы в состоянии видеть сегодня, было скон-

центрировано в относительно малой области, отделен от современности промежутком времени в $2 \cdot 10^{10}$ лет. Это число называют иногда «возрастом Вселенной». Число, обратное возрасту Вселенной, — скорость рассеяния материи — в настоящее время известно как постоянная Хаббла. На рис. 62 показана связь между расхождением удаленных объектов, ограниченных пределами светового конуса (с. с.) и возрастом Вселенной.

Из эффекта Хаббла вовсе не вытекает, что некогда Вселенная испытала период катаклизма, который следовало бы назвать ее «рождением». Ничему не противоречит предположение о том, что Вселенная всегда существовала и что она всегда расширялась примерно с той же самой скоростью, как это показано на рис. 63. Не исключено также, что Вселенная проходила через чередующиеся периоды расширения и сжатия, причем эти периоды могли быть настолько затяжными, что никаких следов от того времени, когда мы наблюдаем расширение (рис. 64). К вопросам такого рода подходят, сочетая новые данные наблюдений и теоретические исследования; для уверенного ответа на вопрос, как развивалась Вселенная, нам, наверное, понадобится еще немало времени.

Несколько иной подход был предложен английскими астрофизиками Фредом Хойлем, Германом Бонди и Томасом Голдом*). Они вновь вернулись к старому представлению о том, что Вселенная как целое остается неизменной и всегда сохраняет свой вид. Но, принимая

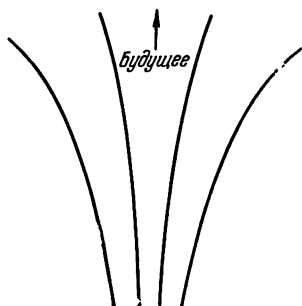


Рис. 63. Расширяющаяся Вселенная, если постоянная Хаббла действительно постоянна.

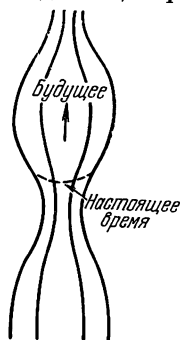


Рис. 64. Пульсирующая Вселенная.

эффект Хаббла за реальное подтверждение непрерывного рассеяния вещества, они высказали предположение, что в природе существует процесс, который ведет к непрерывному порождению вещества, причем скорость, с которой порождается вещество, как раз достаточна, чтобы компенсировать рассеяние вещества и поддерживать среднюю плотность во всей Вселенной постоянной. Эта гипотеза известна под названием «гипотезы непрерывного рождения» или «гипотезы устойчивого состояния».

Нетрудно объяснить, почему никогда не наблюдалось порождение вещества. Допустим, что это порождение происходит повсюду равномерно. Тогда следует считать, что в объеме куба со стороной 1,6 км за час порождается примерно один атом. Даже в том случае, если бы мы смогли наблюдать столь тонкое явление, как появление

* Н. Bondi and T. Gold, Monthly Notices, Roy. Astronom. Soc. 108, 252 (1948); F. Hoyle, там же, 108, 372 (1948). Отрывки из ранних работ можно найти в книге под ред. Harlow Shapley, Source Book in Astronomy, 1900—1950 (Cambridge, Mass; Harvard University Press, 1960).

одного атома, такое событие оказалось бы чрезвычайно редким. С другой стороны, можно допустить, что порождение вещества происходит только в глубинах звезд, где температура, давление и плотность вещества настолько отличаются от того, с чем мы сталкиваемся в земных условиях, что вполне возможны процессы, которые не встречались нам в привычных условиях. Если допустить порождение вещества в таких экзотических условиях, то шансы на его наблюдение все равно остаются незначительными.

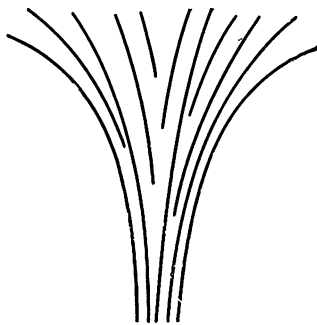


Рис. 65. «Устойчивая» Вселенная.

Рис. 65 иллюстрирует модель устойчивого состояния Вселенной по Хойлю, Бонди и Голду. Эта модель отличается от космологической модели, которая изображена на рис. 63 (так называемая модель Де Ситтера) лишь

предположением, что непрерывное порождение вещества предотвращает непрерывное уменьшение плотности вещества.

В последнее время астрономы направляли свои усилия на то, чтобы подобрать данные наблюдений, которые помогли бы сделать выбор между различными моделями Вселенной или, быть может, показали бы, что все предложенные до сих пор модели не имеют отношения к действительности. Если бы в истории развития Вселенной были периоды, в которые плотность вещества или распределение галактик различного типа были существенно отличны от того, что мы наблюдаем сейчас, то можно было бы надеяться обнаружить следы таких ранних стадий на значительных удалениях от Земли, откуда свет идет до нас несколько миллиардов лет. Заглянув достаточно далеко за пределы нашей Галактики, астрономы могут наблюдать объекты, отодвинутые в далекое прошлое и дающие представление о значительной части периода развития Вселенной (рис. 66).

Вплоть до самого последнего времени оптические наблюдения, касающиеся очень удаленных объектов, были настолько разношерстны, что не представляли особого интереса. Трудность состояла в том, что даже в самые силь-

ные телескопы были видны лишь очень яркие объекты (конечно, если речь идет о расстояниях, которые представляют интерес для космологии). Начиная с 1963 г. внимание астрономов сфокусировалось на объектах, которые, по-видимому, оказались во много раз ярче, чем обычные галактики. Речь идет о квазарах и так называемых «примазавшихся» объектах. Можно надеяться, что развитие наблюдений

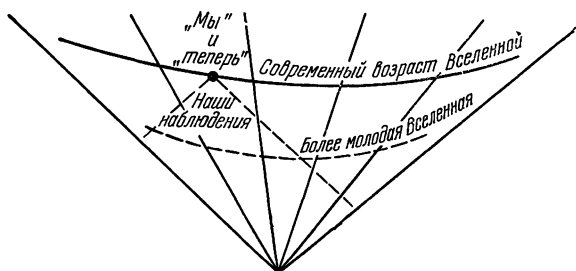


Рис. 66. *Астрономические наблюдения позволяют заглянуть назад на миллиард лет в историю Вселенной*

над этими объектами в ближайшие годы принесет нам важные космологические данные.

Еще один подход к эволюции Вселенной был предложен в 1965 г. одновременно двумя группами, одна из которых работает в Телефонной лаборатории Белла, а другая — в Принстонском университете. Предположив, что Вселенная прошла через период очень высокой плотности вещества примерно 10^{10} лет назад, следует считать, что энергия, отнесенная к одной частице на протяжении этого периода, была также очень высокой. Чрезвычайно высокая конденсация частиц, характерная для того времени, приводила к частным соударениям частиц друг с другом. В результате таких столкновений генерировалось электромагнитное излучение большой энергии и высокой интенсивности. Если Вселенная расширялась, причем расширялась на ранних стадиях развития очень быстро, плотность частиц должна была резко уменьшаться. Наконец, наступал момент, когда возникающее излучение могло пройти небольшую часть Вселенной, уже не поглощаясь и не трансформируясь за счет взаимодействия с частицами. После того как эта стадия наступила, электромагнитное излучение может уже

распространяться по Вселенной достаточно далеко, сохраняя тот вид, который оно имело при своем возникновении в тот момент, когда плотность частиц упала ниже своего критического значения. По мере того как электромагнитное излучение уходит от места своего возникновения во все более и более отдаленные части Вселенной, непрерывно продолжающееся расширение Вселенной приводит к видимому красному смещению, аналогичному гравитационному смещению, о котором шла речь выше. Это красное смещение преобразует электромагнитное излучение, возникшее на первоначальной стадии высокой плотности вещества, в обычное радиоизлучение, которое может обнаружить современный наблюдатель.

По этим соображениям принстонская группа предприняла поиски электромагнитного излучения в диапазоне сантиметровых волн (это излучение называется микроволновым; оно лежит как раз в той полосе частот, которая используется в радарной технике). Нужно было обнаружить излучение, не связанное ни с Землей, ни с атмосферой или какими-либо другими конкретными небесными телами; оно должно было наблюдаться одинаково по всем направлениям. Поиски оказались успешными, несмотря на значительные экспериментальные трудности, связанные с очень малой интенсивностью искомого излучения. Обнаруженное излучение по своей интенсивности и распределению по длинам волн соответствовало излучению, возникающему в черном теле с температурой около $3,5^\circ \text{K}$ (т. е. выше на $3,5^\circ$ абсолютного нуля); эта температура чуть ниже температуры испарения жидкого гелия при атмосферном давлении и существенно ниже температуры жидкого воздуха. Открытие группы Телефонной лаборатории Белла, которое фактически предшествовало работе принстонской группы, было до известной степени случайным, возникшим при разработке усилителей с шумами малой мощности. Так или иначе их результат и результат группы Дикке в Принстоне взаимно подтверждают друг друга.

Если последующие наблюдения не будут противоречить этим результатам, температура вещества, породившего первоначальное излучение, должна быть в том же самом отношении к современной температуре, в каком находится наблюдаемая сейчас длина волны излучения к длине волны, испущенной в момент генерации. Это отношение в свою очередь равно отношению современного возра-

ста Вселенной к возрасту Вселенной в тот момент, когда плотность частиц в расширяющейся Вселенной уже упала до критического значения, позволяющего электромагнитному излучению свободно распространяться по пространству. Используя разумные значения критической плотности и связывая ее с современной плотностью вещества во Вселенной, можно подсчитать температуру, при которой имела место первоначальная вспышка электромагнитного излучения. Она оказывается равной миллиардам градусов *). Электромагнитное излучение представляло собой тогда жесткое гамма-излучение, обладающее куда большей проникающей способностью, чем рентгеновские лучи, используемые в медицинской практике.

Если наблюдаемое слабое радиоизлучение, идущее со всех сторон на Землю, действительно соответствует составившейся первоначальной вспышке излучения, это сразу указывает на невозможность «устойчивого состояния» во Вселенной. Существование этого излучения не противоречит картине возникновения Вселенной за счет начального толчка («гипотеза большого взрыва») с последующим расширением, однако оно вовсе не исключает возможность чередующихся расширения и сжатия Вселенной, если только принять, что до современного состояния Вселенной (когда она расширяется) она проходила через стадию сжатия, в которой достигались высокая плотность вещества и весьма высокие температуры.

Что может дать общая теория относительности для решения проблем космологии? Как это ни удивительно, есть много сходства между ньютоновской и релятивистской космологией, но вместе с тем есть и одно существенное различие. Если пространственно-временная Вселенная не плоская, то она может быть конечной, не имея границ (например, поверхность сферы конечна, но границ у нее нет). В такой конечной Вселенной можно сколько угодно двигаться в любом направлении, не столкнувшись с дорожным знаком «прохода нет». Но если двигаться все время в одном и том же направлении, можно в один прекрасный день оказаться в том самом месте, откуда отправились; так будет, например, с путешественником, который движется по экватору Земли в одном направлении («на восток») и тем самым все время сохраняет направле-

*) 1 миллиард = 10^9 . (Прим. перев.)

ние движения «на восток». Вселенная может оказаться пространственно замкнутой, но бесконечной во времени, или наоборот. Все эти возможности допустимы в теории, геометрия пространства-времени в которой не является плоской.

При построении космологических моделей обычно предполагают, что в любой момент времени вся Вселенная заполнена веществом с одной и той же средней плотностью, находящимся при одном и том же среднем давлении, причем как плотность, так и давление могут изменяться по всей Вселенной с течением времени одинаковым образом. Предположение об однородности Вселенной часто именуют *космологическим принципом*. Эти средние значения плотности массы и давления подразумеваются как средние величины, полученные при усреднении по большим пространственным и временным областям, достаточно большим, чтобы включить в себя много скоплений галактик и астрономически большие периоды времени, но малые по сравнению со Вселенной в целом и ее «возрастом». Сам по себе космологический принцип не имеет ни логических оснований, ни оправдания в общей теории относительности, он опирается попросту на отсутствие каких-либо данных наблюдений, указывающих на существование пространственных или временных неоднородностей в указанных масштабах пространства и времени. Именно это и оправдывает его использование. Вполне может оказаться, что космологический принцип не отражает структуры реальной Вселенной, однако этот факт не пошатнул бы теоретических основ, на которых строятся космологические гипотезы.

Еще одно предположение, которое называют предположением об *изотропности*, имеет чисто эмпирическое основание; его смысл состоит в эквивалентности всех пространственных направлений. Хотя многие галактики не обладают сферической формой, а даже уплощены наподобие линз, и хотя спиральные рукава галактик говорят о вращении галактик вокруг какой-то оси, во всей Вселенной в целом не обнаруживается никаких выделенных плоскостей или каких-либо осей вращения. Отсюда легко понять, что большинство космологических моделей не только *однородно*, но и *изотропно*. Оба этих предположения относятся к трехмерной изотропии и однородности. Однако всегда существует четко выделенная временная ось, которая представляет среднее локальное состояние движе-

ния материи; в большинстве космологических моделей существуют трехмерные пространственноподобные «поверхности», которые в каждой своей точке перпендикулярны к локальной оси времени. Каждая такая поверхность представляет собой один «момент времени» на космологической шкале (см. рис. 66). Именно поэтому космологические модели никогда не обладают полной симметрией, допускаемой преобразованием Лоренца или требованием общей ковариантности. Все космологические модели, которые можно придумать, опираются на привилегированные системы отсчета, хотя четко выявить такую систему в каждом отдельном случае совсем не просто.

Однако это обстоятельство вовсе не говорит о внутренней противоречивости релятивистской теории строения Вселенной. Требования релятивистской инвариантности относятся к законам, которым должны подчиняться все модели Вселенной; каждая конкретная модель должна иметь свою собственную привилегированную ось времени, она может также обладать некоторыми дополнительными особенностями, которые и приводят к появлению привилегированной системы отсчета. Существуют космологические модели, удовлетворяющие требованию однородности, но не удовлетворяющие требованию изотропности; одной из хорошо известных моделей такого типа является модель Геделя (Принстон). В этой модели в каждой точке Вселенной есть некоторое подобие вращения.

Вернемся еще раз к простейшей космологической модели, которая в трехмерном смысле однородна и изотропна. Усредненные характеристики вещества, наполняющего такую модель, в каждый момент времени могут быть выражены только через два параметра — среднюю плотность и среднее давление. Тензор кривизны состоит только из двух компонент, которые нельзя связать между собой никаким алгебраическим соотношением, вытекающим только из соображений симметрии; эти две компоненты образуют часть тензора Эйнштейна. Тензор Вейля обращается в нуль. Что касается пространственной части кривизны, здесь могут быть три возможности: она может быть положительной, отрицательной и может обращаться в нуль. Если она положительна, Вселенная оказывается ограниченной (конечной) в пространстве; в двух других случаях она может быть неограниченной (бесконечной) в пространстве.

Если принять, что кривизна пространства положительна, Вселенная как целое имеет конечный объем и средние давление и плотность массы могут меняться с течением времени. Так как из законов общей теории относительности вытекает, что тензор Эйнштейна пропорционален тензору энергии — натяжений (давление входит в состав натяжений), всякое изменение плотности массы и давления вызывает изменение пространственной кривизны и в свою очередь, изменение общего объема в зависимости от космологического времени. В этом плане вполне возможно, что вещество — даже в ограниченной Вселенной — перемещаясь единым образом или по частям конденсируется или, наоборот, разрежается, не переставая заполнять собой все допустимые части Вселенной и не образуя ни крупномасштабных сгустков, ни пустот.

Еще раз подчеркнем, что космологический принцип в любом своем варианте вовсе не вытекает из требований общей теории относительности; эта теория не отдает предпочтения ни одной из многих космологических моделей, построенных в соответствии с теми требованиями, которые выдвигает космологический принцип. Так называемая модель устойчивого состояния Хойля, Бонди и Голда приводит к нарушению законов общей теории относительности, потому что создание вещества из ничего нарушает законы сохранения энергии и импульса, которые входят неотъемлемым образом в теорию. Формально можно избежать и такого нарушения, если допустить наряду с порождением вещества одновременное создание частиц с отрицательной массой; причем достаточно приписать этим частицам такие свойства, которые позволяют им ускользнуть от любого известного способа обнаружения частиц. Возможно, конечно, что такие частицы со временем будут обнаружены, однако сейчас нет ни малейшего намека на их существование. Сохраняют ли свою силу законы общей теории относительности в космологических масштабах или же для крупномасштабной структуры Вселенной существуют какие-то явления, о которых мы сейчас даже и не догадываемся, — все это нельзя выяснить ни путем «чистого мышления», ни путем чисто эмпирических наблюдений. Проблема может быть решена тонким сочетанием непрекращающихся усилий по накоплению данных наблюдений и разработке теоретических вопросов.