



2.8. Основные сведения о космологии. Красное смещение в спектрах звезд. Решение уравнений теории тяготения Фридманом и его модели эволюции Вселенной

Теперь перейдем к изложению кратких сведений о современной космологии, науки о происхождении и эволюции Земли, Солнца, звезд и всех галактик. Анализ пространства и времени нельзя считать полным, если не рассматривать пространство как всю Вселенную, а время – как историю ее эволюции. Описание структуры Вселенной состоит в представлении о том, что в основном это пустое пространство или, по современной терминологии, физический вакуум. Большая часть излучающего вещества сосредоточена в звездах, каждая звезда – подобие Солнца, но размеры, цвет, состав и этапы их эволюционного развития могут быть и весьма существенно другими.

Солнце с Землей и другими планетами Солнечной системы, видимые невооруженным глазом звезды и большинство звезд, наблюдаемых с помощью мощных телескопов, составляют огромную звездную систему – нашу Галактику. В ее состав входит не менее 100 миллиардов звезд различных типов. Общая их масса составляет величину порядка 10^{44} г, что равно примерно 10^{11} масс Солнца. Кроме того, в Галактику входят межзвездная пыль и газ, масса которых составляет примерно 5% от массы всех звезд.

Земному наблюдателю Галактика видится в виде Млечного пути. Существование последнего объясняется тем, что Солнце и его планеты находятся внутри основания Галактики, в ней концентрируется подавляющее большинство звезд. Это основание имеет форму линзы (Рис. 90) размером в поперечнике до 100 тысяч световых лет и толщиной в центральной части до 12 тысяч световых лет (такие меры длины употребляются в астрономии). Один световой год соответствует длине пути, который свет проходит за год со скоростью в 3×10^5 км/с. Поскольку в году 365,242 суток, то длина в световой год равна $9,46 \times 10^{12}$ км, т.е. почти десятку тысяч миллиардов километров. Кроме того, в астрономии еще ис-

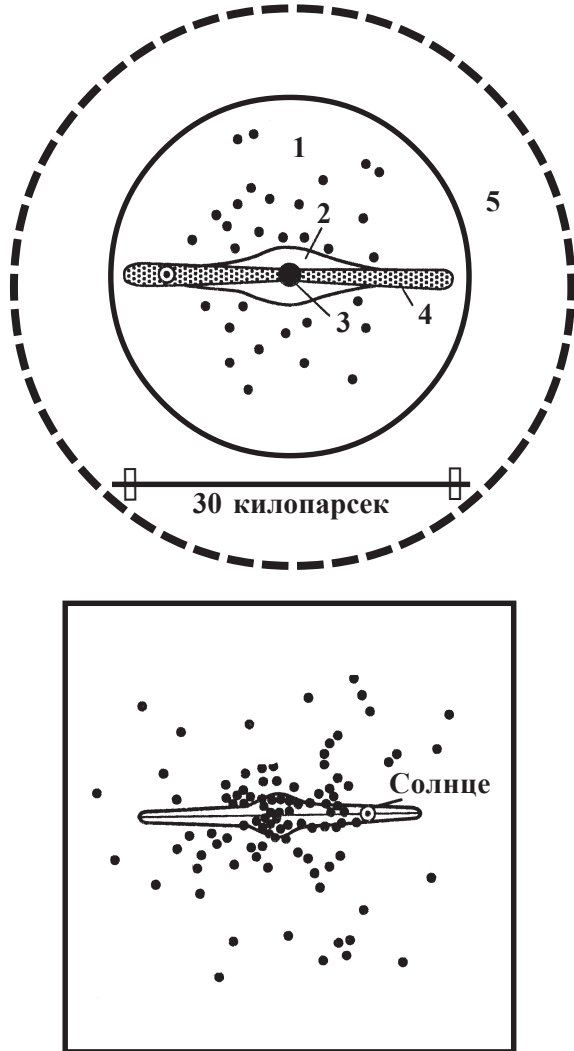


Рис. 90. Схема строения нашей Галактики. Точками показаны некоторые шаровые скопления. Положение Солнца показано буквой *O*. 1 – сферическая составляющая; 2 – диск; 3 – ядро; 4 – слой газопылевых облаков; 5 – корона. Размеры на рисунке условные: радиус короны в действительности в несколько раз больше радиуса диска.



2.8. Основные сведения о космологии...

пользуются две специальные единицы длины: парсек и *астрономическая единица длины* (а.е.д.), последняя равна величине большой полуоси эллиптической орбиты Земли вокруг Солнца, т.е. 149 597 870 км, а один парсек равен 206, 265 а.е.д. или 30×10^{12} км. Часто применяются и более крупные единицы длин: килопарсеки (к.пс), равные тысяче парсеков и мегапарсеки (м.пс), равные миллиону парсеков.

Выясним теперь, как в астрономии определяются расстояния до космических объектов. Заметим, что единого универсального метода определения этих расстояний не существует. По мере перехода от близких расстояний к более удаленным объектам одни методы заменяются другими. Так, среднее расстояние планет от Солнца в нашей Солнечной системе определяется по периодам обращения планет вокруг Солнца по третьему закону Кеплера, согласно которому квадраты периодов обращения двух планет вокруг Солнца относятся как кубы длин больших полуосей их орбит. В настоящее время используются также радиолокационные методы. В них расстояния определяются по запаздыванию отраженного радиосигнала при известной скорости его распространения. Чувствительность данного метода позволяет определять расстояния до ближайших космических объектов – Луны, Меркурия, Венеры, Юпитера и малых планет (например, Икара). Для космических объектов время запаздывания необычайно велико: если для Луны оно равно 2,5 секунды, то для Юпитера оно достигает часа.

Для звезд, поскольку они удалены намного больше от Земли, чем планеты солнечной системы, используются другие методы определения расстояний. В частности, для ближайших звезд используется явление *параллакса*, которое возникает вследствие движения Земли – суточного собственного вращения вокруг земной оси, годового из-за вращения Земли вокруг Солнца и, наконец, векового из-за движения всей Солнечной системы в Галактике.

Явление параллакса заключается в том, что, наблюдая звезду в разные времена суток или года, мы замечаем, что ближайшие звезды, хотя и немного, но все же заметно перемещаются на небесной сфере. Под небесной сферой понимают воображаемую вспомогательную сферу, на которую проектируются все небесные светила; она служит для решения различных астрономических задач. Положение светила на этой сфере определяется с помощью небесных по-



лярных координат с определенным способом выбранным полюсом. На *рис. 91* показана так называемая горизонтальная система небесных координат, в которой основным кругом служит горизонт *NEASM*, полюсом – зенит *Z*. Для определения места светила проводят через него и зенит *Z* большой круг или вертикаль. Дуга на вертикали величина *Zσ* от зенита *Z* до точки светила *σ* называется его *зенитным расстоянием*. Это и есть первая координата светила. Она может иметь любые значения от 0° (для зенита *Z*) и до 180° для надира *Z'* на горизонте.

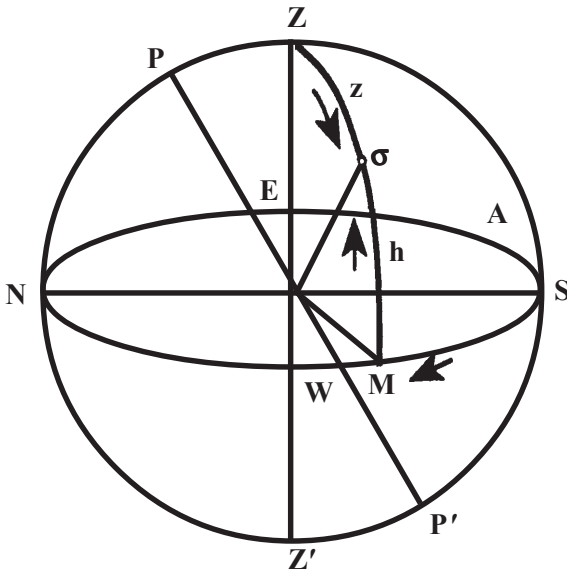


Рис. 91. Горизонтальная система небесных координат. *Z* – зенит; *Z'* – надир; *NEASMN* – горизонт; *ZM* – большой круг; *σ* – зенитное расстояние (первая координата); азимут *NEASM* (вторая координата).

Вторая координата – азимут *A* – является дугой горизонта, которая отсчитывается по горизонту от северного полюса *N* до его пересечения с большим кругом, двигаясь по горизонту через восток *E*. Азимут *A* может принимать все значения от 0° до 360° . Так определяются положения светил на небесной сфере в начальный момент времени. Через полгода вследствие параллакса координаты светил изменятся,



причем величину их изменения можно измерить в угловых единицах. На *рис. 92* показано определение расстояния до звезды *A* по ее видимому годовичному перемещению на небесной сфере, вызванному движением Земли вокруг Солнца. Здесь π – параллакс звезды *A*, *C* – Солнце, *З* – Земля (расстояние между ними равно одной а.е.д.). Из треугольника *ЗСА*, в котором известен угол π и базис – большая полуось земной орбиты, мы имеем:

$$\sin \pi \cong ЗС/ЗА \cong \text{а.е.д.}/R,$$

ввиду малости угла синус можно заменить углом, т.е. $\sin \pi \cong \pi$, и тогда расстояние до звезды *R* будет равно

$$R \cong \text{а.е.д.}/\pi.$$

Ближайшая к Солнечной системе звезда Проксима Центавра имеет параллакс в $0,762''$, т.е. расстояние равно $1,32$ пс или $4,3$ световых лет.

Для определения расстояний до *более удаленных* космических объектов служат другие методы, например, фотометрические, основанные на сравнении освещенности, создаваемой звездами на Земле, а для наиболее удаленных объектов пользуются явлением красного смещения в спектрах звезд.

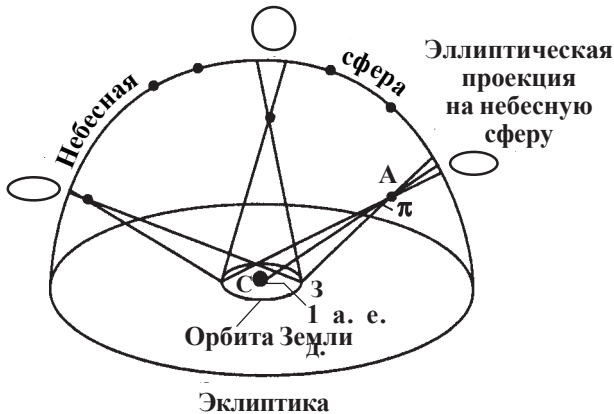


Рис. 92. Определение расстояния до звезды *A* по ее видимому годовичному перемещению по небесной сфере, вызванному движением Земли по ее орбите вокруг Солнца. π – параллакс звезды *A*; *C* – Солнце; *З* – Земля.



На нашем небе мы прекрасно видим Солнце, Луну и планеты в отраженном солнечном свете. Люди с хорошим зрением могут увидеть на ясном ночном небе даже некоторые туманности, которые представляют собой другие галактики, отличные от нашей. Ближайшие к нам галактики – это Большие и Малые Магеллановы облака с расстоянием от Земли в 76 000 и 83 000 световых лет. Другая видимая невооруженным глазом галактика – туманность Андромеды, удаленная на 1,5 миллиона световых лет. Такие гигантские по нашим земным масштабам космические образования являются лишь «песчинками» Вселенной. Они разбросаны более или менее беспорядочно и собираются в отдельные группы, своего рода «молекулы» Космоса. В большие телескопы можно наблюдать и гораздо более удаленные галактики, свет от которых проходит миллиарды световых лет. Например, с помощью мощного телескопа, установленного на горе Пальмер в США, можно наблюдать до десяти миллиардов галактик.

Совокупность галактик всех типов образуют *Метагалактику*. Любопытно, что по мере перехода от отдельных галактик к системам галактик все более высокой степени организации (группы скоплений, сверхскоплений и т.д.) пространственное распределение вещества во Вселенной становится все более равномерным, массы вещества в объемах, намного превышающих сверхскопления, получаются сравнимыми друг с другом, а средняя плотность вещества по всем направлениям – одного порядка величины ($\sim 7 \times 10^{-30}$ г/см³). Такая однородность Вселенной еще больше подтверждается наблюдением так называемого *реликтового излучения*, которое оказывается по интенсивности одинаковым по всем направлениям и расстояниям.

Как показывают наблюдения оптических спектров звезд, химический состав вещества различных галактик такой же, как и на Земле. Однако распространенность химических элементов на Земле и в Космосе различна. На *рис. 93* показано наблюдаемое распределение химических элементов во Вселенной в зависимости от номера химического элемента *Z* в Периодической системе Менделеева.

Теоретическое истолкование данной кривой есть одна из важнейших задач ядерной астрофизики. Мы сразу видим, что водород преобладает над всеми другими химическими элементами. Это свидетельствует о том, что он является ис-



реакции, которые происходят в недрах звезд, и тогда вернемся к анализу кривой *рис. 93*.

Эпохальным открытием в космической физике явилось

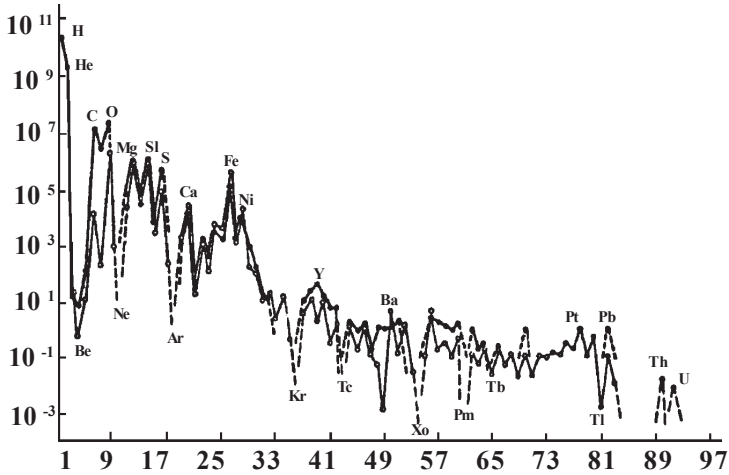


Рис. 93. Распространение химических элементов как функция их атомного веса. Штриховая кривая – обойденные атомные ядра.

обнаружение в 1929 году астрономом Хабблом так называемого *красного смещения*, т.е. смещения частот спектральных линий в спектрах звезд по сравнению с частотами соответствующих линий, снятых в эталонных измерениях в земных условиях. Хаббл обнаружил его, изучая состав излучения удаленных звезд, причем такое смещение возрастало пропорционально увеличению расстояния от Земли до звезды. Хаббл понял, что эффект смещения есть просто эффект Допплера, заключающийся в сдвиге частоты света при удалении его источника от наблюдателя. Из открытия Хаббла следовал однозначный вывод, что Вселенная находится в непрерывном процессе расширения, что совершенно изменило всю космологию. Вселенная оказалась не застывшей системой, а образованием, имеющим историю своего развития – начало, а возможно, и конец. Современная космология считает, что расширяющаяся Вселенная подчиняется тем же законам динамики, что и на Земле: гравитационные силы ответственны за движение



Вселенной. Поэтому теория тяготения Эйнштейна и должна решать проблему эволюции Космоса. Отметим, что Эйнштейн еще до открытия Хаббла построил статическую модель Вселенной. Его модель конечна, но не имеет границ, подобно поверхности сферы, а если нам захочется знать, что находится «снаружи» Вселенной, то этого «снаружи» вообще нет.

Первым ученым, кто применил теорию тяготения Эйнштейна к меняющимся вселенным, был русский математик А.А. Фридман из Петербурга. Он еще до открытия Хаббла в 1922 году опубликовал работу, которая до настоящего времени является главной теоретической базой при анализе почти всех космологических проблем современности. Ко времени появления в печати работы, описывающей однородное изотропное движение вещества Метагалактики, не было известно, что такое движение, такая нестационарность Метагалактики существует в действительности. Поэтому вначале большинство ученых, да и сам Фридман, сомневались в пригодности его решений для описания свойств реальной Вселенной. Однако открытие Хаббла стало блестящим экспериментальным подтверждением теоретического предсказания Фридмана, поскольку доказательство доплеровской природы красного смещения убедительно доказывало существование процесса расширения Метагалактики.

По Фридману, из-за однородности пространства Вселенной единственно возможное его изменение – расширение или сжатие, одинаковое повсюду, причем расширение Вселенной означает расширение пространства не «наружу», в некую прежде пустую область, а именно расширение самого пространства. Напомним, что есть различие в понимании пространства и времени в ньютоновской механике и в механике теории относительности Эйнштейна. Ньютон рассматривал пространство как внешнюю арену, в которой разыгрываются все процессы динамики, пространство и время у него не связаны друг с другом и с материей. Уже в специальной теории относительности Эйнштейна была выяснена глубокая связь между пространством и временем, которые были слиты в единый четырехмерный мир Минковского. Согласно теории тяготения Эйнштейна, пространство-время – это не «арена», где разыгрываются все процессы движения материи, а активный «участник» таких процессов. Распределение и движение материи изменяют и геометрические



свойства пространства-времени и, с другой стороны, сами зависят от них.

Напомним, что Допплер-эффект заключается в изменении частоты колебаний при относительном движении источника и приемника волн тех или иных колебаний. Когда оба объекта удаляются друг от друга, наблюдатель фиксирует уменьшение частоты колебаний или увеличение длины их волн. Наоборот, при движении источника и наблюдателя навстречу друг к другу частота воспринимаемых последним колебаний возрастает, а длина волны убывает. Увеличение длины волны или уменьшение частоты обычно принято называть красным смещением, а увеличение частоты или уменьшение длины волны – фиолетовым смещением. Величина изменения длины волны λ_0 при красном смещении дается формулой специальной теории относительности, которую мы приводим без вывода:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + (v/c) \times \cos \varphi] / [1 - (v^2/c^2)]^{1/2}.$$

При очень малых отношениях относительной скорости источника и приемника $v/c \ll 1$ и при $\varphi = 0$ (где φ – угол между вектором относительной скорости и направлением источник-приемник) мы имеем классический результат:

$$\Delta\lambda/\lambda = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = v/c.$$

При $\varphi = 90^\circ$, т.е. если при движении источника его расстояние от наблюдателя не будет меняться, длина волны все равно растет, наблюдается так называемый поперечный Допплер-эффект.

Подчеркнем еще раз, что из-за однородности пространства единственно возможное его изменение – это изменение масштабов, т.е. расширение или сжатие, одинаковые повсюду. На *рис. 94* показаны изменения масштабного фактора R со временем, которые были получены при фридмановском решении уравнений Эйнштейна, причем представлены три возможные модели эволюции Вселенной по Фридману. Важной чертой моделей является постоянное *уменьшение скорости* расширения со временем: все три кривые графика постепенно наклоняются к оси абсцисс. Согласно любой из указанных трех моделей, в некоторый момент времени $t = 0$ в прошлом масштабный фактор R должен был равняться нулю. Это выражает тот физический факт, что галактики,

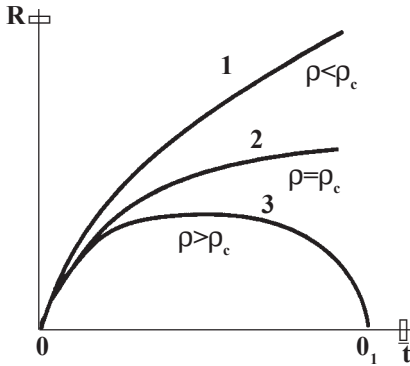


Рис. 94. Космологические модели по Фридману. В моделях 1 и 2 расширение Вселенной продолжается бесконечно, а в модели 3 оно замедляется, останавливается и Вселенная начинает сжиматься в сингулярную точку, т. е. коллапсирует в «ничто».

которые мы сейчас видим разбегающимися друг от друга, когда-то в далеком прошлом должны были быть плотно сжаты друг с другом вместе. Данные графики позволяют нам предсказать и будущее Вселенной.

Модели 1 и 2 соответствуют постоянному космологическому расширению Вселенной, которое продолжается вечно. Почему так происходит, нетрудно понять: в модели 1 плотность вещества ρ мала настолько, что хотя гравитация несколько замедляет расширение, через некоторое время оно по существу становится свободным – галактики как бы разбегаются, вырываясь из гравитационного «плена». В модели 2 плотность вещества ρ еще недостаточно велика, и расширение продолжается, но с большим замедлением, чем в модели 1. Напротив, в модели 3 плотность вещества ρ уже достаточна, чтобы при некоторой ее величине расширение масштабного фактора R сменилось на сжатие и галактики вновь стали бы сближаться. Такая Вселенная «проваливается» сама в себя, и ее существование заканчивается в условиях, подобных тем, которые были в начале расширения.

Важно отметить, что все три модели указывают на то, что в прошлом Вселенная была очень сжатой и в некоторый начальный момент времени она имела масштабный фактор $R = 0$. Момент $t = 0$, согласно моделям Фридмана, соответствует началу расширения. Точное определение времени начала до некоторой степени зависит от того, какая из указанных моделей выбирается для нашей Метагалактики. Изменяя, с какой скоростью в данный момент удаляются от нас галактики, находящиеся на известных расстояниях, можно



2.8. Основные сведения о космологии...

вычислить скорость расширения, которая позволит установить современное положение Вселенной на кривых *рис. 94*. Из графика видно, что в прошлом поведение всех трех фридмановских моделей было очень сходным. Поэтому можно определить момент начала, где $R = 0$: оно находится в интервале 10–20 миллиардов лет тому назад.

Поскольку множитель R определяет масштаб расстояний между любыми двумя точками, и в том числе между двумя галактиками, то в момент, соответствующий $R = 0$, все галактики должны находиться в одной точке пространства. Следовательно, все вещество наблюдаемой Вселенной, из которого сейчас состоят все галактики с их миллиардами звезд, пылью и газом, было в тот момент сжато в одну математическую точку, а плотность вещества была *бесконечной*, в современной теории такая точка носит название *сингулярности* (особенности). Наличие сингулярности в моделях Фридмана свидетельствует о том, что на достаточно раннем этапе расширения Вселенной общая теория относительности, а возможно, и пространственно-временное описание мира теряют свою силу.

Если пространство-время при сингулярности не может существовать и только возникает впервые, то момент с нулевым масштабным фактором представляет собой «сотворение», т.е. рождение Вселенной. Что было до этого, неясно, да и можно ли задавать себе такой вопрос вообще?